Havacılık Parçalarının Ölçümünde Kullanılan Koordinat Ölçüm Makinelerinin Kalibrasyon ve Doğrulama Süreçleri

Samet Taşyürek

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Şubat 2026

Calibration and Verification Processes of Coordinate Measuring Machines Used in Aerospace Part Measurement

Samet Taşyürek

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aviation Science and Technologies

February 2026

Havacılık Parçalarının Ölçümünde Kullanılan Koordinat Ölçüm Makinelerinin Kalibrasyon ve Doğrulama Süreçleri

Samet TAŞYÜREK

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

Şubat 2026

ONAY

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Samet Taşyürek'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Havacılık Parçalarının Ölçümünde Kullanılan Koordinat Ölçüm Makinelerinin Kalibrasyon ve Doğrulama Süreçleri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr Kürşad Melih GÜLEREN

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

Üye: Prof. Dr. Selim GÜRGEN

Üye: Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi DİLTEMİZ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ÖZDEMİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr Kürşad Melih GÜLEREN danışmanlığında hazırlamış olduğum "Havacılık Parçalarının Ölçümünde Kullanılan Koordinat Ölçüm Makinelerinin Kalibrasyon ve Doğrulama Süreçleri" başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

02/02/2026

Samet Taşyürek

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
X ChatGPT

☐ DeepSeek
☐ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):
X Metin oluşturma

☐ Literatür tarama
☐ Çeviri
☐ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
X Görüntü üretme

☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

506720230004

Samet Taşyürek

02/02/2026

ÖZET

İnsan nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesiyle hava ulaşımına olan talebin artacağı kolaylıkla tahmin edilebilir. Bu büyüme ile birlikte hava araçlarına olan ihtiyaç da artacaktır. Bu ihtiyaca paralel olarak hava araçları parçalarının üretiminin ve bakım-servis hizmetlerinin de artması beklenmektedir. Doğal olarak, bu parçalarının üretiminde ve bakım-servis hizmetlerinde çok yoğun bir şekilde kullanılan CMM (Coordinate Measuring Machine) kullanımı, sayısı ve önemi artacaktır. CMM'ler, parça üretiminde ve bakımında çok yoğun bir şekilde kullanımına rağmen cihazın nasıl çalıştığı ve arkasında yatan mantığı, teoriyi bilen operatör ve mühendis eksikliği olduğu bilinmektedir. Ek olarak, CMM'lerin nasıl kalibre edilmesi gerektiği de çok az kişi tarafından bilinmektedir. Bu işlem, çoğunlukla hazır CMM kalibre programları aracılığı ile yapılmaktadır. Dolayısı ile, CMM kalibrasyonu ve doğrulaması ile ilgili önemli derecede dokümentasyon eksikliğinin olduğu söylenebilir. Bu eksikliğin önüne geçmek için, öncelikle hava araçları parçaları üreten firmaların uygulamalarından ve CMM satıcıların dkümanlarından yararlanılarak CMM'ler hakkında genel bilgiler verilmiş olup sonrasında ise ISO 10360-1-2-3-4-5-7-8 spektleri dikkate alınarak CMM kalibrasyonunun ve doğrulamasının nasıl yapılacağı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CMM, Üç Boyutlu Ölçüm, Kalibrasyon, Doğrulama, Koordinat Ölçüm Makinesi

SUMMARY

It can be easily predicted that the demand for air transportation will increase with the increase in human population and the development of technology. With this growth, the need for aircraft will also increase. In parallel with this need, it is expected that the production of aircraft parts and maintenance-service facilities will also increase. Naturally, the use, number and importance of CMM (Coordinate Measuring Machine), which is used very intensively in the production of these parts and maintenance-service facilities, will increase. Although CMMs are used very intensively in the production and maintenance of parts, it is known that there is a lack of operators and engineers who know how the machine works, the logic and theory behind it. In addition, very few people know how CMMs should be calibrated. This process is mostly done through ready-made CMM calibration programs. Therefore, it can be said that there is a significant lack of documentation on CMM calibration and verification. In order to eliminate this deficiency, first of all, general information about CMMs is given by using the applications of companies producing aircraft parts and the documents of CMM suppliers, and then detailed information is given on how to perform CMM calibration and verification by taking into account the ISO 10360-1-2-3-4-5-7-8 specifications.

Keywords: CMM, 3D Dimensional Inspect, Calibration, Verification, Coordinate Measuring Machine

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans ve tez yazımı süresince bana hep yardımcı olan bilgi birikimi,deneyimini ve değerli katkılarını hiç bir zaman esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr Kürşad Melih GÜLEREN'e teşekkürlerimi bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca, tez yazımı süresince beni her zaman destekleyen ve sabır gösteren eşim Ece YASAK TAŞYÜREK, kızım Duru TAŞYÜREK ve oğlum Selim TAŞYÜREK'e sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. KOORDINAT ÖLÇÜM MAKİNELERİ 8
3.1. CMM'lerin Tarihçesi 8
3.2. CMM'lerin Kullanım Alanları 8
3.3. CMM'lerin Bileşenleri 10
3.4. CMM'lerin Çeşitleri 15
3.5. CMM'de Kullanılan Yazılımlar 17
3.6. CMM'de Ölçümü Etkileyen Faktörler 18
3.7. Örnek Bir Parça Ölçümü 18
4. MATERYAL VE YÖNTEM 23
4.1. ISO 10360 25
4.2. Doğrusal Boyutları Ölçmek İçin Kullanılan CMM'ler 25
4.2.1. Terimler ve Tanımlar 26
4.2.2. Çevresel Ve Metrolojik Gereklilikler 27
4.2.3. Kabul Testleri Ve Doğrulama Testleri 28
4.3. Döner Tabla Eksenini Dördüncü Eksen Olarak Kullanan CMM'ler 38
4.3.1. Metrolojik Özellikler İçin Gereklilikler 38
4.3.2. Kabul Ölçümleri ve Doğrulama Ölçümleri 39
4.3.3. Uygulamalar 45
4.3.4. Döner Tabla'nın Avantajları 46
4.4. Tarama Ölçüm Modunda Kullanılan CMM'ler 47

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.4.1. Metrolojik Özellikler İçin Gereklilikler 48
4.4.2. Kabul Ölçümleri ve Doğrulama Ölçümleri 49
4.4.3. Uygulamalar 52
4.4.4. Tarama Ölçümünün Avantajları 53
4.5. Tek Ve Çok Uçlu Temaslı Prob Sistemleri Kullanan CMM'ler 54
4.5.1. Metrolojik Özellikler İçin Gereklilikler 55
4.5.2. Kabul Ölçümleri ve Doğrulama Ölçümleri 56
4.5.3. Uygulamalar 64
4.5.4. Çok Uçlu Prob Sisteminin Avantajları 64
4.6. Görüntülü Probu Olan CMM'ler 66
4.6.1. Çevresel ve Metrolojik Gereklilikler 67
4.6.2. Kabul Testleri ve Doğrulama Testleri 69
4.6.2.1. Karasellik Hatası 73
4.6.2.2. Uzunluk ölçüm hatasının tekrarlanabilirlik aralığı, RB veya RU 76
4.6.2.3. Problama performansı, F2D 76
4.6.3. Spesifikasyonlara Uygunluk 79
4.6.4. Uygulamalar 81
4.6.5. Görüntülü Probu Olan CMM'lerin Avantajları 81
4.7. Optik Sensör'ü Olan CMM'ler 82
4.7.1. Metrolojik Özellikler İçin Gereklilikler 84
4.7.2. Kabul Testleri Ve Yeniden Doğrulama Testleri 85
4.7.3. Spesifikasyonlara Uygunluk 96
4.7.4. Uygulamalar 97
4.7.5. Optik Sensör'ü Olan CMM'lerin Avantajları 98
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 100
5.1 Doğrusal Boyutları Ölçmek İçin Kullanılan CMM'ler 100
5.2 Döner Tabla Eksenini Dördüncü Eksen Olarak Kullanan CMM'ler 100
5.3 Tarama Ölçüm Modunda Kullanılan CMM'ler 101

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5.4 Tek Ve Çoklu Uçlu Temaslı Prob Sistemleri Kullanan CMM'ler..…….102
5.5 Görüntülü Probu Olan CMM'ler….……103
5.6 Optik Sensör'ü Olan CMM'ler……....103
6. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 105
KAYNAKLAR DİZİNİ 107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. CMM bileşenleri.....10
3.2. Granit.....11
3.3. Granit masası.....11
3.4. CMM z eksen kolu.....12
3.5. Doğrusal şerit ölçeği.....12
3.6. Analog prob.....13
3.7. Tetik prob.....13
3.8. Lazer prob çeşitleri.....14
3.9. Kameralı prob.....14
3.10. CMM Çeşitleri.....16
3.11. Örnek bir CMM yazılımı.....18
3.12 Ölçülen Parçanın Referans Düzlemi….....….19
3.13 Dokunulacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz……19
3.14 Parça Üzerinden Alınacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz……...19
3.15 Ölçülen Parçanın Referans Çapı……..…20
3.16 Ölçülen Parçanın Referans Çapı……..20
3.17 Dokunulacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz……....21
3.18 Parça Üzerinden Alınacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz……...21
3.19 Ölçüm Sırasında Çap'dan Alınan Bir Nokta……21
3.20 Ölçüm Sırasında Çap'dan Alınan Bir Nokta……22
3.21 Ölçülen Deliğin Sonucu……...22
4.1. (X, Y, Z) Eksenlerinde 21 adet hatanın gösterimi.....23
4.2. CMM'de Kalibrasyon Ölçüm Pozisyonları.....29
4.3. E150 test prosedürü için dört olası kalibre edilmiş test uzunluğu konumundan ikisini ve olası prob yöneliminden ikisini gösteren örnek.....35
4.4 CMM'de Kalibrasyon Ölçüm Pozisyonları.....36
4.5. Döner tabla içeren CMM.....38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.6. Kalibrasyon Küresi.....41
4.7. Kabul ölçümü ve yeniden doğrulama ölçümü için döner tabla üzerindeki kontrol kürelerinin konumları.....42
4.8. Dördüncü eksen olarak döner tabla eksenli CMM için, kabul ölçümü ve yeniden doğrulama ölçümüne ilişkin olarak, üç - dört eksen hatalarınca (FRB, FTB, FAB) oluşturulan hacmin şematik gösterimi 43
4.9. Kontrol küresi üzerinde dört hedef tarama düzlemi.....50
4.10. Hedef Temas Noktaları.....58
4.11. Prob uzunluğu l olan sabit çoklu prob ucuyla problama sistemi.....62
4.12. Görüntüleme Problama Sistemi.....66
4.13. Karelik hatasını kontrol etmek için kare, Es.....74
4.14. PF2D'yi ölçmek için tüm görüş alanı boyunca 25 ölçüm noktasının İzin verilebilir bir modeli ve olası dağılımı.....77
4.15. Görüş alanı içindeki test dairesinin İzin verilen konumu.....78
4.16. Küre.....83
4.17. Tr, Art ve St çizimi.....83
4.18. Ölçüm alanı ile sensör alanı arasındaki ilişki.....87
4.19. Test küresindeki ölçüm alanı ve raporlanacak koni açısı.....88
4.20. Gerekli dört çapraz konum ve koordinat sisteminin eksenleri boyunca varsayılan üç konum.....92
4.21. Değerlendirmede test düzlemlerinin önerilen konumları: x-y düzlemindeki çapraz çizgi boyunca bir konum ve bir çapraz konum.....95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Ülkere Göre Metroloji Firmaları.....9

4.1. ISO 10360 Serisi.....24

4.2. CMM'de Ölçüm Konumları.....28

4.3. Wenzel LH108 Teknik Bilgi Broşurü.....30

4.4. 1. Eksen Sonuçları.....31

4.5. 2. Eksen Sonuçları.....31

4.6. 3. Eksen Sonuçları.....32

4.7. 4. Eksen Sonuçları.....32

4.8. X Ekseni Sonuçları.....33

4.9. Y Ekseni Sonuçları.....33

4.10. Z Ekseni Sonuçları.....34

4.11. Ölçüm Pozisyonları, E150.....35

4.12. 2A Ekseni Sonuçları.....36

4.13. 1B Ekseni Sonuçları.....37

4.14. Döner Tabla Kontrolü İçin Başlangıç Açıları ve Alınan Ölçümler Sonrası Hesaplanan Değerler.....44

4.15. ISO 10360-4 Ölçüm Sonuçları.....52

4.16. ISO 10360-5 Sonuçları.....59

4.17. Ölçüm hacminde oryantasyon.....71

4.18. Ölçüm Hacmindeki Yönelim.....92

4.19. Ölçüm Hacmindeki Yönelim.....96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
Art	Eklemli; Sensörün Hizalaması Ayrıca Bir Eklemli Sistem Vasıtasıyla Değiştirildiğinde (Articulated; When the Sensor's Alignment is Also Changed Through an Articulated System)
CMM	Koordinat Ölçüm Makinesi (Coordinate Measuring Machine)
CMS	Koordinat Ölçüm Sistemleri (Coordinate Measuring Systems)
CTE	Termal Genleşme Katsayısı (Coefficient Of Thermal Expansion)
EB	Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Bidirectional Length Measurement Error)
EB, MPE	Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Permissible Error Of Bidirectional Length Measurement)
Ebi:J:ODS	Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Bidirectional Length Measurement Error)
Ebi:J:ODS,MPE	Çift Yönlü İzin Verilen Maksimum Uzunluk Ölçüm Hatası (Maximum Permissible Error Of Bidirectional Length Measurement)
EBV	Görüntüleme Probu Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Imaging Probe Bidirectional Length Measurement Error)
EBV, MPE	Görüntüleme Probu Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Allowable Error Of Imaging Probe Bidirectional Length Measurement)
EBX	X Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (X Bidirectional Length Measurement Error)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
EBX, MPE	X Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (X Maximum Permissible Error Of Bidirectional Length Measurement)
EBXY	XY Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (XY Bidirectional Length Measurement Error)
EBXY, MPE	XY Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Permissible Error Of XY Bidirectional Length Measurement)
EBY	Y Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Y Bidirectional Length Measurement Error)
EBY, MPE	Y Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Y Maximum Permissible Error Of Bidirectional Length Measurement)
EBZ	Z Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Z Bidirectional Length Measurement Error)
EBZ, MPE	Z Çift Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Z Maximum Permissible Error Of Bidirectional Length Measurement)
Eform.Pla.D95%:J:ODS	Düz Form Ölçüm Hatası (Flat Form Measurement Error)
Eform.Pla.D95%:J:ODS,MPE	İzin Verilen Maksimum Düz Form Ölçüm Hatası (Maximum Allowable Flat Form Measurement Error)
EL	Uzunluk Ölçüm Hatası (Length Measurement Error)
EL, MPE	Uzunluk Ölçümünde İzin Verilen Maksimum Hata (Maximum Permissible Error Of Length Measurement)
ESQ	Karasellik Hatası (Squareness Error)
ESQ, MPE	İzin Verilen Maksimum Karelik Hatası (Maximum Permissible Square Error)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
EU	Tek Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Unidirectional Length Measurement Error)
EU, MPE	Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Permissible Error Of Unidirectional Length Measurement)
Euni:J:ODS	Tek Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Unidirectional Length Measurement Error)
Euni:J:ODS,MPE	Tek Yönlü İzin Verilen Maksimum Uzunluk Ölçüm Hatası (Maximum Permissible Length Measurement Error In Unidirectional)
EUV	Görüntüleme Probu Tek Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Imaging Probe Unidirectional Length Measurement Error)
EUV, MPE	Görüntüleme Probu Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünü İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Permissible Error Of Imaging Probe Unidirectional Length Measurement)
EUX	X Tek Yönlü Uzunluk Ölçümü Hatası (X Unidirectional Length Measurement Error)
EUX, MPE	X Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (X Maximum Permissible Error Of Unidirectional Length Measurement)
EUXY	XY Tek Yönlü Uzunluk Ölçümü Hatası (XY Unidirectional Length Measurement Error)
EUXY, MPE	XY Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Maximum Permissible Error Of XY Single-Direction Length Measurement)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
EUY	Y Tek Yönlü Uzunluk Ölçümü Hatası (Y One-Way Length Measurement Error)
EUY, MPE	Y Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Y Maximum Allowable Error Of One-Way Length Measurement)
EUZ	Z Tek Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatası (Z One-Way Length Measurement Error)
EUZ, MPE	Z Tek Yönlü Uzunluk Ölçümünün İzin Verilen Maksimum Hatası (Y Maximum Allowable Error Of One-Way Length Measurement)
FA	Eksenel Döner Tabla Hatası (Axial Rotary Table Error)
FR	Radyal Döner Tabla Hatası (Radial Rotary Table Error)
FT	Teğetsel Döner Tabla Hatası (Tangential Rotary Table Error)
L	Stylus Ucu Ile Referans Noktası Arasındaki Mesafe (Distance Between The Stylus Tip And The Reference Point)
Ldia.5×25:Art:ODS	Mafsallı Konum Değeri (Articulated Position Value)
Ldia.5×25:Art:ODS,MPL	Mafsallı Konum Değerinin İzin Verilen Maksimum Sınır (Maximum Allowable Limit Of The Joint Position Value)
MPE	İzin Verilen Maksimum Hata (Maximum Allowed Error)
MPEFA	İzin Verilen Maksimum Eksenel Döner Tabla Hatası (Maximum Allowable Axial Rotary Table Error)
MPEFR	İzin Verilen Maksimum Radyal Döner Tabla Hatası (Maximum Allowable Radial Rotary Table Error)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
MPEFT	İzin Verilen Maksimum Teğetsel Döner Tabla Hatası (Maximum Tangential Rotary Table Error Allowed)
MPETHP	İzin Verilen En Yüksek Taramalı Prob Değme Hatası Maximum Allowed Scanning Probe Contact Error
MPL	İzin Verilen Maksimum Sınır Maximum Allowed Limit
MPTT	İzin Verilen Maksimum Süre (Maximum Permissible Time)
PF2D	Problama Hatası Probing Error (Maximum Permissible Probing Error)
PF2D, MPE	İzin Verilen Maksimum Problama Hatası (Maximum Permissible Probing Error)
Pform.Sph.1×25:J:ODS	Prob Form Hatası (Probe Form Error)
Pform.Sph.1×25:J:ODS,MPE	İzin Verilen Maksimum Problama Formu Hatası (Maximum Permissible Probing Form Error)
Pform.Sph.D95%:J:ODS	Prob Dağılım Değeri (Probe Distribution Value)
Pform.Sph.D95%:J:ODS,MPL	İzin Verilen Maksimum Problama Dağılımı Sınır (Maximum Permissible Probing Distribution Limit)
PFT	Çoklu Prob Uçlarının Biçim Hataları (Form Errors Of Multiple Styli)
PFTM, MPE	İzin Verilen Maksimum Çoklu Prob Ucu Form Hatası (Maximum Permissible Multi-Stylus Form Error)
PFTU	Tek Prob Ucu Form Hatası (Single-Stylus Form Error)
PFTU, MPE	İzin Verilen Maksimum Tek Prob Ucu Form Hatası (Maximum Permissible Single Stylus Form Error)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
PFV2D	Görüntüleme Probunun Problama Hatası (Probing Error Of Imaging Probe)
PFV2D, MPE	Görüntüleme Probunun İzin Verilen Maksimum Problamahatası (Maximum Permissible Probing-Error Of The Imaging Probe)
PLT	Çoklu Prob Uçlarının Lokasyon Hataları (Location Errors Of Multiple Probe Tips)
PLTM	Çoklu Prob Ucu Konum Değeri (Multi-Stylus Location Value)
PLTM, MPL	Çoklu Prob Ucu Konum Değerinin İzin Verilen Maksimum Sınırı (Maximum Permissible Limit Of The Multi-Stylus Location Value)
Psize.Sph.1×25:J:ODS	Prob Boyut Hatası (Probe Size Error)
Psize.Sph.1×25:J:ODS,MPE	İzin Verilen Maksimum Problama Boyutu Hatası (Maximum Permissible Probing Size Error)
Psize.Sph.All:J:ODS	Prob Boyut Hatası Tümü (Probe Size Error All)
Psize.Sph.All:J:ODS,MPE	İzin Verilen Maksimum Problama Boyutu Hatası Tümü (Maximum Permissible Probing Size Error All)
PST	Çoklu Prob Uçlarının Boyut Hataları (Dimensional Errors Of Multiple Styli)
PSTM, MPE	İzin Verilen Maksimum Çoklu Prob Ucu Boyutu Hatası (Maximum Permissible Multi-Stylus Size Error)
R0	Tekrarlanabilirlik Aralığı (Repeatability Range)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
Rb	Çift Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatasının Tekrarlanabilirlik Aralığı (Repeatability Range Of Bidirectional Length Measurement Error)
Rb, Mpl	Çift Yönlü Tekrarlanabilirlik Aralığının İzin Verilen Maksimum Sınırı (Maximum Permissible Limit Of The Bidirectional Repeatability Range)
Ru	Tek Yönlü Uzunluk Ölçüm Hatasının Tekrarlanabilirlik Aralığı (Repeatability Range Of One-Way Length Measurement Error)
Ru, Mpl	Tek Yönlü Tekrarlanabilirlik Aralığının İzin Verilen Maksimum Sınırı (Maximum Permissible Limit Of The One-Way Repeatability Range)
St	Sabit; Sensör Ölçümler Sırasında Cmm Tarafından Hareket Ettirilmediğinde (Fixed; When The Sensor Is Moved By The Cmm During Measurements)
Thp	Tarama Prob Hatası (Scanning Probing Error)
Tr	Çevirisel; Sensör Cmm Tarafından Hareket Ettirildiğinde Ve Ölçümler Çeşitli Konumlarda Alındığında (Translational, When The Sensor Is Moved By The Cmm And Measurements Are Taken At Various Positions)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM), yüzeydeki ayrık noktaları bir prob ile algılayarak fiziksel nesnelerin geometrisini ölçen bir cihazdır. Manuel veya bilgisayar kontrollü olabilir; otomotiv, havacılık ve uzay, savunma gibi çeşitli sektörlerde kullanılır. Köprülü CMM'ler, düşük maliyetleri ve uzun vadede doğruluk ve tekrarlanabilirliği koruma yetenekleri nedeniyle popülerdir. Üreticilerin fiziksel nesnelerin dijital modellerini benzersiz bir doğrulukla oluşturmalarını sağlayarak üretim mükemmelliğini şekillendirmede ve inovasyonu kolaylaştırmada çok önemli rol oynarlar. Köprü CMM'ler, takımların veya kalıpların hassasiyetini ve doğruluğunu sağlamak ve amaçlanan uygulama gereksinimlerini karşıladıklarından emin olmak için üretimde çok önemlidir. Tutarsızlıkların belirlenmesine, risklerin azaltılmasına ve çıktı kalitesinin korunmasına yardımcı olurlar. (Mohammad vd., 2025)

Koordinat Ölçüm Sistemleri (CMS) anlaşılmaları ve uygulamaları oldukça zordur. Çoğu durumda yalnızca tek bir tür ölçüm yapabilen geleneksel ölçüm sistemlerinden farklı olarak (örneğin bir cetvel veya kumpas yalnızca boyut özelliklerini ölçer, bir gönye yalnızca açıları ölçer, vb.), CMS'ler genellikle esnektir. Basit kalınlık veya çap ölçümünden geometrik tolerans doğrulamasına ve hatta serbest biçimli yüzey taramasına kadar çok çeşitli farklı ölçüm görevleri gerçekleştirirler. (Stefano ve Giovanni, 2021)

Havacılık endüstrisi, her bileşeninde en yüksek düzeyde hassasiyet gerektiren bir endüstridir. Küçük bir sapma bile, ciddi sonuçlar doğurabilir. İşte bu noktada Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM'ler) devreye girmektedirler. CMM'ler, havacılık parçalarının boyutsal doğruluğunu ve geometrik uyumunu sağlamak için hayati öneme sahip araçlardır. Bu açıdan doğrudan uçak güvenliğini ve performansını etkilemektedir. Her havacılık bileşeni, genel uçak verimliliği, yakıt tüketimi ve güvenliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bir havacılık bileşeninin her bir boyutu ve özelliği, tasarım özelliklerini karşıladığından emin olmak amacıyla titizlikle kontrol edilmektedir.

Kalibrasyon ve doğrulama, ölçüm sistemlerinin güvenilirliğini sağlamak amacıyla kullanılan iki temel kavramdır; ancak amaçları ve uygulama biçimleri bakımından farklılık gösterirler. Kalibrasyon, bir ölçüm cihazının verdiği değerler ile izlenebilir bir referans standart arasındaki ilişkiyi belirlemek ve gerektiğinde bu ilişkiye göre düzeltme yapmak amacıyla yürütülen sistematik bir işlemdir. Bu süreç, ölçüm doğruluğunu artırmak için cihazın ayarlarının yapılmasını veya ölçüm sapmalarının dokümante edilmesini içerir. Buna karşılık, doğrulama işlemi, belirli bir ölçüm cihazının veya sisteminin, tanımlanmış bir kullanım amacına, belirlenen toleranslara ve teknik gereksinimlere uygunluğunu değerlendirmek için yapılır; dolayısıyla cihazın "kabul edilebilir" performans gösterip göstermediğini ortaya koyar. Kalibrasyon, izlenebilirlik ve ölçüm belirsizliği ile ilişkili iken, doğrulama esas olarak uygunluk ve performans doğrulamasıyla ilgilidir.

Artan nüfus ile ulaşımda havayolunun kullanımı artmakta ve gelişen teknoloji ile bu sektöre ulaşım kolaylaşmaktadır. Bunun yanında küresel risklerden dolayı ülkelerin savaş uçağı filolarına yaptıkları yatırım da artmakta ve askeri uçak sayısı da artmaktadır. Havayolu ulaşımının ve askeri uçak sayısının artması ile kullanılan uçak sayısı ve doğal olarak uçak motoru sayısı üretimi de yıllar için de artacağı bir gerçektir. Bu sanayinin gelişmesi ile bu sektörde kullanılan ölçüm aletlerinden olan CMM'lerin de kullanım oranı artacak ve bu sektörde çalışacak mühendis ve teknisyen sayısı da artacaktır.

Bu sektörde çalışan mühendis ve teknisyenlerin CMM kalibrasyon ve doğrulama konusunda genel bilgilerini arttırmak, konu hakkında yapılan çalışmaları bir doküman altında toplamak ve sektörde çalışan mühendis ve teknisyenlerin aynı teknik seviyede konuşması amacıyla bu tez hazırlanmıştır.

Bu çalışma hazırlanırken dünyadaki CMM ve kalibrasyon konulu tezler değerlendirilmiş, bu sektörde çalışan firmaların internet sitelerinde yer alan dokümanlar incelenmiş ve kişisel iş notlarından yararlanılmıştır.

Bu çalışma ile CMM'lerin kalibrasyonu ve doğrulaması konuları yapılan çalışmalar üzerinden ve teknik bilgiler ile birlikte açıklanmaya çalışılmış ve ülkemizde bu sektörde çalışan mühendis ve teknisyenlere yardımcı olunması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mantel (1993), yaptığı çalışmada CMM'ler hakkında genel bilgiler vermiş olup CMM'lerin geleneksel yönetemlerin yerine geçtiğini detaylı bir şekilde anlatmıştır. CMM performansının nelere bağlı olduğunu ve nasıl daha doğru ölçüm sonuçları alınabileceğini açıklamıştır. Ek olarak, gelecekte CMM yapısının daha rijit olacağından, probların daha hızlı ölçüm alacaklarından böylelikle ölçüm sürelerinin kısalacağından, optik probların gelişip yaygınlaşacağından, offline programlamanın gelişeceğinden bahsetmiştir. Mesafe ölçümlerinin yanında yüzey kalitesi ölçümünün CMM'de gerçekleşeceğinden ve bir CMM üzerinde birden fazla farklı prob çeşidinin olacağından söz etmiştir.

İmamoğlu (2023), yaptığı çalışmada firmalara CMM'lerin kalite ve verimlilik açısından katkılarını, belirlenen firmalarda anket yapılarak incelemiştir. İlgili anket 3 ilde 30 firmada 43 soru ile gerçekleştirilmiştir. Bu anket sonucuna göre katılımcıların %72,7'si firmaların toplam kalite yönetimi ve sürekli iyileştirme çalışmaları için yeterli yatırım yapmadıklarını düşünmektedirler. Yine ankete göre küçük ve orta ölçekli firmalar için CMM bakım maliyetinin fazla olması firmaları etkilemektedir. Bakım faaliyetlerinin yanında CMM'de kullanılan yazılımların da maliyetinin yüksek olması firmaları zorlamaktadır. Ankete katılanların %86,7'si CMM'lerin firma için iş çektiğini belirterek firmaların finansal açıdan büyümeyi sağladığı sonucu ortaya çıkmıştır. Ek olarak CMM cihazlarının tersine mühendislik alanında kullanımının artması gerektiği, kalite yönetimine yapılan yatırımın artması gerektiği ve CMM'lerin üretime entegre edilmesi gerektiği önerilerinden de bahsedilmiştir.

Teke vd. (2013), yaptıkları çalışmalarında CMM'lerin performanslarının belirlendiği kalibrasyon, verifikasyon ile ilgili standartlardaki son gelişmelerden bahsetmişlerdir. Bu çalışmalarında, CMM'lerin 3 ayrı eksende 21 adet geometrik hatanın olduğu bu 21 adet hatanın tespit edilme işlemine kalibrasyon adı verdildiği, bu hataların tespitinin ISO 10360 serisi standartlarına göre yapılması gerekitinden bahsedilmiştir. Ülkemizde mastar blok kalibrasyonlarının TÜRKAK tarafından akredite ikinci seviye laboratuvarlarda yapıldığı bilgisini vermiştir. Ek olarak, CMM'lerin modernizasyonu,

update/upgrade edilmesi, retrofit yapılmasından, portatif kollu CMM'lerin modernizasyonundan ve CMM modernizasyonundaki sorunlardan bahsedilmiştir.

Baç (2013), yaptığı çalışmada üç boyutlu ölçüm yapabilen cihazların tasarımını ve üretimini anlatarak ürettiği parçalardan montajı tamamlamıştır. Bu süreçteki deneyimlerinden, tasarım süreci uzun tutularak ortaya çıkabilecek hatalar en başta giderilmeye çalışıldığından, üretimde çıkan problemlerin ise üretim sırasında giderildiğinden, bu çalışmasıda teorik ve pratik çalışmaları eş zaman olarak yaptığı çıkan sonuçların beraber değerlendirildiğinden bahsedilmiştir. Ek olarak, yapılan çalışmanın üç eksenli olduğu ve ölçüm kabiliyetini arttırmak için 4. ve 5. eksenlerin eklenebileceği, kullanılan enkoder boyutunun optimize edileceği gibi önerilerde de bulunulmuştur.

Mohammad vd. (2025), yaptıkları çalışmalarında koordinat metrolojisinin performans doğrulaması ve kalibrasyon belirsizliği için ana konular tartışılmıştır. Daha fazla iyileştirme için bazı özel noktalar belirlenmiş ve yeni ölçüm modeli ve değiştirilmiş belirsizlik analizi ile standart step gageleri kullanılarak CMM performans doğrulaması üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında önerdikleri belirsizlik değerlendirme tekniğinin CMM'in kalibrasyon belirsizliğinin hesaplanması için uygun olduğunu göstermişlerdir.

Flack vd. (2014), yaptıkları çalışmalarında CMM'ler hakkında genel bilgiler verilmiş olup CMM üzerinde hata kaynaklarından bahsetmişlerdir. Sonrasında ise CMM'lerin takip edilebilirliği, kalibrasyonu, performans doğrulaması, mikro CMM'ler, mikro CMM probları ve mikro CMM problarının doğrulamasından ve kalibrasyonu hakkında bilgi vermişlerdir.

Petro ve Moroni (2021), yaptıkları çalışmalarında ISO 10360 uluslararası standartlar serisinde tanımlanan performans doğrulama testlerini istatistiksel bir bakış açısıyla analiz etmişlerdir. Özellikle ölçüm sonuçlarının ölçümün pratik uygulamalarında yaygın olarak bulunan normal dağılıma göre dağıtıldığı varsayımına dayandırmışlardır. Örneklem büyüklüğünün ve test belirsizliğinin testin başarısız olma olasılığı üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Bu sonuçların, CMS uzmanlarının gerçekleştirdikleri testlerin sonuçlarının anlamını daha iyi anlamalarına yardımcı olabileceğini ve testin başarısız olma olasılıklarına daha net bir bakış açısı sağlaya-

bileceğini ifade etmişlerdir. Ek olarak, CMS üreticilerinin makinelerinin performans endekslerinin değerini doğru bir şekilde belirtmelerine yardımcı olabileceğini ve böylece düşük ve yüksek tahminlerden kaçınabileceklerinden, düşük tahminin, diğer ürünlerle rekabet dışı görünmeye yol açabileceğinden, yüksek tahminin ise sık sık test başarısızlıklarına yol açarak müşterideki kurumsal imaja zarar verebileğinden bahsetmişlerdir.

Petro ve Moroni (2021), yaptıkları çalışmalarında CMS doğrulaması için ISO 10360 standart serisine ilişkin istatistiksel bir bakış açısı kazandırmışlardır. Bu çalışma sırasında uzunluk ölçümünde İzin verilen maksimum hata, İzin verilen maksimum tek stylus form hatası üzerine yoğunlaşmışlardır. Ek olarak, ölçüm sonuçlarını basit istatistiksel modellere dayandırarak birden fazla ölçümü doğru şekilde işleyen karar kurallarından bahsedilmiştir. Önerdikleri kuralın standart kural ile karşılaştırıldığında karışık olduğu operatörlerin eğitebileceklerinden söz etmişlerdir.

Savio (2007), yaptığı çalışmada CMM'lerin metrolojik performanslarının test edilmesindeki belirsizlik hakkında bilgi vermiştir. Bu çalışmada CMM testlerinde belirsizlik tahminine yaklaşımdan; döner tabla, temaslı tarama probu ve video problar için test belirsizliğinden bahsetmiştir. Ek olarak, belirsizlik katkılarının tanımlanmasına yönelik yaklaşımın açıklığa kavuşturulmasının ardından, test belirsizliği makul bir çaba ile tahmin edilebileceğinden bahsemiştir. Son olarak, laboratuvarların akreditasyonunda tekdüzelik ve CMM'ler için kalibrasyon ve test hizmetleri sağlayıcıları arasında daha iyi karşılaştırmalar için hesaplama formülleri üzerinde mutabakata varılmalı ve standart hale getirilmesi gerektiğine değinmiştir.

Morse vd. (2004), yaptıkları çalışmada tarama CMM performansını değerlendirmek için alternatif eserler hakkında bilgi vermişlerdir. ISO 10360-4 standardına göre kalibre edilmiş bir küre üzerinde dairesel taramalar yapılmaktadır. Bu kürenin yüksek kaliteye sahip olduğu belirtildiğinden, sertifikasyon testinin gerçek bir parça yüzeyini değerlendirmek yerine, ölçüm sisteminin dinamiklerini denemekten çok CMM hareket kontrol cihazının bir uygulaması olduğu ifade edilmiştir.Ayrica prob iğnesiyle aynı çapa sahip bir ölçüm pimi üzerinde tarama yapmayı içeren farklı bir test önermiştir. Çalışmalarında düz bir yüzeye bindirilmiş periyodik bir dalga formuna sahip doğrusal eserlerin rolünü incelemişlerdir. Amaçları, farklı hızlarda farklı mekansal

frekansları ve genlikleri ölçme yeteneklerine göre taramalı CMM'ler arasında ayrım yapmanın bir yolunu geliştirmektir.

Boeckmans vd. (2019), yaptıkları çalışmada ISO 10360-5'e göre CMM dokunsal prob performans değerlendirmesini yapmışlardır. Bu çalışmanın ilk kısmında bu konuyu ele alan standardın tüm sürümleri boyunca evrimini büyük ölçüde ayrıntılı olarak göstermişlerdir. (ISO 10360-5:2000, ISO 10360-2:2001, ISO 10360-5:2010 ve ISO/DIS 10360-5:2018). İkinci bölümde; ölçüm eseri, test düzeneği, veri toplama ve parametre belirleme açısından test prosedürü ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Üçüncü bölüm daha sonra bu doğrulama testlerinin sonuçlarını son teknoloji bir dokunsal CMM üzerinde göstermiştir ve bunları eldeki veri sayfasından toplanan MPE değerlerini kullanarak perspektife koymuştur. Sonuçlar bu CMM'nin prob sisteminin düzgün çalıştığını kanıtlamıştır, ancak çoklu stylus prob form hatası PFTE'nin hafife alındığını göstermiştir. Bu karşılaştırmayı izleyen tartışma, böyle bir ölçüm sistemiyle pratik ölçümler için alaka düzeyini ve yararlılık düzeyini göstermiştir.

Sousa (2018), yaptığı çalışmada bir CMM'in 5 eksenli ölçüm teknolojisi ile metrolojik değerlendirmesini yapmıştır. Bu çalışmada döner problar ve 5 eksenli ölçüm teknolojisinden, CMM'ler için potansiyel metrolojik avantajlarından, 5 eksenli teknolojinin metrolojik gelişiminden bahsetmiştir. Tarama döner problarının kullanımıyla yapılan 5 eksenli ölçümler, Koordinat Ölçüm Makineleri için yeni olasılıkları vurgulayarak üretkenlik ve doğruluk açısından avantajlar sunmuştur. Ek olarak, farklı prob sistemlerine sahip CMM'ler, dairesel bir özelliğin çapını ve yuvarlaklığını ölçerken hızın ölçüm belirsizliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için test edilmiştir. 5 eksenli ölçümlerde, CMM statik ve döner problama hareket halindeyken, sonuçlar çok daha yüksek tarama hızlarında belirgin şekilde daha iyi bir kararlılık göstermiştir. Sonuç olarak 5 eksenli ölçüm teknolojisi, koordinat metrolojisi için yeni olanaklar sunmakta, ancak ölçüm makineleri ve deneysel koşullar problama sistemlerinin elde edebileceği optimum performansı elde etmek için iyi ayarlanması gerektiğini belirtmiştir.

So Ito vd (2020), yaptıkları çalışmada dönen bir referans küre kullanarak CMM için bir prob ucu form hatasının ölçülmesinden bahsetmişlerdir. Bu çalışmada prob ucu bilyesi ve referans küresinin form hatalarının ölçümleri, dönen bir referans küresi

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Referans küresi Zr ekseni etrafında döndürülürken prob koordinatları belirlenmiş ve prob ucu bilyesi ve referans küresinin form hataları hesaplanmıştır. Referans küresinin hesaplanan form hatası, yuvarlaklık ölçüm makinesinin ölçümleriyle iyi bir uyum içindedir. Bu nedenle, önerilen yöntemin referans küresinin dönüşünün eksantrikliğinin etkisi olmadan form hatasını ayırabileceği doğrulanmıştır. Referans kürenin form hatası, önerilen yöntemin güvenilirliğini değerlendirmek için bir yuvarlaklık ölçüm makinesinin ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin ayrıntıları ve deneysel koşullar ilk önce açıklanmakta, ardından deneylerin sonuçları ve belirsizlik analizi sunulmuştur.

3. KOORDİNAT ÖLÇÜM MAKİNELERİ (CMM'LER)

3.1. CMM'lerin Tarihçesi

CMM tarihçesi bir çok kaynakta farklı yazılmaktadır. Koordinat Ölçüm Makinelerinin neredeyse 1960'lara dayanan bir geçmişi vardır. CMM endüstrisi her yıl 6.000'den fazla CMM üretmekte ve on binlercesini de yenilemekte ve geliştirmektedir. CMM'lerin tarihi 1959 yılında Paris'teki Uluslararası Makine Aletleri Fuarı'nda ilk kez ortaya çıkmalarıyla başlamıştır. CMM'ler, 1951 yılında genel kitleye yönelik ilk ticari bilgisayarı da geliştiren bir İngiliz şirketi olan Ferranti tarafından üretilmiştir. ABD, Japonya, Almanya ve Fransa gibi o dönemin en gelişmiş ülkelerinden birçok büyük şirket 1960'larda ticari CMM'lerin üretimine katılmış, sonrasında ise tüm ölçekteki işletmeler tarafından kullanımları hız kazanmıştır.

İlk iki eksenli ölçüm makinesinin Sheffield Corporation tarafından 1940'ların ortalarından sonlarına doğru geliştirildiği düşünülmektedir. YZ Makinesi, Oak Ridge, Tennessee'deki ulusal bir laboratuvarda Hidrojen bombalarının kabuklarını ölçmek için kullanılmıştır. Bu projenin çok gizli olması nedeniyle makine hakkında çok az bilgi edinilebilmiştir. Daha sonra 1957 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Moore Tool Company, Moore No. 3 Universal CMM Koordinat Ölçüm Makinesini tanıtmıştır. (Wenzel,2025)

3.2. CMM'lerin Kullanım Alanları

Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM), karmaşık geometrilere sahip parçaların boyutsal ve geometrik doğruluğunu yüksek hassasiyetle ölçmek amacıyla kullanılır. Üretim süreçlerinde toleransların giderek daralması ve kalite gereksinimlerinin artması, klasik ölçüm yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. CMM'ler; uzunluk, çap, açı, düzlemsellik, silindiriklik ve konum gibi geometrik özellikleri tek bir bağlamada, operatör bağımlılığını en aza indirerek ölçebilme imkânı sunar. Ayrıca ölçüm sonuçlarının sayısal olarak kaydedilmesi, istatistiksel proses kontrolüne ve geriye dönük izlenebilirliğe olanak tanır. Bu özellikleri sayesinde CMM'ler, ürün kalitesinin

güvence altına alınmasında, üretim hatalarının erken tespitinde ve uluslararası standartlara uygun ölçüm yapılmasında kritik bir rol üstlenmektedir.

CMM'ler, çap ve uzunluk ölçümü gibi çok basit ölçümlerden, serbest biçimli parçaların ölçümlerine, otomotiv motorlarının ölçümlerine, uçak pervanelerinin kanatlarındaki soğutma deliğinin konum ölçümüne, dişlilerin ölçümüne, döküm ölçümüne kadar değişik ölçümler yapabilirler. 10 m'den büyük ölçekteki büyük türbinlerin ve jet motorlarının ölçümü, türbin ölçümü gibi çok karmaşık ölçümler için de kullanılabilir. (Wahyudin,2025)

Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, gıda işleme, sağlık hizmeti, kâğıt, ilaç, plastik maddeler ve yarı iletkenler sektörlerinde çok yoğun şekilde kullanılmaktadır. CMM üretici firmalar üretimin yoğun olarak gerçekleştiği yerlerde kümelenmişlerdir. Çizelge 3.1'de (Baç, 2013) görüleceği gibi bu kümelenme genel olarak Avrupa, Doğu Asya ve Kuzey Amerika'da yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Ülkelere göre metroloji firmaları

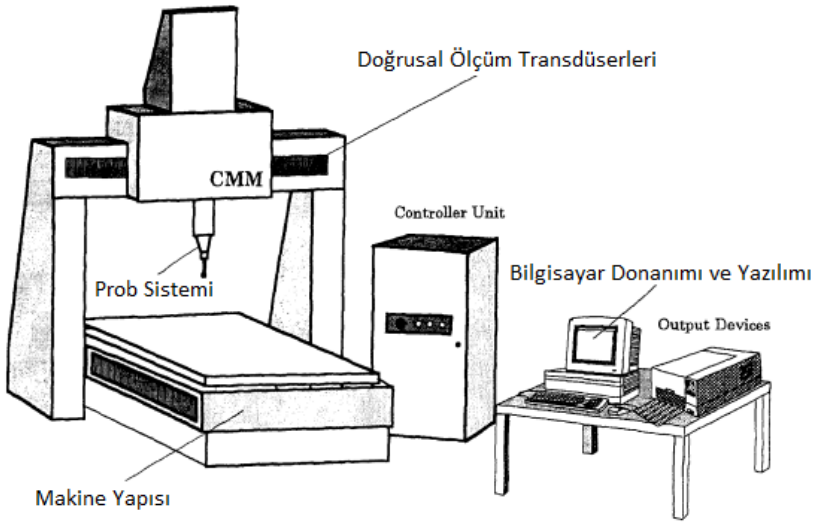
Ülke	Firma ismi
İngiltere	W&A Metrology
	Ferranti Metrology
	Status Metrology
	Eley&Warren
	LK Tool
	Notsa
	Vickers Maxicheck
	Kemco
İtalya	DEA (Digital Electronic Automation Spa)
	Poli
	Coord3
	Prima
Fransa	Renault CMM
	CMA
	Matra and Metrologic
Almanya	Zeiss CMM
	Wenzel
	Mora
	Steifflmeyer
	Leitz (Wezlar CMM)
İsviçre	SIP CMM
	Metromec
İsveç	C.E. Johanson Company
İspanya	Trimek CMM
A.B.D.	Sheffield
	Federal Products
	Brown & Sharpe
	Wilcox and Associates
	Hexagon
	Helmel
	Taurus
	Elm Systems
	Resource Engineering
	Starrett
Japonya	Mitutoyo
	Tokyo Semitsu
	Tokyo Boeki
Kore	Dukin CMM

3.3. CMM'lerin Bileşenleri

Bir CMM temel olarak CMM konfigürasyonuna, test sisteminin tipine ve otomasyon seviyesine bağlı olarak farklı şekilde geliştirilebilen dört ana fonksiyonel bileşenden oluşur. Dört ana CMM bileşeni şunlardır (Şekil 3.1):

- Makine Yapısı
- Doğrusal Ölçüm Transdüserleri
- Prob Sistemi
- Bilgisayar Donanımı ve Yazılımı

Bir CMM alıcısının mevcut ve gelecekteki uygulamalar için ihtiyaç duyulan sistem bileşenlerini dikkatli bir şekilde değerlendirmeden doğru olanı seçmesi neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, mevcut sistem bileşenleri, potansiyel CMM alıcısına her bir alt sistemin işlevine dair bir anlayış sağlayacak şekilde belirlenir. (Mantel, 1993)



Şekil 3.1. CMM Bileşenleri (Mantel, 1993)

Makine yapısını oluşturan temel bileşenler; ölçüm sırasında boyutu ve şekli korumak için gerekli sağlamlık, düzlük, karelik ve stabiliteyi sağlayan ve ayrıca zaman içinde ve değişen koşullarda dayanıklılığın korunmasına da yardımcı olan Granit'tir. (Şekil 3.2) . Granit masa (Şekil 3.3) için güvenilir bir temel sağlayan ve tablayla birlikte

stabilite, tesviye ve çarpıklık önleyici özelliklerin yanı sıra karelik kontrolü sağlayan güçlü, sert bir çelik kaynaktır.

Basit pasif titreşim kontrol elemanları içerebilen veya gerektiğinde daha karmaşık olabilen temel yapı, makinenin pnömatik sisteminin elektrik ve hidrolik dağıtımını sağlamak ve yönlendirmek için kullanılır.



Şekil 3.2. Granit (Verisurf, 2025)



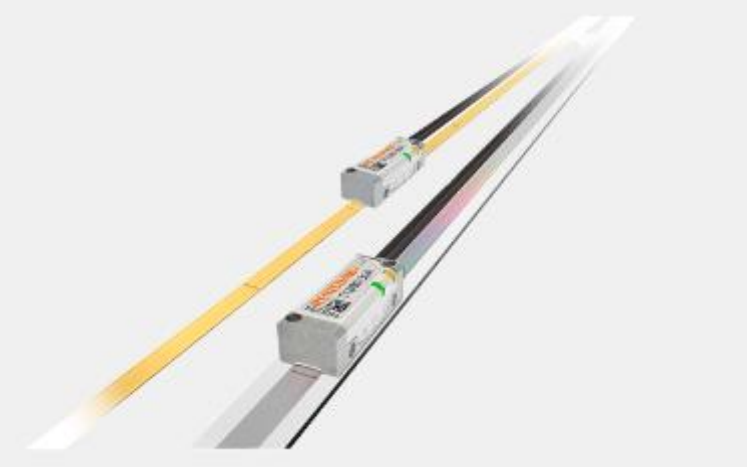
Şekil 3.3. Granit Masası (Verisurf, 2025)

Doğrusal Ölçüm Transdüserleri dikey, Z eksen kolu (Şekil 3.4), kayar yapı montajı, prob sisteminin yapıdan asılı bir şekilde masa üzerinde sabit hareket etmesini mümkün kılar. Kol, Z ekseni boyunca yukarı ve aşağı dönerken, köprü veya kol, kafanın Y ekseni boyunca yan yana hareket etmesine olanak tanır. Ayrıca, köprü veya kol, X ekseni için bir kılavuz üzerinde masanın uzunluğu boyunca hareket eder. Mevcut teknolojiler, ilgili yapısal elemanlardan (X, Y veya Z ekseni bileşenleri) birine

sabitlenmiş doğrusal bir şerit ölçeği (Şekil 3.5) ile bu ölçek üzerinde hareket eden bitişik bir yapısal parçaya sahip bir okuyucu kafasından oluşan dijital teknolojiyi kullanmaktadır. Bu sistem, hareket kontrolü ve veri kaydı için kontrol sistemine gönderilen son derece hassas bir konum algılama ve sinyal çıkışı sağlar. (Verisurf, 2025)



Şekil 3.4. CMM Z Eksen Kolu (Verisurf, 2025)



Şekil 3.5. Doğrusal Şerit Ölçeği (Verisurf, 2025)

CMM'de kullanılan prob sistemi dört sistemden biri olabilir. Analog prob (Şekil 3.6), çeşitli temas noktalarından veri toplayarak veya bir parçanın yüzeyini tarayarak işlev gösterebilir. Yüzey boyunca tarama işlemi gerçekleştirilirken, CMM terazilerinden ve probdan bilgiler elde edilir.



Şekil 3.6. Analog Prob (Verisurf, 2025)

Tetik Prob (Şekil 3.7) (Wikipedia, 2025), günümüzde yaygın olarak kullanılan prob türleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Probların seçimi, iş parçasının üzerindeki ve çevresindeki koşullara, nesnenin dokunma hassasiyetine, ölçülecek özelliklerin boyutuna, ölçüm planına ve ölçülen nokta sayısına bağlı olarak gerçekleştirilmelidir. Tetikleme probları, bir ölçüm noktası tespit ettiğinde bir tetikleme sinyali üretmektedir. Bu işlem, uzaydaki noktanın koordinatlarını belirleyerek her bir makine ekseninin ölçüm cetvellerinin bulunduğu konum verilerinin okunmasıyla sağlanır. Ölçüm uçları, birkaç milimetreye kadar dahili ölçüm aralığına sahiptir. Bir cismin noktası, probun ölçtüğü değerlerin ölçüm makinesi tarafından okunan koordinatlarla eşleştirilmesiyle belirlenir.



Şekil 3.7. Tetik Prob (Wikipedia, 2025)

Lazer problu (Şekil 3.8) (Sariki Metrology, 2025) sistemlerde ölçüm, bir lazer kaynağı kullanılarak gerçekleştirilir. Ölçüm yapılacak parçanın üzerine lazer ışını gönderilir ve bu ışının yüzeye ulaşması ile geri dönüşü arasındaki süre, lazer ışınının hızı ile çarpılarak ölçüm mesafesi hesaplanır. Koordinatlar, kol üzerindeki bir adım koordinat belirleyici aracılığıyla elde edilir. Lazerin doğrusal hareket etmesi nedeniyle, düz yüzeyler olarak tanımlanan yumuşak yüzeyler (örneğin, araç kaportaları) için oldukça uygundur. Ancak karmaşık parçalar için bu sistem uygun değildir. Bunun sebebi, lazer ışınının geri dönüşünün her zaman mümkün olmamasıdır; özellikle iç unsurları bulunan parçalar için lazerle ölçüm yapılamamaktadır. Bu sistemde veri toplama, ilerleyen lazer ışınının "kusursuz üçgen tekniği" olarak adlandırılan bir yöntemle geri dönmesi sayesinde sağlanmaktadır.



Şekil 3.8. Lazer Prob Çeşitleri (Sariki Metrology, 2025)

Kameralı ölçüm sistemlerinde (Şekil 3.9) (Status Metrology, 2025), üç ayak üzerinde yer alan ölçüm kafası, iş parçasına yaklaşık 70-100 cm mesafede konumlandırılmaktadır. Ölçüm esnasında parçanın yüzeyine kenarların izdüşümleri yansıtılarak, bu izdüşümler ölçüm kafasında bulunan bir kamera aracılığıyla kaydedilmektedir. Dijital görüntü işleme teknolojisi kullanılarak üç boyutlu koordinatlar hesaplanmaktadır.



Şekil 3.9. Kameralı Prob (Status Metrology, 2025)

3.4. CMM Çeşitleri

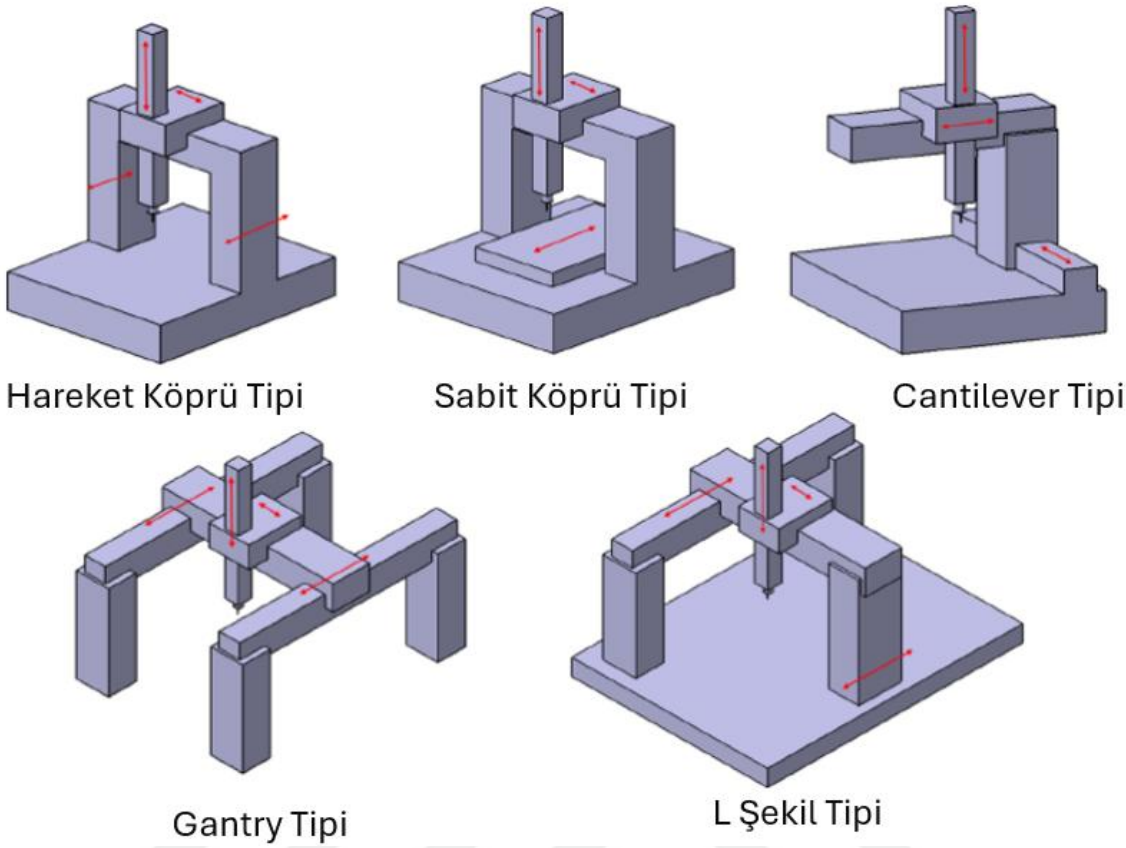
ISO 10360’a göre 10 çeşit, şekil 3.10, CMM vardır. Bunlar ; bu CMM’ler Cantilever tipi, köprü tipi, yatay kollu CMM tipi ve gantry tipi başlıklarında toplanabilir. (ISO 10360)

Cantilever tipi CMM ; Konsol tipi CMM, küçük ve orta ölçekli üretim parçaları için olağanüstü hassasiyet sağlayan benzersiz bir yapıya sahiptir. Ölçüm yüzeylerine kolayca erişilebilen benzersiz tasarımı sayesinde konsol tipi CMM, hızlı ve hassas ölçümler sunar.

Köprü tipi CMM ; Köprü tipi CMM, çok yönlülük, hız ve hassasiyetin benzersiz dengesi sayesinde koordinat ölçüm makinesi ailesinin en önemli parçasıdır. Küçük hassas parçalardan büyük üretim parçalarına kadar geniş bir parça yelpazesiyle uyumludur.

Yatay Kollu CMM ; Yatay kollu CMM, büyük ve hacimli parçaların muayenesi için uygundur. Otomotiv ve havacılık gibi geniş parçalar üreten sektörler için ideal bir CMM'dir. Yatay kollu CMM, erişilebilirlik ve güvenilir ölçüm kabiliyetlerini bir arada sunar.

Gantry tipi CMM ; Bu CMM makine tipi, en büyük ve en karmaşık parçaları işlemek üzere özel olarak tasarlandığı için ölçüm kabiliyetinin zirvesini temsil eder. Gantry CMM'nin sağlam yapısı ve hassas teknolojisi, büyük ölçekli hassasiyetin kritik önem taşıdığı havacılık ve denizcilik/gemi inşa endüstrileri için idealdir.



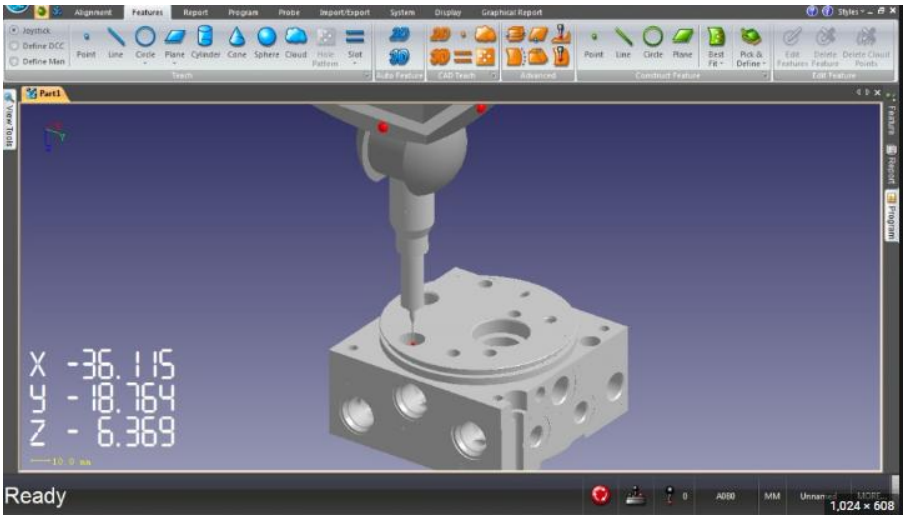
Şekil 3.10. CMM Çeşitleri (Wahyudin,2025)

3.5. CMM Yazılımları

CMM yazılımları (Şekil 3.11) (Willrich Precision Instrument, 2025), yazılım sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Ölçüm cihazlarının satın alma maliyetleri incelendiğinde, yazılım ücretlerinin önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Günümüzde CMM'ler, yazılım olmaksİzin kullanılamamaktadır. CMM üreten firmaların, yazılım ve güncellemeler için önemli kaynaklar ayırdığı dikkat çekmektedir. CMM'lerde kullanılan yazılımların yıllık lisanslama ücretleri, işletmeler için önemli maliyet unsurları arasında yer almaktadır. CMM'ler, hassas ölçümleme yeteneklerini ölçüm uçlarından ve yazılımdan elde etmektedir. Bilgisayar sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, yazılım alanında da gelişmelere olanak tanımaktadır. Yazılımlardaki ilerlemeler, ölçme belirsizliklerinin azalmasına ve daha doğru ölçüm yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Ölçüm süreçlerinin evrimini incelerken, bilgisayarların sağladığı katkıları da göz önünde bulundurmak önemlidir. İlk CMM'ler, sert bir probun merkez noktasını belirlemek için yalnızca dijital bir okuma sunuyordu. İlk bilgisayarların CMM'lere entegrasyonu, prob ofsetlerini düzeltmek ve geometrik özellikleri ayrı ayrı veri noktalarından hesaplamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu temel işlev olmadan bir CMM'in varlığını düşünmek zordur. Günümüzde prob ucu kalibrasyonu, her CMM kullanıcısı tarafından iyi bilinmekte ve otomatik olarak hesaplanabilen geometrik özellikler oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir.

Bilgisayar, ölçüm verilerini işlemek amacıyla istatistiksel uygulamalar gibi karmaşık analiz görevlerini yerine getirmektedir. Günümüzdeki üç boyutlu veri analiz süreçleri, bir CMM'in dişliler ve hava folyoları gibi karmaşık yüzeyleri etkili bir şekilde ölçmesine ve elde edilen ölçüm verilerini analiz etmesine olanak tanımaktadır. Ölçüm makinelerinin diğer fabrika sistemleriyle entegrasyonu, parça işleme sistemleri, takım tezgâhları, kalite kontrol sistemleri ve mühendislik veri tabanlarıyla bağlantı kurmak için ağ oluşturmayı kapsamaktadır. Çok sayıda uygulama durumu, ağ iletişimi ile ilişkilidir. Yazılım, donanım kadar kritik bir öneme sahip hale gelmiş olup, boyutsal metrolojideki gelecekteki gelişmeler için hâlâ büyük bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 3.11. Örnek Bir CMM Yazılımının Arayüzü (Willrich Precision Instrument, 2025)

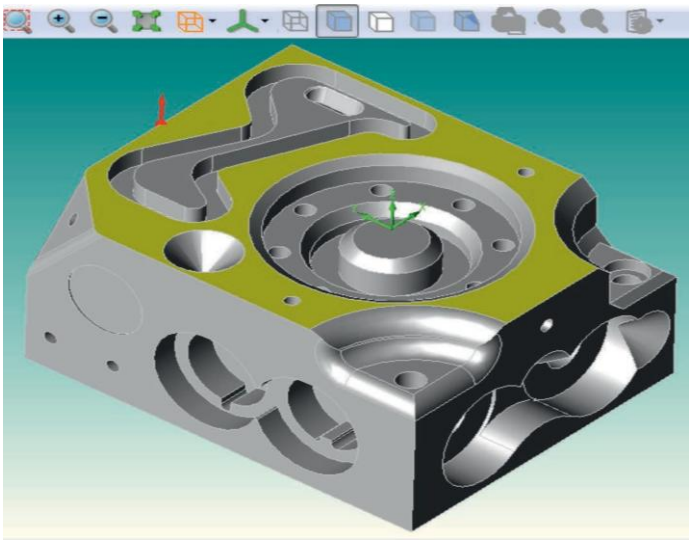
3.6. CMM'de Ölçümü Etkileyen Faktörler

CMM'de ölçümü etkileyen faktörler 5 alt kategoride değerlendirilmiştir. Bunlar, iş parçasının form dağılım tipi, genleşme katsayısı, mikroyapı, plastiklik, esneklik ve kütle olarak sınıflandırılmışlardır. Ölçüm esnasında sıcaklık, sıcaklık dağılımı, sıcaklık farkı, radyasyon, titreşim, nem ve kir gibi unsurlar, ölçüm sonuçlarını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Ölçüm cihazının eksenleri, kontrol birimi, tazikli hava, uzunluk ölçüm sistemi, prob sistemi ve değerlendirme yazılımı, ölçüm üzerinde etkili olan unsurlardandır. Operatörün eğitimi, tecrübesi, dikkati, dürüstlüğü, ölçüm planlaması ölçümü etkileyen faktörlerdendir. Ölçüm stratejisi kısmında, prob seçimi, cihazın 4. eksen kullanımı, yani rotary kullanımı, prob değişimi, parça sabitlemesi, alınan noktaların dağılımı ve ölçüm yöntemi gibi ölçüm üzerinde etkili olan faktörler ele alınmaktadır.

3.7. Örnek Bir Parça Ölçümü

Bu kısımda CMM çalışma prensibinin daha iyi anlaşılması için örnek bir parça üzerinden ölçüm yapılmıştır.

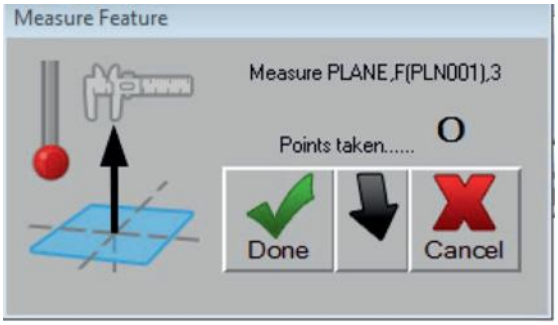
Öncelikle parça üzerinden referans yüzeyden yeterli sayıda nokta alınarak bir düzlem oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle model üzerinden ilgili referans yüzey seçilmiş (şekil 3.12) ve kaç nokta dokunulacaksa nokta sayısı girilmiştir (şekil 3.13). Yapılan çalışmada 3 nokta girildiği için programda apply denildikten sonra parça üzerinden 3 nokta dokunulması istenmiştir (şekil 3.14). Nokta alımı tamamlandıktan sonra bu yüzey Z ekseni olarak tanımlanmıştır. Böylelikle parçanın uzaydaki eğimi kaldırılmış olur.



Şekil 3.12. Ölçülen Parçanın Referans Düzlemi



Şekil 3.13. Dokunulacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz

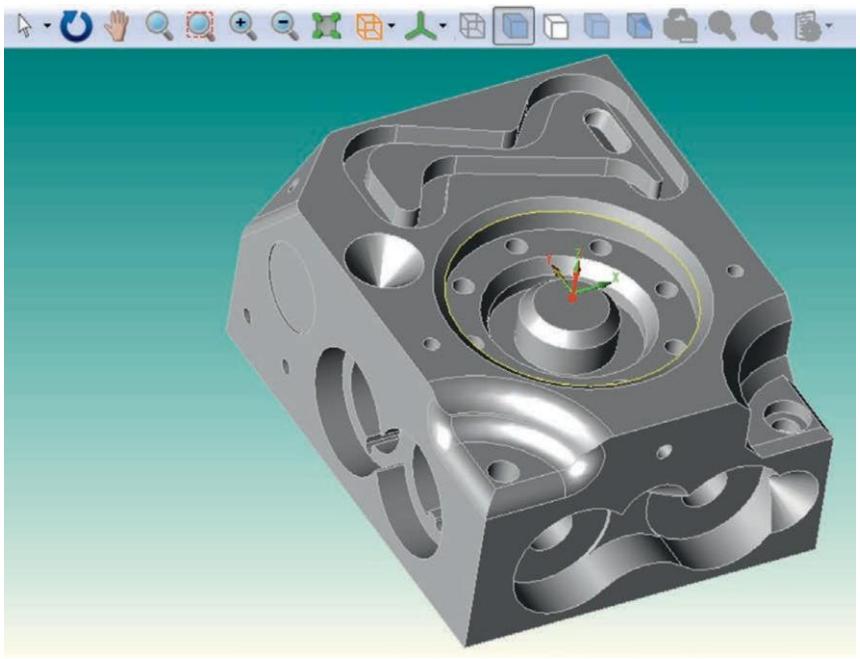


Şekil 3.14. Parça Üzerinden Alınacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz



Şekil 3.15. Ölçüm Sırasında Düzlem'den Alınan Bir Nokta

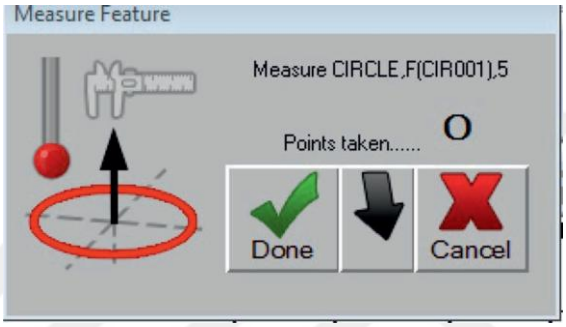
Düzlemden nokta alımı bittikten sonra parçanın X ve Y ekseninin belirlenmesi için bir çap seçilmiştir. Bunun için model üzerinden belirlenen çap seçilmiştir (şekil 3.15) . Bu çalışma için 5 nokta seçilmiştir (şekil 3.16) ve apply (şekil 3.16) denildikten sonra çap üzerinden girilen nokta sayısı kadar yani 5 nokta dokunulması istenmiştir. (şekil 3.17)



Şekil 3.16. Ölçülen Parçanın Referans Çapı



Şekil 3.17. Dokunulacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz



Şekil 3.18. Parça Üzerinden Alınacak Nokta Sayısını Gösteren Arayüz



Şekil 3.19. Ölçüm Sırasında Çap'dan Alınan Bir Nokta

Böylelikle parça üzerinden bir referans düzlem geçirilerek Z ekseni, referans bir çaptan ise X ve Y eksenleri oluşturularak parçanın alignment ı tamamlanmıştır. Sonrasında örnek bir çap ölçümü gerçekleştirilmiştir. Örnek ölçümde şekil 3.19'da gösterilen delik ölçülmüştür. 3.7. kısımda anlatılan çap ölçümü ile aynı şekilde delik çap ölçümü tamamlanmıştır. Ölçüm tamamlandıktan sonra alınan sonuç değerleri şekil 3.20'de gösterilmiştir.



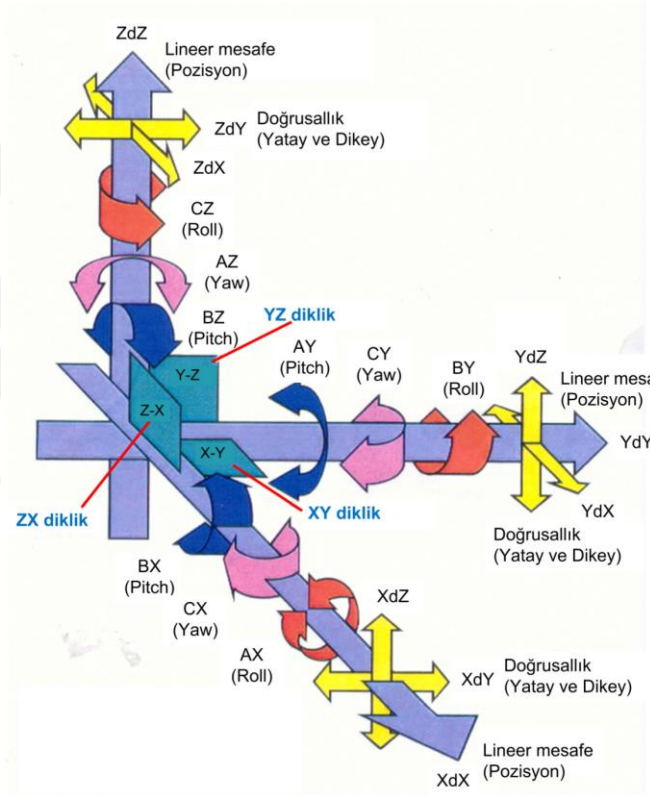
Şekil 3.20. Ölçüm Sırasında Çap'dan Alınan Bir Nokta

(in)	ACTUAL	NOMINAL	LO-TOL	HI-TOL	DEVIATION	GRAPHIC	ERROR
Circle:CIR_AC							
Diameter	10.4647	10.4640	-0.0050	+0.0050	0.0007	---*---	

Şekil 3.21. Ölçülen Deliğin Sonucu

4. MATERYAL VE YÖNTEM

CMM'ler; X, Y ve Z eksenleri dahil olmak üzere toplamda 21 farklı geometrik hata barındırmaktadır. Her bir eksen, pozisyon hatası ile birlikte, eksen boyunca yatay ve dikey doğrusalık, pitch-yaw-roll açısal hataları gibi 6 farklı hataya maruz kalmaktadır. Üç eksen (X, Y, Z) toplamda 3×6=18 hata oluştururken, bu eksenler arasındaki 3 diklik hatası ile birlikte toplam hata sayısı 18+3=21'e ulaşmaktadır (Şekil 4.1). (Teke vd., 2013)



Şekil 4.1. (X, Y, Z) Eksenlerinde 21 Adet Hatanın Gösterimi (Teke vd., 2013)

21 adet hatanın, SI birimlerine izlenebilir bir şekilde belirsizlik değerleri ile birlikte tespit edilmesi sürecine "kalibrasyon" denir. Kısaca, kalibrasyon işlemi, İngilizce "error mapping a CMM" olarak adlandırılan CMM'lerin hata haritasının oluşturulmasıdır. Genellikle, cihazın üretiminden sonra bu işlem fabrikada, çoğunlukla cihazın kurulumu esnasında gerçekleştirilmektedir. Tespit edilen hatalar, belirli bir değerin altında ise, cihazın yazılımına girilerek düzeltmeler yazılım aracılığıyla yapılmaktadır. Bu eşik değeri, üretici firmalar tarafından belirlenmektedir. Eğer hata değeri bu eşik değerinin üzerinde ise, yazılım ile düzeltme yapmak mümkün olmadığın-

dan, operatörler cihaz üzerinde bazı mekanik ayarlamalar yaparak hataları bu eşik değerinin altına indirmeye çalışmaktadırlar. Ardından, kalan hatalar yazılıma girilerek düzeltme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yazılım giriş işlemi genellikle üretici firmalar tarafından şifre ile korunmaktadır. Çoğu zaman, belirli bir ücret karşılığında temsilci firmalara şifre kullanım hakkı tanınır. Temsilci firmalar, kurulum veya onarım sırasında ya da cihazın bakımını yaparken kalibrasyon işlemini de gerçekleştirerek düzeltme değerlerini şifre ile yazılıma kaydederler.

Bugün, CMM'leri test etmek için pazardaki dünya çapındaki referans ISO 10360 standartlar serisidir. Bu standartlar, ölçümlerin endüstriyel düzeyde izlenebilirliği için temel bir genel gereklilik olarak görülmektedir. Ölçüm ekipmanının ISO 10360 serisine uygunluğunun CMM ölçümlerinin gerçek izlenebilirliği için yeterli olmadığı, sadece göreve özgü belirsizlik değerlendirmesi ile sağlandığı da iyi anlaşılmaktadır. Çizelge 4.1'de, CMM'ler için geçerli olan ISO 10360 serisi standartlarını detaylandırmaktadır. (Savio, 2007)

Çizelge 4.1. ISO 10360 Serisi

STANDART	KULLANIM ALANI
ISO 10360-1	Terimlerin açıklanması
ISO 10360-2	Lineer ölçümler için kullanılan CMM'ler
ISO 10360-3	Döner tablanın 4. eksen olarak kullanıldığı CMM'ler
ISO 10360-4	Tarama modunda kullanılan CMM'ler
ISO 10360-5	Çoklu prob ucu olan CMM'ler
ISO 10360-7	Görüntüleme problu CMM'ler
ISO 10360-8	Optik mesafe sensörlü CMM'ler

ISO 10360 serisi standartlara uygun olarak gerçekleştirilen kabul testleri, CMM'lerin üretici veya kullanıcı tarafından belirlenen performans değerlerine uygunluğunu kontrol etmektedir. ISO 10360-2 standardının 2001 yılındaki versiyonundan itibaren (2009 yılında yayımlanan son versiyonu da dahil) yapılan işlemlerde, belirsizlik değerinin hesaplanması ve kabul kriterlerinde dikkate alınması gerekmektedir. Kabul işlemleri, ISO 14253-1: 1998 standardında belirtildiği üzere belirsizlik değerini göz önünde bulundurarak gerçekleştirilmektedir. Kısacası, CMM için belirlenen kabul

kriterinden belirsizlik değeri çıkarılmalı ve elde edilen yeni değere göre test sonuçları kontrol edilmelidir.

4.1. ISO 10360-1 Terimlerin Açıklanması

ISO 10360-1'deki tanımlar, ISO 10360 serisinin sonraki sayfalarında yer alan yöntemlerin tanımlanmasında temel bir rol oynamaktadır. Bu tanımlar, kesin spesifikasyonlar için gereklidir ve veri sayfalarında, kullanım kılavuzlarında ve kullanıcı arayüzlerinde tutarlı bir terminoloji sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. ISO 10360'a göre, her bir doğruluk belirtimi, İzin verilen maksimum hata (MPE) veya İzin verilen maksimum sınır (MPL) olarak tanımlanmaktadır. Belirli bir ölçüm görevinin sonuçlarında bu değerlerin aşılmaması gerekmektedir. (ISO 10360 Overview)

ISO 10360 standartları serisi, CMM üreticisinin belirlediği İzin verilen maksimum uzunluk ölçüm hatasına uygunluğu belirlemek için gerekli kabul, geri dönüş testleri ve ara kontrollerin ayrıntılarını sunmaktadır. Ancak, bu testler dahi, CMM ile ilgili belirsizliklerin karmaşık bir şekilde bir araya gelmesi nedeniyle makinenin uzunluk ölçüm yeteneği hakkında kesin bir değerlendirme yapmak mümkün değildir. Bu nedenle, sınırlı bir ölçüm örneğinden elde edilen uzunluk ölçüm belirsizliği, CMM'nin gerçekleştirebileceği ölçüm görevlerini değil, tüm potansiyel uzunluk ölçüm görevlerini temsil ettiği kabul edilemez. (Flack, 2001)

4.2. Doğrusal Boyutları Ölçmek İçin Kullanılan CMM'ler

Bu bölümde, üretici tarafından tanımlanan doğrusal boyutların ölçümü için kullanılan bir CMM'in performansını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilen kabul testlerini açıklanmıştır. Ayrıca, kullanıcının CMM performansını düzenli aralıklarla doğrulamasına imkan tanıyan yeniden doğrulama testlerini de içermektedir. Bu bölümde belirtilen kabul ve yeniden doğrulama testleri, yalnızca ayrık nokta problama modunda çalışan her türlü temaslı problama sistemine sahip Kartezyen CMM'ler için geçerlidir. (ISO 10360-2, 2009)

ISO 10360'ın bu kısmı aşağıdaki durumlar için geçerli değildir:

− Kartezyen olmayan CMM'ler
− Optik problama kullanan CMM'ler

4.2.1. Terimler ve tanımlar

- L **:** Stylus ucu ile referans noktası arasındaki mesafe

- CTE (coefficient of thermal expansion), termal genleşme katsayısı, bir malzemenin 20 °C'de doğrusal termal genleşme katsayısıdır.

- Normal CTE malzemesi, CTE'si 8 × 10−6/°C ile 13 × 10−6/°C arasında olan malzemedir.

- Uzunluk ölçüm hatası, EL (length measurement error), CMM kullanarak kalibre edilmiş bir test uzunluğunu ölçerken gösterge hatasıdır.

- Uzunluk ölçüm hatasının tekrarlanabilirlik aralığı, R0, CMM tarafından ölçülen üç tekrarlı uzunluk ölçüm hatasının aralığıdır. (en büyük eksi en küçük)

- EL, MPE (maximum permissible error of length measurement) muhtemelen CMS'ler için en yaygın performans göstergesidir. Bu özellikle ram ekseni prob ucu ofsetinin 0'a eşit olduğu E0; MPE formu için geçerlidir. Beş uzunluk ölçüm standardının ölçümüne dayanan genel bir sistem testidir. Standartlar ölçüm hacmi içinde farklı konumlarda (yönlendirmeler ve konumlar) bile ölçülür. Her ölçüm üç kez tekrarlanır, bu nedenle 105 ölçüm gerçekleştirilir. Kalibre edilmiş ve ölçülmüş uzunluklar arasındaki mutlak fark E0, E0;MPE'yi aşmamalıdır. (Petro, 2021)

- Tekrarlanabilirlik aralığının İzin verilen maksimum sınırı, R0, MPL (maximum permissible limit of the repeatability range) spesifikasyon-

ların İzin verdiği uzunluk ölçüm hatası, tekrarlanabilirlik aralığının en uç değeridir.

- Çift ramlı (dikey sütun) CMM, her iki ramden alınan koordinat ölçümlerini tek bir koordinat sisteminde raporlamaya yönelik bir yöntemden oluşan CMM'dir.

- Simpleks çalışma modu, iki ramin ayrı ölçüm sistemleri olarak ele alındığı çift ramli bir CMM kullanma yöntemidir.

4.2.2. Çevresel ve metrolojik gereklilikler

Ölçümleri etkileyen kurulum yerindeki sıcaklık, hava nemi ve titreşim gibi çevresel koşullara ilişkin İzin verilen sınırlar üretici ya da kullanıcı tarafından belirlenmelidir.

Her iki durumda da kullanıcı, ISO 10360-2 testinin belirtilen sınırlar içinde gerçekleştirileceği çevresel koşulları seçme hakkına sahiptir. Kullanıcı, üretici tarafından veri sayfasında tanımlandığı üzere CMM'i çevreleyen ortamın sağlanmasından sorumludur.

İmalatçının el kitabında uyulması gereken belirli alanlar örneğin şunlardır:

a) makine başlatma/ısınma döngüleri,
b) stylus yapılandırması,
c) prob ucu için temizleme prosedürleri,
d) problama sistemi kalifikasyonu,
e) kalibrasyondan önce problama sisteminin termal kararlılığı,
f) prob ucu sisteminin ve/veya problama sisteminin ağırlığı,
g) termal sensörlerin yeri, tipi ve sayısı.

Uzunluk ölçüm hataları (EL değerleri), üretici ya da kullanıcı tarafından belirtilen durumlarda İzin verilen maksimum uzunluk ölçüm hatası olan EL, MPE'yi aşmamalıdır ve mikrometre birimi ile ifade edilmektedir.

Uzunluk ölçüm hatalarının tekrarlanabilirlik aralığı (R0 değerleri), üretici ya da kullanıcı tarafından belirtilen tekrarlanabilirlik aralığının (R0, MPL) kabul edilebilir maksimum sınırını aşmamalıdır ve mikrometre birimi ile ifade edilmektedir.

4.2.3. Kabul testleri ve doğrulama testleri

CMM'nin ölçüm hacminde yedi farklı konum (konumlar ve yönler) için beş adet kalibre edilmiş test uzunluğu yerleştirilmelidir. Her bir uzunluk, toplamda 105 ölçüm elde etmek amacıyla üç kez ölçülmelidir. Yedi pozisyondan dördü, Çizelge 4.2'de belirtildiği üzere uzay köşegenleri olarak tanımlanmıştır. Kullanıcı, geri kalan üç pozisyonu kendisi belirleyebilir; varsayılan konumlar ise Şekil 4.2'de gösterildiği gibi CMM eksenlerinin her birine paralel konumlandırılmıştır. Ek olarak, 150 mm Ram Ekseni Stylus Ucu Ofseti İle Uzunluk Ölçüm Hatası, E150 için de ölçümler yapılmıştır.

Çizelge 4.2. CMM'de Ölçüm Konumları

Pozisyon Numarası	Ölçüm Hacmindeki Yönelim	Gerekli veya Varsayılan
1	Uzayda (1, 0, 0) noktasından (0, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
2	Uzayda (1, 1, 0) noktasından (0, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
3	Uzayda (0, 1, 0) noktasından (1, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
4	Uzayda (0, 0, 0) noktasından (1, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
5	(0, 1/2, 1/2) noktasından (1, 1/2, 1/2) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
6	(1/2, 0, 1/2) noktasından (1, 1, 1/2) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
7	(1/2, 1/2, 0) noktasından (1/2, 1/2, 1) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
NOT : Bu çizelgedeki spesifikasyonlar için, ölçüm hacminin karşılıklı köşelerinin aşağıdaki gibi olduğu varsayılır (X, Y, Z) koordinatlarında (0, 0, 0) ve (1, 1, 1).		


1 Numaralı Pozisyon


2 Numaralı Pozisyon


3 Numaralı Pozisyon


4 Numaralı Pozisyon


X Numaralı Pozisyon


Y Numaralı Pozisyon


Z Numaralı Pozisyon

Şekil 4.2. CMM'de Kalibrasyon Ölçüm Pozisyonları

Prob sisteminin, üreticinin standart prosedürlerine uygun bir şekilde kurulması ve kalifiye edilmesi gerekmektedir. Tüm prob sistemi kalifikasyonları, üretici tarafından temin edilen referans küre kullanılarak gerçekleştirilmelidir; bu süreçte herhangi bir test artefaktı veya diğer artefaktlardan faydalanılmamalıdır. Kalibre edilmiş test uzunluğunu ölçmek için ram ekseni prob ucu ofsetinin sıfır olması şarttır.

Kalibre edilmiş beş test uzunluğu için her birinde üç ölçüm sonucu alınır. Toplamda 105 ölçüm sonucu elde etmek amacıyla, kalibre edilmiş test uzunlukları için yedi ölçüm pozisyonunun her birinde bu işlemi tekrarlanır.

Çizelge 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.12 ve 4.13'de , tarafımdan yürütülen kalibrasyon çalışması kapsamında, ISO 10360-2:2009 standardına uygun olarak gerçekleştirilen uzunluk ölçümü testlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Bu kalibrasyon işlemi, söz konusu Koordinat Ölçüm Makinesi'nin (CMM) ölçüm doğruluğunu değerlendirmek, sistematik hataları tespit etmek ve cihazın izlenebilirliğini sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Ölçümler, Renishaw firmasına ait REVO 5 eksenli tarama kafası entegre edilmiş, köprü tipi bir CMM cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu prob sistemi, özellikle yüksek çözünürlükte yüzey taramaları ve karmaşık geometrilerin temassız hassas ölçümleri açısından avantaj sağlamaktadır. Ölçüm süreci boyunca çevresel koşullar, standardın gerektirdiği şekilde kontrol altında tutulmuş ve ortam sıcaklığı ISO 10360-1 referans sıcaklığı olan $20 \pm 0{,}5$ °C sınırları içerisinde sabitlenmiştir. Ölçümlerde kalibre edilmiş sertifikalı çelik referans bloklar (step gauge) ve küresel kalibrasyon artefaktları kullanılmış olup, kullanılan ekipmanların izlenebilirliği ulusal metroloji enstitülerince sağlanmıştır. Bu kapsamda yapılan analizlerde CMM'in MPE (Maximum Permissible Error) sınırları dahilinde çalıştığı ve sistemin ISO 10360-2 standardına uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir

Çizelge 4.3. Wenzel LH108 Teknik Bilgi Broşürü

Device type		**LH 108**									
Accuracies *											
		Premium-Select		Premium			Standard				
		SP25M	SP80 REVO	SP25M	SP80 REVO	TP200	SP25M	SP80 REVO	TP200	PH20	TP20
Measuring room conditions		19 °C … 21 °C		18 °C … 22 °C							
Single stylus probing error[1] $P_{FTU,MPE}$	[µm]	1.0	1.2	1.2	1.4	1.5	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9
Repeatability range[2] $R_{0,MPL}$	[µm]	0.8	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.4	1.4	1.5
Length measurement error[2] $E_{0,MPE}$ / $E_{150,MPE}$	[µm]	1.0+L/450	1.2+L/450	1.2+L/400	1.4+L/400	1.5+L/400	1.4+L/350	1.5+L/350	1.7+L/350	1.8+L/350	1.9+L/350
Scanning probing error[3] MPE_{THP}	[µm]	1.3	1.5	1.5	1.7	-	1.7	1.8	-	-	-
Scanning test duration $MPT_{\tau NP}$	[s]	72	72	72	72	-	72	72	-	-	-
Extended temperature range		17 °C … 26 °C									
Single stylus probing error[1] $P_{FTU,MPE}$	[µm]	-	-	1.8	2.0	2.1	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5
Repeatability range[2] $R_{0,MPL}$	[µm]	-	-	1.4	1.6	1.7	1.6	1.7	1.9	1.9	2.0
Length measurement error[2] $E_{0,MPE}$ / $E_{150,MPE}$	[µm]	-	-	1.8+L/200	2.0+L/200	2.1+L/200	2.0+L/200	2.1+L/200	2.3+L/200	2.4+L/200	2.5+L/200
Scanning probing error[3] MPE_{THP}	[µm]	-	-	2.1	2.3	2.4	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8
Scanning test duration $MPT_{\tau NP}$	[s]	-	-	72	72	-	72	72	-	-	-
Measuring system											
Resolution	[µm]	0.02		0.1			0.1				

Çizelge 4.4. 1. Eksen Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel (mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
1	20.0158	20.0159	0.10	1.56	0.09	1.47	0.200
	20.0158	20.0161	0.30	1.56	0.09	1.47	
	20.0158	20.0159	0.10	1.56	0.09	1.47	
	219.829	219.829	0.60	2.13	0.15	1.98	0.100
	219.829	219.829	0.50	2.13	0.15	1.98	
	219.829	219.829	0.60	2.13	0.15	1.98	
	499.824	499.822	2.00	2.93	0.23	2.70	0.200
	499.824	499.822	2.20	2.93	0.23	2.70	
	499.824	499.822	2.20	2.93	0.23	2.70	
	739.832	739.829	3.00	3.61	0.30	3.31	0.100
	739.832	739.829	3.00	3.61	0.30	3.31	
	739.832	739.829	3.10	3.61	0.30	3.31	
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	0.300
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	
	819.834	819.831	3.20	3.84	0.33	3.52	

Çizelge 4.5. 2. Eksen Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
2	20.0158	20.0159	0.10	1.56	0.09	1.47	0.300
	20.0158	20.0162	0.40	1.56	0.09	1.47	
	20.0158	20.0162	0.40	1.56	0.09	1.47	
	219.829	219.829	0.20	2.13	0.15	1.98	0.200
	219.829	219.829	0.00	2.13	0.15	1.98	
	219.829	219.829	0.00	2.13	0.15	1.98	
	499.824	499.822	2.10	2.93	0.23	2.70	0.100
	499.824	499.822	2.10	2.93	0.23	2.70	
	499.824	499.822	2.00	2.93	0.23	2.70	
	739.832	739.830	2.20	3.61	0.30	3.31	0.100
	739.832	739.830	2.20	3.61	0.30	3.31	
	739.832	739.829	2.30	3.61	0.30	3.31	
	819.834	819.831	2.90	3.84	0.33	3.52	0.300
	819.834	819.831	2.80	3.84	0.33	3.52	
	819.834	819.831	3.10	3.84	0.33	3.52	

Çizelge 4.6. 3. Eksen Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
3	20.0158	20.0158	0.00	1.56	0.09	1.47	0.100
	20.0158	20.0157	0.10	1.56	0.09	1.47	
	20.0158	20.0157	0.10	1.56	0.09	1.47	
	219.829	219.830	0.80	2.13	0.15	1.98	0.300
	219.829	219.830	0.70	2.13	0.15	1.98	
	219.829	219.830	0.50	2.13	0.15	1.98	
	499.824	499.823	0.40	2.93	0.23	2.70	0.200
	499.824	499.823	0.40	2.93	0.23	2.70	
	499.824	499.823	0.60	2.93	0.23	2.70	
	739.832	739.829	2.40	3.61	0.30	3.31	0.200
	739.832	739.829	2.60	3.61	0.30	3.31	
	739.832	739.829	2.60	3.61	0.30	3.31	
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	0.000
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	

Çizelge 4.7.4. Eksen Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel (mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
4	20.0158	20.0166	0.80	1.56	0.09	1.47	0.100
	20.0158	20.0165	0.70	1.56	0.09	1.47	
	20.0158	20.0166	0.80	1.56	0.09	1.47	
	219.829	219.830	0.90	2.13	0.15	1.98	0.100
	219.829	219.830	0.80	2.13	0.15	1.98	
	219.829	219.830	0.90	2.13	0.15	1.98	
	499.824	499.822	2.30	2.93	0.23	2.70	0.200
	499.824	499.821	2.50	2.93	0.23	2.70	
	499.824	499.821	2.40	2.93	0.23	2.70	
	739.832	739.828	3.30	3.61	0.30	3.31	0.000
	739.832	739.828	3.30	3.61	0.30	3.31	
	739.832	739.828	3.30	3.61	0.30	3.31	
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	0.100
	819.834	819.830	3.50	3.84	0.33	3.52	
	819.834	819.830	3.40	3.84	0.33	3.52	

Çizelge 4.8. X Ekseni Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
X	20.0158	20.0170	1.20	2.06	0.09	1.97	0.200
	20.0158	20.0171	1.30	2.06	0.09	1.97	
	20.0158	20.0172	1.40	2.06	0.09	1.97	
	219.829	219.829	0.10	2.63	0.15	2.48	0.200
	219.829	219.830	0.30	2.63	0.15	2.48	
	219.829	219.830	0.20	2.63	0.15	2.48	
	499.824	499.822	2.00	3.43	0.23	3.20	1.100
	499.824	499.821	3.10	3.43	0.23	3.20	
	499.824	499.821	3.00	3.43	0.23	3.20	
	739.832	739.829	2.50	4.11	0.30	3.81	0.700
	739.832	739.829	3.00	4.11	0.30	3.81	
	739.832	739.829	3.20	4.11	0.30	3.81	
	939.845	939.841	4.00	4.69	0.36	4.32	0.100
	939.845	939.841	4.10	4.69	0.36	4.32	
	939.845	939.841	4.00	4.69	0.36	4.32	

Çizelge 4.9. Y Ekseni Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
Y	20.0158	20.0166	0.80	2.06	0.09	1.97	0.100
	20.0158	20.0166	0.80	2.06	0.09	1.97	
	20.0158	20.0165	0.70	2.06	0.09	1.97	
	219.829	219.831	1.20	2.63	0.15	2.48	0.100
	219.829	219.831	1.30	2.63	0.15	2.48	
	219.829	219.831	1.20	2.63	0.15	2.48	
	499.824	499.825	1.20	3.43	0.23	3.20	0.200
	499.824	499.825	1.10	3.43	0.23	3.20	
	499.824	499.825	1.00	3.43	0.23	3.20	
	739.832	739.834	2.00	4.11	0.30	3.81	0.200
	739.832	739.834	2.00	4.11	0.30	3.81	
	739.832	739.834	1.80	4.11	0.30	3.81	
	939.845	939.848	2.40	4.69	0.36	4.32	0.200
	939.845	939.848	2.40	4.69	0.36	4.32	
	939.845	939.848	2.20	4.69	0.36	4.32	

Çizelge 4.10. Z Ekseni Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
Z	20.0158	20.0161	0.30	2.06	0.09	1.97	0.100
	20.0158	20.0162	0.40	2.06	0.09	1.97	
	20.0158	20.0162	0.40	2.06	0.09	1.97	
	99.7765	99.7765	0.00	2.29	0.11	2.18	0.200
	99.7765	99.7766	0.10	2.29	0.11	2.18	
	99.7765	99.7767	0.20	2.29	0.11	2.18	
	299.822	299.821	0.90	2.86	0.17	2.69	0.200
	299.822	299.821	0.90	2.86	0.17	2.69	
	299.822	299.822	0.70	2.86	0.17	2.69	
	499.824	499.823	0.40	3.43	0.23	3.20	0.200
	499.824	499.824	0.20	3.43	0.23	3.20	
	499.824	499.824	0.20	3.43	0.23	3.20	
	659.835	659.835	0.40	3.89	0.28	3.61	0.300
	659.835	659.835	0.70	3.89	0.28	3.61	
	659.835	659.835	0.70	3.89	0.28	3.61	

Sonuç olarak, uzunluk hatası (µm) değerleri yukarıdaki çizelgelerde yer alan uygunluk limitinden küçük olduğu için CMM tezgahın kalibrasyonu uygundur. Bu bahsedilen uygunluk limiti değeri tezgah teknik data kısmında yazılı MPE (maximum permissible error) değerlerinden belirsizlik değeri çıkarılması ile bulumuştur. Belirsizlik değeri kalibrasyon ölçümünde kullanılan kalibrasyon mastarının sertifikasında yer alan formul ile bulunmaktadır.

Tekrarlanan üç ölçümden oluşan her bir set için, tekrarlanan üç uzunluk ölçümünün aralığını değerlendirerek tekrarlanabilirlik aralığını, R0, hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlere göre tüm tekrarlanabilirlik değeri Çizelge 4.3'te (Mega Danışmanlık,2025) belirtilen 1.2µm değerinden küçüktür. Bu yüzden CMM tezgahının tekrarlanabilirliği uygundur.

150 mm Ram Ekseni Stylus Ucu Ofseti İle Uzunluk Ölçüm Hatası, E150, prob sisteminin kurulumu ve nitelendirilmesi, üreticinin standart prosedürlerine uygun bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Tüm prob sistemi kalifikasyonları, imalatçının sağladığı referans küre kullanılarak yapılmalı, herhangi bir test parçası veya diğer malzemeler kullanılmamalıdır. Ram ekseni prob ofseti için varsayılan değer 150 mm, yani E150

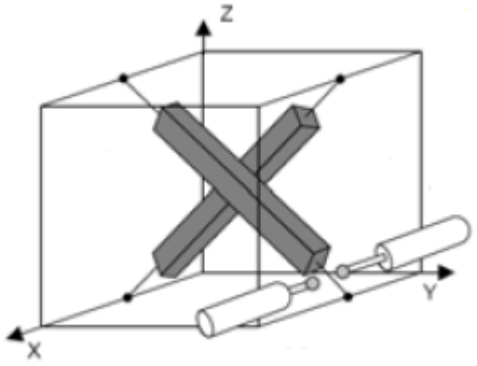
olarak belirlenmiştir. Ram ekseni prob ofsetinin yönü, kalibre edilmiş test uzunluğu tarafından tanımlanan ölçüm çizgisine dik bir şekilde yönlendirilerek, bir CMM ekseni yönü boyunca ayarlanmalıdır.

Her bir ölçüm için, kullanıcı ram ekseni prob ofsetinin yönünü pozitif ya da negatif eksen yönünde belirleyebilir. Bu nedenle, test uzunluğu konumları ve prob yönleri arasında sekiz farklı kombinasyondan, kullanıcı dilediği iki tanesini seçme imkanına sahiptir. Aksi bir durum söz konusu değilse, kalibre edilmiş test uzunluğu konumları ve prob yönlerinin toplamda sekiz olası kombinasyonundan yalnızca iki tanesi test edilmelidir. Kullanıcı, sunulan dört konumdan bir veya iki kalibre edilmiş test uzunluğu konumunu seçebilir.

Çizelge 4.11. Ölçüm Pozisyonları, E150

Pozisyon Numarası	Ölçüm Hacmindeki Yönelim
1A	YZ düzlemi boyunca (1/2, 0, 0) noktasından (1/2, 1, 1) noktasına köşegen
1B	YZ düzlemi boyunca (1/2, 0, 1) noktasından (1/2, 1, 0) noktasına köşegen
2A	XZ düzlemi boyunca (0, 1/2, 0) noktasından (1, 1/2, 1) noktasına köşegen
2B	XZ düzlemi boyunca (0, 1/2, 1) noktasından (1, 1/2, 0) noktasına köşegen
NOT Bu çizelgedeki spesifikasyonlar için, ölçüm hacminin karşılıklı köşelerinin aşağıdaki gibi olduğu varsayılır (X, Y, Z) koordinatlarında (0, 0, 0) ve (1, 1, 1).	

Test uzunluğu konumu ve prob yöneliminin her bir kombinasyonu için, beş farklı kalibre edilmiş test uzunluğunun her biri üç kez ölçülmüştür. Dolayısıyla seçilen iki kombinasyon için toplam 30 ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.3. E150 test prosedürü için dört olası kalibre edilmiş test uzunluğu konumundan ikisini ve olası prob yöneliminden ikisini gösteren örnek (Mitutoyo, 2025)

Bu kısım için yapılan çalışmada prob yönelimleri şekil 4.5'deki gibi yerleştirilmiştir.

	
2A Numaralı Pozisyon	2B Numaralı Pozisyon

Şekil 4.4. CMM'de Kalibrasyon Ölçüm Pozisyonları

Çizelge 4.12. 2A Ekseni Sonuçları

Pozisyon	**Nominal (mm)**	**Aktuel(mm)**	**Uzunluk Hatası (µm)**	**MPE (µm)**	**Belirsizlik U(µm)**	**Uygunluk Limiti (µm)**	**Tekrarlanabilirlik R0 (µm)**
2A	20.0158	20.0168	1.00	1.6	0.09	1.47	0.500
	20.0158	20.0168	1.00	1.6	0.09	1.47	
	20.0158	20.0163	0.50	1.6	0.09	1.47	
	219.829	219.830	0.40	2.1	0.15	1.98	0.000
	219.829	219.830	0.40	2.1	0.15	1.98	
	219.829	219.830	0.40	2.1	0.15	1.98	
	499.824	499.822	2.00	2.9	0.23	2.70	0.600
	499.824	499.822	2.10	2.9	0.23	2.70	
	499.824	499.821	2.60	2.9	0.23	2.70	
	739.832	739.829	3.00	3.6	0.30	3.31	0.200
	739.832	739.829	3.10	3.6	0.30	3.31	
	739.832	739.829	3.20	3.6	0.30	3.31	
	899.856	899.852	3.50	4.1	0.35	3.72	0.000
	899.856	899.852	3.50	4.1	0.35	3.72	
	899.856	899.852	3.50	4.1	0.35	3.72	

Çizelge 4.13. 1B Ekseni Sonuçları

Pozisyon	Nominal (mm)	Aktuel(mm)	Uzunluk Hatası (µm)	MPE (µm)	Belirsizlik U(µm)	Uygunluk Limiti (µm)	Tekrarlanabilirlik R0 (µm)
1B	20.0158	20.0157	0.10	1.6	0.09	1.47	0.100
	20.0158	20.0159	0.10	1.6	0.09	1.47	
	20.0158	20.0160	0.20	1.6	0.09	1.47	
	219.829	219.831	1.60	2.1	0.15	1.98	0.200
	219.829	219.831	1.80	2.1	0.15	1.98	
	219.829	219.831	1.80	2.1	0.15	1.98	
	499.824	499.825	1.60	2.9	0.23	2.70	0.500
	499.824	499.826	2.00	2.9	0.23	2.70	
	499.824	499.826	2.10	2.9	0.23	2.70	
	739.832	739.833	1.00	3.6	0.30	3.31	0.600
	739.832	739.833	1.40	3.6	0.30	3.31	
	739.832	739.833	1.60	3.6	0.30	3.31	
	899.856	899.856	0.30	4.1	0.35	3.72	0.400
	899.856	899.856	0.10	4.1	0.35	3.72	
	899.856	899.856	0.50	4.1	0.35	3.72	

Sonuç olarak, uzunluk hatası (µm) değerleri yukarıdaki çizelgelerde yer alan uygunluk limitinden küçük olduğu için CMM tezgahın kalibrasyonu uygundur. Bu bahsedilen uygunluk limiti değeri tezgah teknik data kısmında yazılı MPE değerlerinden belirsizlik değeri çıkarılması ile bulunmuştur.

4.2.3'de ölçümü yapılan CMM tezgahının tekrarlanabilirlik, R0 değerleri çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Yapılan ölçümlere göre tüm tekrarlanabilirlik değeri çizelge 4.4'de belirtilen 1.2 µm değerinden küçüktür. Bu yüzden CMM tezgahının tekrarlanabilirliği uygundur.

4.2.3'de yapılan kalibrasyon ölçümünde uzunluk hatası değerleri ya da tekrarlanabilirlik değerlerinden bir tanesi Çizelge 4.3'de yer alan değere göre limit dışında gelmiş olsaydı kalibrasyon ölçümü uygun olmayacaktı. Kalibrasyon ölçümü uygun olmayacağı için ilgili CMM parça ölçümü için kullanılamayacaktı. Bu CMM tezgahının tekrar kalibrasyon ölçümünün değerler içinde olması için ilgili CMM'in sağlayacısı/satıcı tarafından incelenip gerekli bakımlar/kontroller yapılması sonrasında tekrar kalibrasyon ölçümlerinin yapılması gerekmektedir.

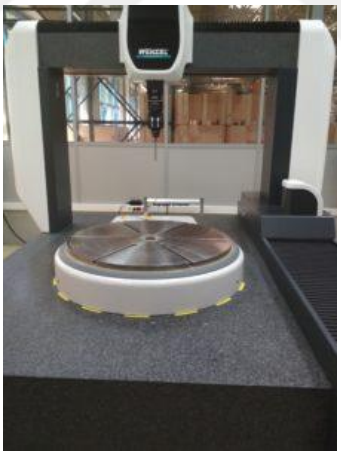
4.3. Döner Tabla Eksenini Dördüncü Eksen Olarak Kullanan CMM'ler

Bu kısımda, dört eksenli CMM'in üretici tarafından belirtilen performans standartlarına uygunluğunu doğrulayan kabul testini tanımlanmıştır. Ayrıca, kullanıcının dört eksenli bir CMM'in performansını düzenli aralıklarla yeniden doğrulamasını mümkün kılan yeniden doğrulama testini de içermektedir.

Bir CMM'in dördüncü ekseni olarak kullanılan döner tabla, dişliler, vidalı kompresör rotorları vb. gibi dönme simetrisine sahip parçaların muayenesi için değerli bir araçtır. Döner tabla, kullanıcının ihtiyaçlarına bağlı olarak CMM tablasına entegre edilebilir veya gerektiğinde bağımsız donanım olarak eklenebilir.

Bu bölümünde tanımlanan kabul testi ve yeniden doğrulama testi, yalnızca iş parçası koordinatlarını ölçmek amacıyla üç eksenli ve iş parçasını yönlendirmek için şekil 4.5'de (Rotary Precision Instrument,2025) gösterilen döner bir tabla içeren dört eksenli makineler için geçerlidir.

ŞİRKET HASSAS



Şekil 4.5. Döner tabla içeren CMM (Rotary Precision Instrument,2025)

4.3.1. Metrolojik özellikler için gereklilikler

FR, FT ve FA ile belirtilen dört eksen hataları, ISO 10360-1 standardında tanımlanan gösterge hatalarıdır. Bu hatalar, ISO 10360-1'de belirtilen ve kullanıcı ve imalatçı tarafından İzin verilen en büyük hata değerleri olan MPEFR, MPEFT ve MPE-

FA (maximum permissible error FR,FT,FA) değerlerini aşmamalıdır ve mikrometre birimi ile ifade edilmektedir.

FR, radyal döner tabla hatası; FT, teğetsel döner tabla hatası ve FA ise eksenel döner tabla hatasını göstermektedir. Ölçme işlemlerini etkileyebilecek çevresel koşullar, cihazın yerleşim yerindeki sıcaklık, nem ve titreşim gibi İzin verilen sınır değerleri imalatçı ya da kullanıcı tarafından belirlenmelidir. Kullanıcı, her iki durumda da belirtilen sınır değerler çerçevesinde şartları seçme konusunda serbesttir.

İzin verilen en büyük hatalar (MPEFR, MPEFT, MPEFA), CMM üzerinde döner tablanın herhangi bir kabul edilebilir yükü, yerleşimi ve yönelimi ile, döner tabla üzerindeki kontrol kürelerinin belirlenen sınırlar içinde herhangi bir yerleşimi için geçerlidir.

Kabul deneyi ve yeniden doğrulama süreçleri gerçekleştirilirken, CMM üreticisinin işletme el kitabında belirtilen prosedürler doğrultusunda CMM'nin çalıştırılması gerekmektedir. Bu el kitabında dikkat edilmesi gereken belirli alanlar, örneğin;
a) Makinanın devreye alınması / ısıtma çevrimleri,
b) Stylus sistemi konfigürasyonu,
c) Stylus ucunun ve referans kürenin temizleme işlemleri,
d) Prob sisteminin nitelendirilmesi,
e) Döner tablanın yerleştirilmesi ve nitelendirilmesi şeklinde olabilir. (ISO 10360-3,2000)

4.3.2. Kabul ölçümleri ve doğrulama ölçümleri

Değerlendirme yönteminin temel prensibi, CMM'in belirlenen İzin verilen en büyük hatalar (MPEFR, MPEFT, MPEFA) çerçevesinde ölçüm yapıp yapmadığını, döner tabla üzerine yerleştirilen iki kalibrasyon küresinin (şekil 4.6) (In process Control, 2025) merkezlerinin ölçülen koordinat değişimlerinin tespit edilmesiyle belirlemektir. Kusursuz dört eksenli CMM'de, tabla dönerken kontrol kürelerinin ölçülen merkezlerinin konumu, iş parçası koordinat sisteminde sabit kalmaktadır.

Her bir kontrol küresinin merkezi, radyal, teğetsel ve eksenel doğrultularda belirlenmektedir. Kontrol kürelerinin merkez konumları, döner tabla üzerindeki iş parçası koordinat sistemi içerisinde gösterilmektedir.

Döner tabla üzerine yerleştirilen her bir kontrol küresinin merkezi, döner tabla üzerinde farklı açısal konumlarda gerçekleştirilen bir dizi ölçümle tespit edilmektedir. Her bir kontrol küresi için gösterge hataları (FR, FT, FA), üç doğrultunun her biri için en yüksek ve en düşük ölçüm sonuçları arasındaki aralık olarak ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Bu hesaplamalar;

− İmalâtçnn özellikleri ve prosedürlerine uygun şekilde yaplan kabul deneylerinde,

− Kullancnn özellikleri ve imalatçının prosedürlerine uygun şekilde yaplan, yeniden doğrulama deneylerinde yaplır.

Sertifkalı olan ve çapları 10 mm'den küçük ile 30 mm'den büyük olmayan bu ölçümlerde kullanılan iki kontrol küresinin çapları, yalnızca merkezlerinin üç veya dört eksen hatasını belirlemede kullanıldığından kalibrasyona ihtiyaç duymaz. Kontrol kürelerinin formları ise, form sapmalarının deney sonuçlarını etkilemesi nedeniyle kalibre edilmelidir. Bu sapmalar, ilgili şartlara uygunluğun kanıtlanması veya uygunsuzluğun tespit edilmesinde dikkate alınmalıdır.

Özellikle döner tabla ekseni yatay konumda olduğunda, bükülmeden kaynaklanan hatalardan kaçınmak amacıyla kontrol kürelerinin montajı yeterince sağlam olmalıdır.



Şekil 4.6. Kalibrasyon Küresi (In process Control, 2025)

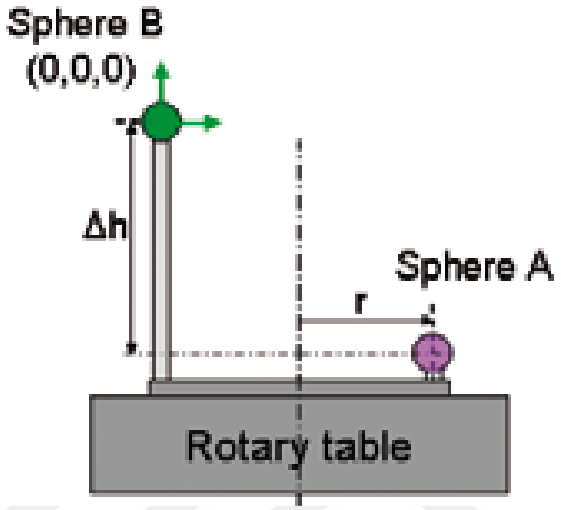
Kontrol küresi A, döner tabla üzerinde mümkün olduğunca döner tabla yüzeyine yakın olarak Şekil 4.7'e uygun şekilde, r yarıçapında yerleştirilir. Kontrol küresi B ise, kontrol küresi A'nın çap üzerindeki simetrik konumunda yaklaşık olarak aynı yarıçap r'de ve Δh yüksekliğine yerleştirilir. (Şekil 4.7)

Aşağıda belirtilen şartlara uygun şekilde döner tabla üzerinde iş parçası kartezyen koordinat sistemi belirlenir:

a) Kontrol küresi B'nin merkezi (tabla yüzeyinden en uzak), orijini belirler.
b) Eksenel doğrultuyu belirleyen birincil eksen döner tabla eksenine paralel olmalıdır.
c) Radyal doğrultuyu belirleyen ikincil eksen, kontrol küresi A'nın merkezini ve birincil ekseni ihtiva eden düzlemde yer almalıdır.

İlk olarak, iş parçasının koordinat sistemi tanımlanır ve ölçüm, kontrol küresi B'nin orijinal konumunda (konum O) ölçüm yapılarak başlatılır. Kullanıcı, döner tablanın sıfırıncı konumu için sıfırdan farklı bir açısal konum seçebilir. Ardından, döner tabla, 7 farklı açısal konumdan oluşan bir dizi halinde döndürülür ve kontrol küresi A'nın konumu her bir açısal konumda ölçülür. 7 ölçüm işleminin, başlangıç

konumundan itibaren en az 720°'ye ulaşacak şekilde gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Sonrasında, döner tabla, 7 açısal konuma göre ters yönde döndürülür ve kontrol küresi A, her bir konumda tekrar ölçülür. Döner tabla başlangıç konumuna geri döndüğünde, her iki kontrol küresinde 14 ölçüm yapılmış olmalıdır. Kontrol küresi B, her konumda ölçülür. Döner tabla ilk konumuna geri döndüğünde, her iki kontrol küresi için 28 konum ölçülmüş olmalıdır (Çizelge 4.16).



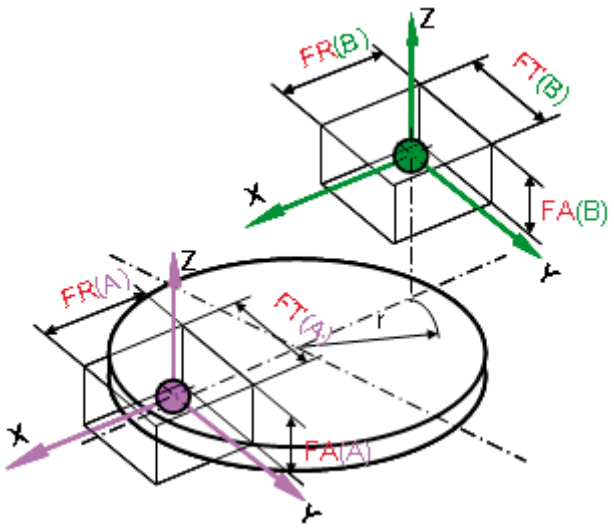
Şekil 4.7. Kabul ölçümü ve yeniden doğrulama ölçümü için döner tabla üzerindeki kontrol kürelerinin konumları (Hexagon, 2025)

Şekil 4.7'da r, döner tabla üzerinde, B kontrol küresinin yörüngesinin yarıçapıdır. hB, döner tablanın iş parçasını tutturma yüzeyinden, B kontrol küresi merkezine olan yüksekliktir. Kontrol küresi A'nın konumu, şekilde sadelik nedeniyle gösterilmemiştir

X, Y, Z işaretleri döner tablaya göre yönleri göstermek için kullanılmış olup makine eksen işaretlemesinin gösterilmesi gerekmez. 0. konumdan 28. konuma kadar ölçümler kullanılarak (kontrol küresi A için koordinatlar XA, YA, ZA, şeklinde, kontrol küresi B için ise koordinatlar XB, YB, ZB şeklinde gösterilmiştir), her iki kontrol küresi merkezinin radyal, teğetsel ve eksenel koordinatlarının her birinin, tepeden tepeye değişimi şeklinde eksen hataları (FR, FT, FA) hesaplanmaktadır. (Şekil 4.8.)

Radyal dört eksen hatası FRA ve FRB'nin hesaplanmasında kullanılan, A ve B kontrol kürelerinin merkezlerinin radyal bileşenleri, XA ve XB'dir. Teğetsel dört eksen hatası FTA ve FTB'nin hesaplanmasında kullanılan, A ve B kontrol kürelerinin

merkezlerinin teğetsel bileşenleri, YA ve YB'dir. Eksenel dört eksen hatası FAA ve FAB'nın hesaplanmasında kullanılan, A ve B kontrol kürelerinin merkezlerinin eksenel bileşenleri, sırasıyla ZA ve ZB'dir.



Şekil 4.8. Dördüncü eksen olarak döner tabla eksenli CMM için, kabul ölçümü ve yeniden doğrulama ölçümüne ilişkin olarak, üç - dört eksen hatalarınca (FRB, FTB, FAB) oluşturulan hacmin şematik gösterimi (Hexagon, 2025)

.

Çizelge 4.14. Döner Tabla Kontrolü İçin Başlangıç Açıları ve Alınan Ölçümler Sonrası Hesaplanan Değerler

Konum No	Açısal konum derece	Kontrol küresi A için ölçülen koordinatlar			Kontrol küresi B için ölçülen koordinatlar		
	W2	XA	YA	ZA	XB	YB	ZB
0	0	XA0	YA0=0	ZA0	XB0=0	YB0=0	ZB0=0
1	135	-0.0001	0.0001	-0.0002			
2	225	-0.0017	0.0026	-0.0002			
3	315	-0.0032	-0.0002	0.0007			
4	405	-0.0002	0.0014	0.0006			
5	540	0.0007	-0.0017	-0.0002			
6	630	-0.0007	-0.0033	-0.0001			
7	810	-0.0038	0.0012	0.0003			
8	630	-0.004	-0.0021	0.0004			
9	540	0	-0.0026	-0.0004			
10	405	0.0005	-0.0008	-0.0001			
11	315	-0.0027	0.0012	-0.0002			
12	225	-0.0034	-0.0005	-0.0002			
13	135	-0.0013	-0.0023	-0.0007			
14	0	-0.0003	-0.0003	-0.0017	-0.0004	-0.0008	-0.0001
15	-135				-0.0034	-0.0013	-0.0004
16	-225				-0.0002	-0.0001	-0.0001
17	-315				-0.0013	-0.0016	0.0005
18	-405				0	-0.0001	-0.0008
19	-540				-0.0014	-0.0005	-0.0007
20	-630				-0.0011	-0.0024	-0.0001
21	-810				-0.0032	-0.0025	-0.0013
22	-630				-0.0009	-0.0021	-0.0003
23	-540				-0.0011	-0.0012	-0.0014
24	-405				0.0001	-0.002	-0.0012
25	-315				-0.0009	-0.0012	-0.0007
26	-225				-0.0012	-0.0015	-0.0017
27	-135				-0.0023	-0.0016	-0.0014
28	0				0.0006	-0.0021	-0.0012
Eksen hataları		FRA	FTA	FAA	FRB	FTB	FAB

FRA: 0.0047, FTA: 0.0058, FAA: 0.0024, FRB: 0.0040, FTB: 0.0024 ve FAB: 0.0022 olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada, koordinat ölçüm makinesinin (CMM) prob sistemine ait performans değerlendirmesi, ISO 10360-3 standardı doğrultusunda tarafımca gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 20 ± 2 °C sıcaklık kontrollü bir laboratuvar ortamında, izlenebilir kalibrasyon sertifikasına sahip referans küre kullanılarak yürütülmüştür. Probun küre yüzeyine farklı yönlerden yaptığı çoklu temaslar sonucu elde edilen verilerle, makinenin üç ana eksenindeki geometrik hatalar da incelenmiş FRA (Eksen Doğrusallık Hatası), FTA (Eksen Düzlemsellik Hatası) ve FAA (Eksen Açısal Hatası) hassasiyeti değerlendirilmiştir. Tüm bu ölçüm sonuçları, ISO 10360-3 standardında tanımlanan maksimum İzin verilebilir hata sınırları (MPE) dahilinde değerlendirilmiş ve sistemin prob hassasiyeti ile eksenel geometrik uygunluğu tarafımca doğrulanmıştır. 4.3'te yapılan ve sonuçları Çizelge 4.16'da gösterilen ölçüm sonuçlarının uygulunluğu kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bu çalışma için FRA, FTA, FAA, FRB, FTB, FAB değerlerinin limiti 0.0099 µm dir. Hesaplanan değerler 0.0099 µm değerinin altında olduğu için ilgili CMM'in kalibrasyon değeri uygundur.

Bu çalışma kapsamında elde edilen ölçüm sonuçları, belirlenen kalibrasyon limit değerlerinin altında kalmış ve sistemin ISO 10360-3 standardına uygun çalıştığını göstermiştir. Ancak ölçüm sonuçlarının ilgili tolerans değerlerini aşması durumunda, kalibrasyonun geçersiz kabul edileceği ve CMM cihazının metrolojik açıdan güvenilirliğini kaybedeceği açıktır. Bu tür bir durumda, cihazın ölçüm amacıyla kullanılmasına devam edilmesi mümkün olmayacak, sistemin doğruluğunun yeniden sağlanabilmesi için üretici firma veya yetkili servis tarafından teknik müdahale gerekecektir. Gerekli bakım, hizalama ve sistem ayarlarının yapılmasının ardından, CMM üzerinde yeniden kalibrasyon testleri gerçekleştirilerek ölçüm performansı tekrar standarda göre doğrulanmalıdır.

4.3.3. Uygulamalar

Tedarikçi ile müşteri arasında satın alma sözleşmesi, bakım sözleşmesi, onarım sözleşmesi, yenileştirme sözleşmesi, model iyileştirme sözleşmesi gibi sözleşmelerin varlığı durumunda kalibrasyon ölçümü yapılabilir.

Eğer tedarikçi ve müşteri arasında bir mutabakat sağlanırsa, belirlenen en yüksek kabul edilebilir hata değerleri MPEFR, MPEFT ve MPEFA'ya (maximum permissible

error FR,FT,FA) uygun olarak bu standartta tanımlanan kabul testleri, dördüncü eksen olarak döner tabla eksenli CMM'in performansını doğrulamak amacıyla kullanılabilir. Tedarikçi herhangi bir kısıtlama getirmediği takdirde, belirtilen üç ayrı en yüksek kabul edilebilir hata değeri MPEFR, MPEFT ve MPEFA, CMM'deki döner tablanın her türlü yükü, yerleşimi ve yönelimi için geçerli olmalıdır.

Bir kuruluşun iç kalite güvence sisteminde, bu standartta belirtilen yeniden doğrulama testi, kullanıcı tarafından tanımlanan en yüksek kabul edilebilir hatalar olan MPEFR, MPEFT ve MPEFA ile uyumlu olarak ve uygulanan olası detaylı sınırlamalarla birlikte, dördüncü eksen olarak döner tabla eksenli CMM'in performansını doğrulamak amacıyla deney olarak kullanılabilir.

4.3.4. Döner Tabla'nın Avantajları

CMM ölçümlerinde rotary table, özellikle karmaşık geometrilerin kontrolünde ölçüm sürecini belirgin şekilde kolaylaştıran bir ekipman olarak kabul edilmektedir. Uygulama pratiğinde, probun zorlayıcı açılarla erişmekte zorlandığı yüzeylerin ölçümü, parçanın döndürülerek en uygun pozisyona getirilmesiyle çok daha güvenli ve hızlı hale gelmektedir. Özellikle silindirik yapıya sahip parçalar, dişliler, çok yüzeyli gövdeler ve farklı yönelimlerde delik içeren bileşenlerde rotary table kullanımı, ölçüm güvenilirliğini ve erişimini artırmasıyla öne çıkar.

Rotary table'ın sağladığı en önemli katkılardan biri, parçanın tek bağlama ile tüm kritik yüzeylerinin ölçülmesine imkân tanımasıdır. Tek bağlama prensibi sayesinde tekrar bağlamadan kaynaklanan hizalama ve konumlandırma hataları ortadan kalkar; böylece ölçüm sonuçları daha tutarlı, tekrarlanabilir ve stabil hale gelir. Ayrıca rotary table ile uyumlu çalışan ölçüm yazılımları, parçanın otomatik olarak uygun açılara döndürülmesini sağlayarak prob çarpma riskini azaltır ve ölçüm yolunu optimize eder.

Ancak rotary table her uygulama için gerekli değildir. Geometrisi basit olan veya probun tüm yüzeylere doğrudan erişebildiği parçalarda rotary kullanımının ölçüme belirgin bir katkısı bulunmayabilir. Aynı şekilde, yüksek kütleli parçalar rotary table kapasitesini aşabileceğinden bu tür uygulamalarda döner eksen kullanımı uygun değildir. Buna rağmen karmaşık ve çok açılı parçalarda rotary table, ölçüm sürecinin hızını,

doğruluğunu ve güvenliğini artıran en etkili yardımcı eksen çözümlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Döner tabla entegreli Koordinat Ölçüm Makinelerinde parça, farklı açısal konumlar için yeniden sökülüp bağlanmaksızın ölçülebilmektedir. Bu sayede ölçüm sırasında yalnızca tablanın kontrollü dönmesi yeterli olmaktadır. Örneğin, eksensel simetriye sahip bir parçanın 8 farklı açısal konumdan ölçülmesi gerektiğinde, klasik bir CMM'de her konum için yaklaşık 2–3 dakikalık yeniden bağlama ve alignment süresi gerekmekte olup toplam ölçüm süresi 16–24 dakika seviyelerine çıkabilmektedir. Döner tabla kullanılan bir CMM'de ise her bir 45°'lik dönüş yaklaşık 3–5 saniyede tamamlanmakta ve toplam ölçüm süresi 30–40 saniye seviyesine inmektedir. Bu durum ölçüm süresinde yaklaşık %90 oranında bir azalma sağlamaktadır.

Klasik CMM ölçümlerinde parçanın her yeniden konumlandırılmasında alignment işleminin tekrarlanması gerekmekte, bu durum ölçüm belirsizliğini artırmaktadır. Manuel yeniden bağlama işlemlerinde alignment belirsizliği tipik olarak ±5–10 µm mertebesindedir. Döner tabla kullanılan sistemlerde ise parça yalnızca bir kez hizalanmakta ve ölçüm süresince sabit kalmaktadır. Bu sayede alignment kaynaklı belirsizlik ±1–2 µm seviyelerine düşmekte, özellikle konum ve salınım toleranslarının değerlendirilmesinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Döner tabla kullanılan ölçüm sistemlerinde ölçüm süreci büyük ölçüde otomatikleşmekte ve operatör müdahalesi minimuma indirilmektedir. Bu sayede ölçüm tekrarlanabilirliği önemli ölçüde artmaktadır. Yapılan karşılaştırmalarda, manuel konumlandırma ile gerçekleştirilen ölçümlerde tekrarlanabilirlik değeri (3σ) ±4–5 µm seviyelerinde iken, döner tabla ile otomatik ölçümlerde bu değer ±1–2 µm seviyelerine inmektedir. Bu iyileşme, özellikle seri üretimde süreç yeterliliği göstergeleri olan Cp ve Cpk değerlerinin yükselmesine katkı sağlamaktadır.

4.4. Tarama Ölçüm Modunda Kullanılan CMM'ler

Bu kısımda, taramalı ölçme modunda kullanılan CMM'nin üreticisi tarafından belirtilen performansa uygunluğunu doğrulayan bir kabul testi anlatılmıştır. Ayrıca,

taramalı ölçme modunda kullanılan CMM'nin performansının düzenli olarak yeniden doğrulanmasına olanak tanıyan bir yeniden doğrulama testini de kapsamaktadır.

Sürekli temas tarama özelliklerine sahip koordinat ölçüm makineleri (CMM'ler) giderek daha fazla sayıda satılmaktadır. Tarama CMM'lerini birbirleriyle veya ayrık nokta CMM'leriyle karşılaştırmak için standart bir test yöntemi kullanmaktır. Mevcut ISO 10360-4 standardı kalibre edilmiş bir küre üzerindeki dairesel taramaları tanımlamaktadır.

Daha yüksek üretkenlik ve zaman verimliliğinin yanı sıra, zaman ve doğruluk açısından ödün vermeden yüksek yoğunlukta nokta elde etme yeteneği, boyutsal ve geometrik toleransların kontrolü için daha iyi ölçüm stratejilerine yol açabilir. Daha fazla nokta ile geometrilerin daha iyi bir matematiksel yeniden yapılandırılması sağlanabilir, bu da ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini artırır ve ölçülen parçanın daha iyi bir geometrik analİzini sağlar. (Sousa, 2018)

4.4.1. Metrolojik özellikler için gereklilikler

Taramalı prob değme hatası THP (Scanning Probing Error) ve Tarama Kontrol Süresi τ (saniye), imalatçı ve kullanıcı taraflarca beyan edilen İzin verilen en yüksek taramalı prob değme hatasını MPETHP'yi (Volumetric scanning probing error) geçmemelidir ve mikrometre cinsinden ifade edilmektedir.

Yerleşim alanında, ölçümleri etkileyen sıcaklık koşulları, atmosferik nem ve titreşim gibi en yüksek çevresel şartlar için uyulması gereken sınır değerler imalatçı ve kullanıcı taraflarca belirlenir. Kullanıcı, her iki durumda da belirtilen sınır değerler aralığında şartları seçme konusunda serbesttir.

Taramalı ölçme modunda kullanılan CMM'ler için kontrol işlemlerinde, çapı 3 mm olan küresel uçlu prob tercih edilmektedir. Beyan edilen MPETHP değerlerinin uygulanacağı ve prob sistem konfigürasyonunun uyacağı diğer sınır değerler imalatçı ve kullanıcı taraflarca belirlenir. Kullanıcı, her iki durumda da belirtilen sınırlar içinde, prob sisteminin bileşenlerinin düzenlenmesi konusunda serbest bir seçim yapma

hakkına sahiptir. Probun biçim sapması, ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Şartlara uygunluk veya uygunsuzluk kanıtlanırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Kalibrasyon işlemi gerçekleştirilirken, CMM, imalatçının işletme el kitabında belirtilen prosedürler doğrultusunda çalıştırılmalıdır. Bu el kitabında dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar şunlardır:

a) Makinanın devreye alınması ve ısıtma döngüleri,
b) Prob sistemi yapılandırması,
c) Prob ucu ile referans küresinin temizlik işlemleri,
d) Prob sisteminin değerlendirilmesi.

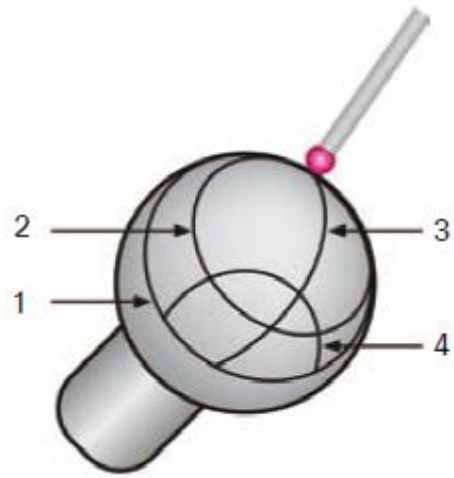
4.4.2. Kabul ölçümleri ve doğrulama ölçümleri

Taramalı prob değme hataları (THP), ölçülen merkez ile değerlendirilen tüm tarama noktaları arasındaki yarıçaplar aralığı olarak hesaplanmaktadır. Yani, en büyük ve en küçük ölçüm sonuçları arasındaki mutlak fark olarak değerlendirilmesi gerekir.

Kontrol küresi; çapı 25 mm, yüzey pürüzlülüğü Ra 0,05 µm'den büyük olmayan ve sertlik değeri ise 800 HV'den az olmayan özelliklere sahip çelikten üretilmiştir. Kontrol küresinin çapı ve şekli, deney sonuçlarını etkileyebileceğinden, kalibrasyon işlemi yapılmalı ve şartlara uygunluk sağlandığında veya sağlanamadığı durumlarda bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kontrol küresi, prob sisteminin nitelendirilmesinde kullanılan referans küresinden farklı olmalı ve referans küresinin dışında, kullanıcının tercihine göre başka bir yere yerleştirilmelidir.

Kontrol küresi ve düzenek, ölçüm işlemlerini veya deney sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir kalıntı bırakmayacak şekilde titizlikle temizlenmelidir. Bükülmeden kaynaklanan hataların en aza indirilmesi amacıyla kontrol küresi sağlam bir şekilde sabitlenmelidir. Kullanıcı, belirlenen sınırlar içinde kontrol küresinin konumunu ve yönelimini seçme konusunda serbesttir.

Tanımlanan dört hedef tarama düzleminde **(**Şekil 4.9**)**, kontrol küresinin yüzeyindeki düzeltilmiş tarama hataları için kontrol küresi üzerinde tarama noktaları belirlenir ve ölçümler kaydedilir.



Şekil 4.9. Kontrol küresi üzerinde dört hedef tarama düzlemi (Hexagon, 2025)

1: Hedef tarama düzlemi 1
2: Hedef tarama düzlemi 2
3: Hedef tarama düzlemi 3
4: Hedef tarama düzlemi 4

Dört tarama dizisinin her birine; prob, kontrol küresinden en az 10 mm uzaktaki bir ara noktada iken başlanmalıdır. Bu başlangıç noktasından itibaren prob; belirlenmiş bir hızda, yüzeyin normali doğrultusunda küreye yaklaşmalıdır. Dört tarama dizisinin her birine, prob yine kontrol küresinden en az 10 mm uzaktaki bir ara noktada iken son verilmelidir. İlk tarama dizisinin başlangıcındaki ara noktadan, dördüncü tarama dizisinin sonundaki ara noktaya kadar geçen tarama kontrol süresi τ, kaydedilmektedir.

Dört düzeltilmiş tarama hattından elde edilen tüm tarama noktaları kullanılarak, Gauss küresinin merkezi (en küçük kareler toplamı yöntemiyle) hesaplanmaktadır. Ölçülen her bir tarama noktası için radyal uzaklık R hesaplanmaktadır. Taramalı değme ucu için değme hatası, THP; hesaplanan radyal uzaklıklar aralığı olarak R belirlenmektedir. Her bir hesaplanan radyal uzaklık R ile kalibre küresinin belgelenmiş çap değerinin yarısı arasındaki en büyük mutlak fark hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar

sonucunda form hatası olan MPETHP ve ölçüm süresi bulunur. Bulunan bu değerler Çizelge 4.4'te yer alan isterlere göre değerlendirilir.

Çizelge 4.15'de, Çizelge 4.3'te bilgileri verilen CMM'in tarafımdan yürütülen kalibrasyon çalışması kapsamında, ISO 10360-4 standardına uygun olarak gerçekleştirilen sürekli tarama (scanning) ölçümlerine ait sonuçlar ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bu kalibrasyon süreci, REVO 5 eksenli prob sistemi entegre edilmiş köprü tipi bir Koordinat Ölçüm Makinesi'nin (CMM) tarama performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. ISO 10360-4 kapsamında yapılan ölçümlerde özellikle MPETHP (maximum premissible scanning probing error) ve MPTT (maximum permissible time) parametreleri elde edilmiştir.

Yapılan ölçümlerde elde edilen maksimum form sapması değeri 1,2 µm, maksimum radyal sapma ise -0,45 µm olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, sistemin yüksek çözünürlüklü yüzey tarama yeteneğini ve geometrik formları doğru şekilde izleyebildiğini göstermektedir. Uygulanan tarama döngüsünün toplam süresi (cycle time) ise 67 saniye olarak ölçülmüş olup, sistemin hem hassasiyet hem de işlem süresi açısından üretim ortamlarında kullanılabilir düzeyde performans gösterdiği belirlenmiştir. Ölçüm işlemleri boyunca çevresel koşullar standarda uygun şekilde sabit tutulmuş; ortam sıcaklığı ISO 1 referans değeri olan 20 ± 0,5 °C sınırları içinde stabilize edilmiştir.

Kalibrasyonda kullanılan referans küre ve tarama standardı, ulusal metroloji enstitülerine izlenebilirliği sağlanmış, sertifikalı artefaktlar arasından seçilmiştir. Tüm ölçüm verileri üzerinde genleşme katsayısı düzeltmeleri uygulanmıştır. Sonuçlar, ilgili CMM sisteminin ISO 10360-4 standardında belirtilen maksimum İzin verilebilir hata (MPE) sınırları içerisinde çalıştığını doğrulamaktadır. (ISO 10360-4,2000)

Çizelge 4.15. ISO 10360-4 Ölçüm Sonuçları

		MPETHP (µm)	MPTT (s)
A	Tolerance Value	1.8	72
	Measured Value	1.1	65
B	Tolerance Value	1.8	72
	Measured Value	1.1	66
C	Tolerance Value	1.8	72
	Measured Value	1.2	65
D	Tolerance Value	1.8	72
	Measured Value	1.1	67

Bu çalışma kapsamında elde edilen ölçüm sonuçları, belirlenen kalibrasyon limit değerlerinin altında kalmış ve sistemin ISO 10360-4 standardına uygun çalıştığını göstermiştir. Ancak ölçüm sonuçlarının ilgili tolerans değerlerini aşması durumunda, kalibrasyonun geçersiz kabul edileceği ve CMM cihazının metrolojik açıdan güvenilirliğini kaybedeceği açıktır. Bu tür bir durumda, cihazın ölçüm amacıyla kullanılmasına devam edilmesi mümkün olmayacak, sistemin doğruluğunun yeniden sağlanabilmesi için üretici firma veya yetkili servis tarafından teknik müdahale gerekecektir. Gerekli bakım, hizalama ve sistem ayarlarının yapılmasının ardından, CMM üzerinde yeniden kalibrasyon testleri gerçekleştirilerek ölçüm performansı tekrar standarda göre doğrulanmalıdır.

4.4.3. Uygulamalar

Bir tedarikçi ve müşteri arasında satın alma sözleşmesi, bakım sözleşmesi, onarım sözleşmesi, yenileştirme sözleşmesi ve model iyileştirme sözleşmesi gibi bir sözleşme yapılması durumunda; kabul testi, tarama ölçüm modunda kullanılan bir CMM'nin tedarikçi ve müşteri tarafından kararlaştırıldığı şekilde belirtilen İzin verilen maksimum tarama prob hatalarına uygun olarak performansını doğrulamak için bir test olarak kullanılabilir.

Herhangi bir kuruluşun iç kalite güvence sistemi kapsamında, ISO 10360-3 standardında tanımlanan yeniden doğrulama testi, kullanıcı tarafından belirlenmiş olası özel kısıtlamalarla birlikte, taramalı ölçüm modunda çalışan koordinat ölçüm makinesinin (CMM) performansını değerlendirmek amacıyla deneysel olarak uygulanabilir. Bu kapsamda gerçekleştirilen testler, CMM'in ilgili taramalı ölçüm

modundaki performansının, kullanıcının belirlediği en yüksek kabul edilebilir taramalı prob değme hatası (MPETHP) sınırları içinde kalıp kalmadığını doğrulamaya yönelik olarak yürütülmektedir.

4.4.4. Tarama Ölçümünün Avantajları

CMM'lerde tarama yöntemi, nokta bazlı ölçüm yöntemine kıyasla yüzeylerin ve geometrik elemanların daha yoğun veriyle temsil edilmesini sağlayan bir ölçüm stratejisidir. Tarama sırasında prob, belirlenen yol boyunca sürekli temas hâlinde ilerleyerek yüzeyden ardışık veri toplar. Bu yaklaşım, özellikle süreklilik gösteren yüzeylerde, eğrisel profillerde ve geometrik form sapmalarının değerlendirilmesinde daha yüksek doğruluk ve ayrıntı düzeyi sunar.

Tarama yönteminin temel avantajı, yüzey formunu çok daha iyi tanımlayan yüksek yoğunluklu nokta bulutları üretmesidir. Bu sayede dairesellik, silindiriklik, düzlemsellik, profil toleransı gibi form toleranslarının değerlendirilmesinde daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Noktasal ölçümde yalnızca belirli bölgelerden alınan sınırlı veri ile yapılan değerlendirme, yüzeyin tamamını temsil etmeyebilir; taramada ise yüzeyin gerçek formu çok daha kapsamlı şekilde algılanır ve ölçüm belirsizliği azalır.

Tarama yapabilen Koordinat Ölçüm Makinelerinde ölçüm, yüzey boyunca sürekli veri toplama prensibine dayanmaktadır. Bu sayede klasik nokta-nokta (touch-trigger) ölçüm yöntemine kıyasla çok daha kısa sürede yüksek yoğunlukta ölçüm verisi elde edilmektedir. Örneğin, serbest formlu bir yüzeyin 200 nokta ile ölçülmesi gereken bir durumda, nokta-nokta ölçüm yöntemiyle toplam ölçüm süresi yaklaşık 8–10 dakika sürerken, aynı yüzey tarama probu kullanılarak 5–10 mm/s tarama hızı ile 1–2 dakika içerisinde ölçülebilmektedir. Bu durum ölçüm süresinde yaklaşık %70–80 oranında bir azalma sağlamaktadır.

Tarama yönteminde ölçüm verileri yüzey boyunca sürekli ve homojen bir şekilde toplandığından, yüzeyin gerçek geometrisi daha doğru temsil edilmektedir. Nokta-nokta ölçümde sınırlı sayıda nokta ile yapılan ölçümlerde, ölçülmeyen bölgelerdeki form hataları gözden kaçabilmektedir. Örneğin, bir silindirin yalnızca 12 nokta ile ölçülmesi durumunda yuvarlaklık değerlendirmesindeki belirsizlik ±6–8 µm

seviyelerinde kalırken, tarama yöntemiyle 1000'den fazla nokta toplanması halinde bu belirsizlik ±2–3 µm seviyelerine düşmektedir. Bu durum özellikle form ve profil toleranslarının değerlendirilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Tarama yönteminin bir diğer önemli yararı, üretim proseslerinin analizi için gerekli detaylı yüzey verilerini sağlamasıdır. Yüzeydeki dalgalanmalar, lokal deformasyonlar veya işleme izleri gibi ince form sapmaları tarama ile daha net şekilde tespit edilebilir. Bu nedenle tarama, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde (havacılık, otomotiv, kalıpçılık) yaygın olarak tercih edilen bir ölçüm tekniğidir.

Bununla birlikte tarama her uygulama için gerekli değildir. Basit geometrilerde, yalnızca nominal boyutların kontrol edilmesi gerektiğinde veya yüksek hassasiyetli yüzey form analizine ihtiyaç duyulmadığında noktasal ölçüm yöntemi yeterli olabilir. Tarama yapan probların nokta alarak ölçüm yapan problara göre, sürtünmeden kaynaklı, daha hızlı yıpranacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

4.5. Tek Ve Çok Uçlu Temaslı Prob Sistemleri Kullanan CMM'ler

Bu bölümde temel amaç, eksiksiz bir CMM'in ve onun problama sisteminin pratik performansını belirlemektir. Öngörülen testler, gerçek iş parçalarında böyle bir birleşik sistem kullanıldığında ortaya çıkması muhtemel ölçüm hatalarını, örneğin büyük prob ucu ofset uzunlukları ile düzeltilmemiş CMM dönüş hataları arasındaki etkileşimden kaynaklanan hataları ortaya çıkarmaya hizmet eder. Genellikle, prob performansının çoklu prob bileşenindeki hatalar, tek kalem bileşenininkilere kıyasla önemli ölçüde artar. Bu; esas olarak, problama sistemi oryantasyonundaki farklılık nedeniyle ölçülen uzunluktan önemli ölçüde daha büyük olabilen net CMM hareketinden kaynaklanmaktadır. Hem CMM hem de problama sistemi hatalarına karşı hassasiyet nedeniyle, prob performans testleri ISO 10360-2 ile birlikte gerçekleştirilmelidir. (Boeckmans vd., 2019)

Tek uçlu prob ile ölçüm sistemi, tek bir proba bağlanan birden fazla prob ucuna sahip prob sistemleri (örneğin, "yıldız" prob ucu), her bir prob için bir prob ucuna sahip olanlar gibi çoklu problama sistemleri, mafsallı problamalı sistemler, prob ucu ve prob değiştirme sistemleri ile manuel (tahriksiz) CMM'ler için 10360-2 geçerlidir.

4.5.1. Metrolojik özellikler için gereklilikler

Tek prob ucu form hatası PFTU (single-stylus form error) söz konusu olduğunda; imalatçı ve kullanıcı taradından İzin verilen maksimum tek prob ucu form hatası PFTU, MPE'yi aşmamalıdır ve mikrometre cinsinden ifade edilir.

Belirtilen PFTU, MPE değerinin geçerli olduğu prob sistemi konfigürasyonunun sınırları (prob ucu, prob ucu uzantıları, prob ucu oryantasyonu, prob ucu sisteminin ağırlığı vb.) imalatçı ve kullanıcı taradından tanımlanmalıdır. Sabit çok problu ölçüm sistemlerinde, mafsallı problama sistemlerinde, çoklu prob uçlarının biçim hataları (PFT), lokasyon hataları (PLT) ve boyut hataları (PST) ile birlikte, bu değerlere karşılık gelen İzin verilen maksimum hatalar, PFTM, MPE, (Maximum permissible multi-stylus form error) PSTM, MPE (Maximum permissible multi-stylus size error) ve PLTM, MPL'yi (Maximum permissible limit of the multi-stylus location value) geçmemelidir.

4.5.3'te belirtilen testlerde kullanılan prob uçları, CMM üreticisi tarafından CMM ile birlikte kullanılmak üzere onaylanmış olmalıdır. Bu aynı malzemeden, aynı prob ucu-şaft çapına ve nominal uzunluğa sahip olmaları gerektiği anlamına gelir. Ayrıca, prob ucu-uç kalitesinin de aynı olması gerekmektedir. Ancak, test prosedürleri için gerekli olan tam prob ucu uzunluklarının mevcut olmayabileceği göz önünde bulundurularak, 6 mm veya nominal değerin %10'u kadar bir prob ucu uzunluğu değişikliği olabileceği kabul edilmektedir. Uzunluk açısından hangisi daha büyükse, o kullanılmalıdır.

Ölçümleri etkileyen çevresel koşullar, kurulum yerindeki sıcaklık, hava nemi ve titreşim gibi faktörlere ilişkin belirlenen sınırlar imalatçı ve kullanıcı tarafından tanımlanmaktadır. Her iki durumda da kullanıcı, 4.5 bölümündeki testlerin, CMM veri sayfasında belirtilen üretici sınırları çerçevesinde gerçekleştirileceği çevresel koşulları seçme hakkına sahiptir. Kullanıcı, üretici tarafından veri sayfasında tanımlanan şekilde CMM'nin çevresindeki ortamın sağlanmasından sorumludur. Eğer ortam spesifikasyonları karşılamıyorsa, 4.5'in bu bölümündeki İzin verilen maksimum hata veya sınırların doğrulanması gerekmemektedir.

CMM, 4.5.3'te belirtilen testler için imalatçının kullanım kılavuzunda yer alan prosedürler doğrultusunda çalıştırılmaktadır. Üretici kılavuzunda uyulması gereken belirli hususlar şunlardır:

a) makinenin başlatılması ve ısınma döngüleri,
b) prob ucu sistemi konfigürasyonu ve montajı,
c) prob ucu, test küresi ve referans küresi için temizlik prosedürleri,
d) problama sisteminin yeterliliği,
e) imalatçı tarafından belirtildiği takdirde, referans kürenin kullanım kılavuzunda belirtilen konumu. Tüm prob ucu uçları, referans küresi ve test küresi, ölçüm veya test sonuçlarını etkileyebilecek kalıntı filminin ortadan kaldırılması amacıyla problama sistemi kalifikasyonundan önce temizlenmelidir.

4.5.2. Kabul testleri ve yeniden doğrulama testleri

Kabul testleri, imalatçının belirlediği spesifikasyonlar ve prosedürler doğrultusunda gerçekleştirilirken, yeniden doğrulama testleri ise kullanıcının spesifikasyonları ve üreticinin prosedürleri çerçevesinde yapılmaktadır.

Tek uçlu prob ucu konfigürasyonu ile sabit çoklu prob sistemleri, sabit çoklu prob uçları ve eklemeli prob sistemleri için geçerlidir. Bu testte, çoklu prob sistemlerinden biri, çoklu prob uçlarından biri veya eklemli yönelimlerden biri kullanılmaktadır.

Bu test prosedürünün temel prensibi, tek bir prob ile ölçülen 25 nokta aracılığıyla bir test küresinin boyutunu belirlemek ve gözlemlenen form hatasını prob sistemine ilişkilendirmektir. 25 noktanın en küçük kareler (Gaussian) yöntemiyle küre uyumu, gösterge biçim hataları açısından değerlendirilir. Bu analiz, tek prob ucu form hatası PFTU'yu ortaya koyar. PFTU, prob ucunun ve test küresinin form hatalarından kaynaklanan belirsizliği içerir çünkü ticari olarak temin edilebilen test kürelerinin küreselliği birkaç on ila yüzlerce nanometre arasında değişmektedir. (So vd., 2020)

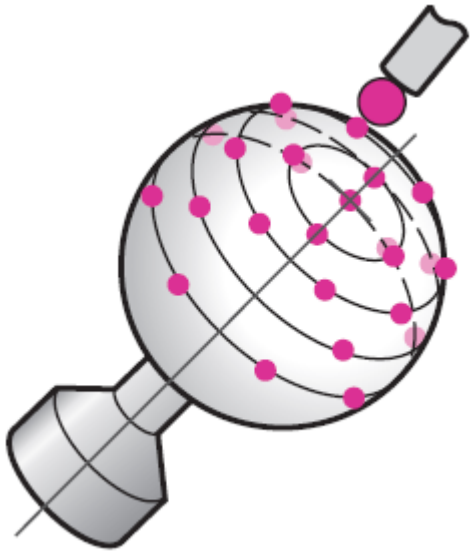
Malzeme standardı, test küresinin boyutunu belirtir; bu boyut 10 mm'den küçük ve 50 mm'den büyük olmamalıdır. Test küresi, belirlenen forma uygun olarak kalibre

edilmelidir. Ayrıca, test küresinin boyutunun da kalibrasyon gerektirdiği belirtilmektedir. Test küresinin form hatasının, duruma bağlı olarak PFTM, MPE veya PFTN, MPE'nin %20'sini geçmemesi önerilmektedir. Problama sistemi kalifikasyonu için CMM ile birlikte sağlanan referans küresi, bu testte kullanılmamalıdır.

- Prob uzunluğu, kullanıcı tarafından 20 mm, 30 mm, 50 mm ve 100 mm seçeneklerden biri olarak belirlenmektedir. CMM üreticisi tarafından geçerli olarak tanımlanan uzunluklardan yalnızca bir tanesi, kullanıcı tarafından seçilip test edilmelidir. Prob bileşenleri, aksi belirtilmediği takdirde, CMM prob sistemi ile uyumlu ve onaylanmış bileşenler olarak kabul edilmelidir. Aksi belirtilmediği sürece, prob ucunun yönelimi ram eksenine paralel olmalıdır. Prob ucunun yönündeki herhangi bir değişiklik, test sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Çift ramlı CMM'lerde, her biri tek yönlü çalışma modunda olmak üzere, her koç için ayrı ayrı iki test gerçekleştirilmelidir.
- Prob sistemi üreticinin normal prosedürlerine uygun olarak kurulur ve nitelendirilir.
- Test küresinin konumu, ölçüm hacmi içindeki herhangi bir konumda kullanıcı tarafından seçilmelidir. Problama sistemi ile referans küresi arasındaki etkileşimi önlemek için, test sırasında referans küresi masadan çıkarılabilir. Bükülmeden kaynaklanan hataları en aza indirmek için, test küresi güvenli bir şekilde monte edilmelidir.
- 25 nokta ölçülüp kaydedilir. Bu noktalar, test küresinin en az bir yarım küresine yaklaşık olarak eşit bir şekilde yerleştirilir. Noktaların konumları kullanıcının tercihine bağlıdır; belirtilmediği takdirde, aşağıda önerilen tarama modeli dikkate alınabilir (bkz. Şekil 4.10):

– test küresinin direği üzerindeki bir nokta (prob ucu şaftının yönü ile tanımlanır);
– direğin 22,5° altında dört nokta (eşit aralıklarla);
– direğin 45° altında ve önceki gruba göre 22,5° döndürülmüş sekiz nokta (eşit aralıklı);
– direğin 67,5° altında ve önceki gruba göre 22,5° döndürülmüş dört nokta (eşit aralıklarla);

– kutbun 90° altında (yani ekvator üzerinde) ve önceki gruba göre 22,5° döndürülmüş sekiz nokta (eşit aralıklı)



Şekil 4.10. Hedef Temas Noktaları (Zeiss 10360 Overview)

25 ölçümün tamamı kullanılarak Gauss yöntemiyle (en küçük kareler) ilişkili bir küre hesaplanır. Her bir ölçüm için Gauss radyal mesafesi (R) belirlenir. En küçük kareler yöntemiyle elde edilen küre merkezine (görünen küre formu olan Rmax − Rmin) göre, 25 noktanın Gauss radyal mesafeleri arasındaki fark kaydedilir. Bu farkın mutlak değeri, tek prob ucu form hatası (PFTU) olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.16. ISO 10360-5 Sonuçları

Ölçüm No	Ölçülen Sonuç (µm)
1	0
2	-0.01
3	0.13
4	0.1
5	0.16
6	0.27
7	-0.38
8	0.19
9	-0.05
10	0.36
11	0.45
12	0.33
13	0.13
14	0.05
15	0.38
16	-0.25
17	0.15
18	0.29
19	-0.07
20	-0.16
21	0.38
22	-0.02
23	0.03
24	-0.28
25	-0.41
Tezgah limit PFTU(µm)	1.5
Prob Hatası	0.83

Çizelge 4.16'de, Çizelge 4.4'te bilgileri verilen CMM'in ISO 10360-5'e göre yapılan kalibrasyon ölçümünün sonuçları gösterilmiştir. ISO 10360-5 standardına uygun olarak gerçekleştirilen bu ölçüm süreci, tarafımca, sabit sıcaklık (20 ± 2 °C) ve kontrollü çevresel koşullara sahip bir metroloji laboratuvarında uygulanmıştır. Ölçüm öncesinde, tüm referans elemanların (kalibrasyon küresi, düzlemsel ve silindirik mastarlar) yüzey temizliği sağlanmış, termal dengeye ulaşıldığından emin olunmuştur. Dokunmalı (tactile) prob sistemine sahip CMM cihazında, izlenebilirliği belgelenmiş referans küreye 25 farklı yönden prob temasları uygulanarak ölçüm verileri elde edilmiştir. Bu

veriler üzerinden, her temas noktası için ölçülen değer ile referans değer arasındaki fark hesaplanarak prob sapması analiz edilmiştir. Ardından, sistemin performansı, standardın tanımladığı Maximum Permissible Error (MPE) limit değerleri ile karşılaştırılmış ve ölçüm sonuçlarının bu sınırlar dahilinde kalıp kalmadığı teknik olarak değerlendirilmiştir. Yapılan bu prosedür, hem ölçüm sisteminin doğruluğunu hem de prob sisteminin yön bağımsız hassasiyetini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde radyal mesafedeki farklardan en büyük değerin .045 en küçük değerin ise -0.38 olduğu görülür. Toplam prob hatasının mutlak değeri ise 0.83'tür. Çizelge 4.3'e yer alan PFTU değerine göre sonuçların uygun olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen ölçüm sonuçları, belirlenen kalibrasyon limit değerlerinin altında kalmış ve sistemin ISO 10360-5 standardına uygun çalıştığını göstermiştir. Ancak ölçüm sonuçlarının ilgili tolerans değerlerini aşması durumunda, kalibrasyonun geçersiz kabul edileceği ve CMM cihazının metrolojik açıdan güvenilirliğini kaybedeceği açıktır. Bu tür bir durumda, cihazın ölçüm amacıyla kullanılmasına devam edilmesi mümkün olmayacak, sistemin doğruluğunun yeniden sağlanabilmesi için üretici firma veya yetkili servis tarafından teknik müdahale gerekecektir. Gerekli bakım, hizalama ve sistem ayarlarının yapılmasının ardından, CMM üzerinde yeniden kalibrasyon testleri gerçekleştirilerek ölçüm performansı tekrar standarda göre doğrulanmalıdır.

Eğer yıldız prob denilen beş farklı sabit prob ucu aracılığıyla bir test prosedürü uygulanacaksa yukarda yapılan çalışma her bir prob ucu için yapılmalıdır. Her bir prob ucu, test küresi üzerinde 25 nokta ölçerek, toplamda beş prob ucu ile birlikte 125 nokta elde edilmektedir. Eğer CMM ile birlikte bir prob ucu veya prob değiştirme sistemi temin edilmişse, her bir prob ucu kullanılmadan önce toplam beş değişiklik yapılması gerekmektedir. Tek bir kalemle alınan 25 noktadan oluşan her grup için, toplamda beş küre uyumu sağlamak amacıyla en küçük kareler yöntemiyle küre uyumunu ilişkilendirmek gerekmektedir.

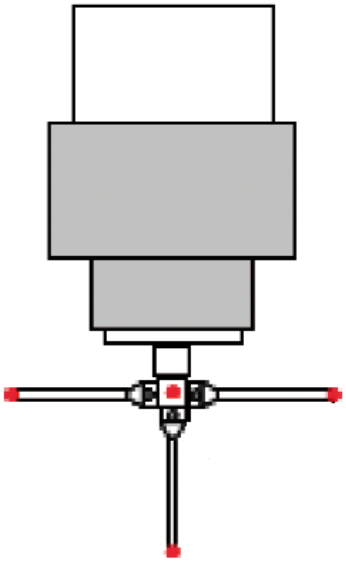
Beş kürenin merkez koordinatlarının (X, Y ve Z) aralıkları hesaplanmaktadır. Bu üç aralıktan en büyük olanı, çoklu prob ucu konum değerini (PLTM) (Multi-stylus location value) belirler. Ayrıca, 125 noktanın tamamını kullanarak yapılan en küçük kareler küre uyumu, biçim ve boyut hataları açısından değerlendirilmektedir. Bu analiz,

çoklu prob ucu boyutu hatasını (PSTM) (Multi-stylus size error) ve çoklu prob ucu form hatasını (PFTM) (Multi-stylus form error) ortaya koymaktadır. Çoklu prob ucu sistemi kullanıldığında, bu testlerin sonuçları büyük ölçüde prob ucu sistemine bağlı olabilmektedir. Bu nedenle, bir dizi prob ucu uzunluğu dikkate alınmakta yalnızca CMM imalatçısının prob ucu sistemine uygun olarak belirttiği uzunluklar test için geçerli olmalıdır.

Çoklu prob sistemleri kullanıldığında, bu testlerin sonuçları büyük ölçüde prob uçlarının ofset uzunluklarına bağlıdır. CMM üreticisi tarafından tanımlanan koç ekseni üzerindeki tek bir noktadan ölçülen bir dizi uç ofset uzunluğu dikkate alınmaktadır. Sadece CMM üreticisinin problama sistemine uygun olarak belirttiği ofset uzunlukları, test için geçerli kabul edilmelidir.

Problama sistemi kalifikasyonu amacıyla CMM ile birlikte sağlanan referans küresi bu test için kullanılmamaktadır.

- Çoklu prob ucu sistemi kullanıldığında, probun eksenine paralel bir prob ucu ile eksene dik bir düzlemde, her biri kendisine bitişik olan dört prob ucunun 90° açıyla yönlendirilmesiyle bir "yıldız" prob ucu sistemi oluşturulmalıdır (şekil 4.11). Prob ile prob ucu bağlantı noktası arasındaki mesafe, genellikle CMM ile birlikte sağlanan prob ucu bileşenleri kullanılarak mümkün olan en kısa mesafe olmalı ve imalatçının önerileriyle uyumlu olmalıdır. Uygulanabilir prob ucu uzunlukları eşit olmalı ve CMM üreticisi tarafından belirlenmelidir; bu uzunluklar 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm ve 400 mm değerlerinden seçilmelidir. Kullanıcı, CMM imalatçısı tarafından belirtilen uzunluklardan yalnızca birini seçip test etmelidir. Prob bileşenleri, aksi belirtilmediği takdirde CMM prob sistemi ile kullanım için onaylanmış bileşenler olarak kabul edilmelidir.



Şekil 4.11. Prob uzunluğu *l* olan sabit çoklu prob ucuyla problama sistemi (Hexagon, 2025)

- Çoklu prob sistemi kullanıldığında, her bir prob için kısa (aksi belirtilmedikçe, 20 mm) düz bir prob ucu takılması gerekmektedir. "Yıldız" prob oluşturmak amacıyla bu prob uçları uygun uzatma bileşenleri ile birleştirilmelidir. Sistem, rem eksenine paralel bir prob ile eksene dik bir düzlemde yer alan ve her biri kendisine bitişik olan dört probdan oluşmaktadır. Beş prob ucu ucunun her birinden rem ekseni üzerindeki tek bir referans noktasına olan mesafeler, yani prob ucu ofset uzunlukları yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Prob ucu ofset uzunluklarının geçerli değerleri, CMM imalatçısı tarafından belirlenmeli ve aşağıdaki değerlerden biri seçilmelidir: 50 mm, 100 mm, 200 mm ve 400 mm. CMM imalatçısı tarafından belirlenen ve sisteme uygun ofset uzunluklarından yalnızca biri kullanıcı tarafından seçilip test edilmelidir. Problama ve prob ucu bileşenleri, aksi belirtilmediği sürece, CMM problama sistemi ile kullanım için onaylanmış bileşenler olmalıdır. Ancak, test prosedürü için gerekli olan kesin ofset uzunluklarının mevcut olmayabileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu nedenle ofset uzunluğunun nominal değerinde 6 mm veya nominal uzunluğun %10'u hangisi daha büyükse kullanılmalıdır.
- Beş prob ucu, CMM üreticisinin spesifikasyonunda bu tür bir kısıtlama açıkça belirtilmediği takdirde, yalnızca bir nominal çap ile sınırlı olmamalıdır.
- Problama sistemini, CMM üreticisinin standart çalışma prosedürlerine uygun olarak değerlendirilir.

- Test küresinin konumu, kullanıcı tarafından ölçüm hacminin herhangi bir yerinde seçilebilmelidir. Problama sistemi ile referans küresi arasındaki etkileşimi önlemek amacıyla, referans küresi test süresince tabladan çıkarılabilir.
- Toplamda 125 nokta kullanılarak her kalem için 25 nokta ile test küresi ölçülmelidir. Noktalar, test küresinin en az bir yarım küresine yaklaşık olarak eşit şekilde dağıtılacak şekilde yerleştirilmelidir. Noktaların konumları, kullanıcının tercihine bağlıdır. Önerilen nokta örnekleme stratejisi, tek prob ucu testi ile benzerlik göstermektedir. Test küresi destek sapı dikey merkez çizgisine yerleştirildiğinde ve yatay bir prob ucu kullanıldığında, ekvatordaki sekiz noktanın her biri 22,5° açıda olacak şekilde problama modelinin yönlendirilmesiyle erişim optimize edilmelidir. CMM ekseni ve bitişik düzlemdeki dört nokta Z eksenine 45° açıyla yerleştirilmelidir. Eğer alttan görünüş bir cephe olarak değerlendirilirse, bu durum Şekil 4.8'da gösterilmektedir. Ancak, test küresi destek sapı çapına ve/veya prob ucu çapına göre küçükse, ekvatordaki sekiz nokta 315°'lik bir yay üzerinde 45°'de eşit aralıklarla yerleştirilemiyorsa, bu durumda sekiz nokta mevcut yay üzerinde eşit aralıklarla konumlandırılmalıdır.
- CMM ile birlikte bir prob ucu veya prob değiştirme sistemi sağlandığında, bu testi gerçekleştirmeden önce beş prob ucunun tamamının kalifiye edilmesi ve prob uçlarının ya da probların rafa geri yerleştirilmesi gerekmektedir. Test esnasında her bir prob ucu veya prob, yalnızca bir kez değiştirilecek şekilde toplamda beş değişiklik yapılmalıdır. Ancak, değiştirme sisteminde beşten az prob ucu veya prob istasyonu bulunuyorsa, toplam beş değişiklik elde etmek amacıyla bazı prob uçları veya problar birden fazla kez değiştirilerek maksimum sayıya ulaşır. "Yıldız" prob ucu veya "yıldız" prob sistemi mevcutsa, yıldız sistemi rafa geri konulmalı ve tekrar alınmalıdır.

Toplam beş küre için uyum sağlamak amacıyla, her bir grup için tek bir kalemle elde edilen 25 noktanın en küçük kareler küre uyumu belirlenir. Beş kürenin merkez koordinatlarının (X, Y ve Z) aralıkları hesaplanır. Bu üç aralıktan en büyüğü, ilgili prob sistemi konum değerini (PLTM) belirler.

Beş prob ucuyla elde edilen toplam 125 noktanın tamamına uygun en küçük kareler küresini ilişkilendirilir. Malzeme standardının kalibre edilmiş değerine göre küre

geçme çapının sapmasının mutlak değerini kaydedilir ve çoklu kalem boyutu hatası (PSTM) uygun bir şekilde belirtilir. Ayrıca, en küçük kareler küre merkezine göre 125 noktanın yarıçap aralığını, yani görünür küre biçimi olan Rmax - Rmin kaydedilir. Bu farkın mutlak değeri, ilgili olarak çoklu prob ucu form hatası, PFTM olarak tanımlanır.

4.5.3. Uygulamalar

Satın alma, bakım, onarım, yenileme veya yükseltme sözleşmesinde belirtilen bir tedarikçi ve müşteri arasındaki sözleşmeye dayalı durumlarda, 4.5 bölümünde tanımlanan kabul testleri, tedarikçi ve müşteri tarafından belirlenen maksimum İzin verilebilir hatalar ve sınırlara uygun olarak tek stilus problama performansını ve (gerektiğinde) çok stiluslu CMM sistemi performansını doğrulamak amacıyla kullanılabilir.

4.5 bölümünde sunulan doğrulama testleri, bir kuruluşun iç kalite kontrol süreçlerinde uygulanabilir. Tek stiluslu problama performansı ve (gerektiğinde) çok stiluslu problama performansının doğrulanması için güvence sistemi CMM sistemi performansı, belirtilen uygun maksimum İzin verilebilir hatalar ve tüm olası ayrıntılı sınırlamalar dikkate alınarak kullanıcı tarafından belirlenen sınırlar çerçevesinde gerçekleştirilmelidir. (ISO 10360-5, 2010)

4.5.4. Çok Uçlu Prob Sisteminin Avantajları

CMM ölçümlerinde çok uçlu temaslı problar, karmaşık geometrilerde prob erişimini artırmak ve ölçüm sürecini daha verimli hâle getirmek amacıyla kullanılan stylus yapılandırmalarıdır. Bu problar, tek bir prob gövdesine birden fazla temas ucunun bağlanmasıyla oluşturulur ve farklı yönlerde konumlandırılmış uçlar sayesinde parçanın çeşitli bölgelerine prob başlığını döndürmeye gerek kalmadan erişim sağlanır. Özellikle çok yönlü delik ölçümleri, karmaşık iç geometri yapıları ve karşılıklı konum ilişkileri içeren gövdelerde çok uçlu problar ölçüm verimliliğini belirgin şekilde artırır.

Çok uçlu problemlerin temel avantajı, tek bağlama ile daha fazla bölgeye erişim sağlamalarıdır. Standart tek uçlu bir prob ile ulaşılması zor olan yan yüzeyler, alt bölgeler veya parçanın içerisinde yer alan girintiler, çok uçlu prob yapılandırmasıyla

prob başlığına ek bir açı verme ihtiyacı olmaksızın ölçülebilir hâle gelir. Bu durum hem ölçüm süresini kısaltır hem de prob başlığının fazla hareket ettirilmesinden kaynaklanabilecek konumlandırma hatalarını azaltır. Böylece ölçümün tekrarlanabilirliği artar ve sistem daha stabil bir şekilde çalışır.

Çok uçlu temaslı problar, tek bir prob değişimine gerek kalmadan farklı yönlerde ölçüm yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede ölçüm sırasında prob değiştirme ve yeniden kalibrasyon ihtiyacı ortadan kalkmakta veya önemli ölçüde azalmaktadır. Örneğin, bir parçanın üç farklı yönde (X+, Y+ ve Z−) ölçülmesi gereken bir senaryoda, tek uçlu prob kullanıldığında her yön için prob değişimi ve kalibrasyon yaklaşık 30–45 saniye sürmekte ve toplam süre 2–3 dakikayı bulabilmektedir. Üç uçlu bir prob kullanıldığında ise bu işlemler tek seferde gerçekleştirilebilmekte ve toplam ölçüm süresi %60–70 oranında azaltılmaktadır.

Çoklu uçlu prob sistemlerinde ölçüm stratejisi tek bir prob konfigürasyonu üzerinden gerçekleştirildiğinden, operatör kaynaklı değişkenlik minimum seviyeye indirilmektedir. Yapılan karşılaştırmalarda, tek uçlu prob ile yapılan ölçümlerde tekrarlanabilirlik değeri (3σ) ±3–4 μm seviyelerinde iken, çoklu uçlu prob kullanımıyla bu değer ±1–2 μm seviyelerine düşmektedir. Bu iyileşme, özellikle seri üretim ölçümlerinde süreç yeterliliğini artırmaktadır.

Bu tür problar özellikle otomotiv, kalıpçılık ve hassas işlenmiş mekanik gövdelerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Farklı yönlere yerleştirilmiş uçlar sayesinde tek bir prob değişimiyle çok sayıda ölçüm noktası alınabilir ve sık prob değiştirme ihtiyacı ortadan kalkar. Bu da hem zamandan tasarruf sağlar hem de prob değiştirici istasyonlarında oluşabilecek hizalama hatalarının önüne geçer. Ayrıca ölçüm yazılımları bu stylus konfigürasyonlarını tanıyarak probun hangi uçla ölçüm yaptığını otomatik olarak izler ve programlamayı kolaylaştırır.

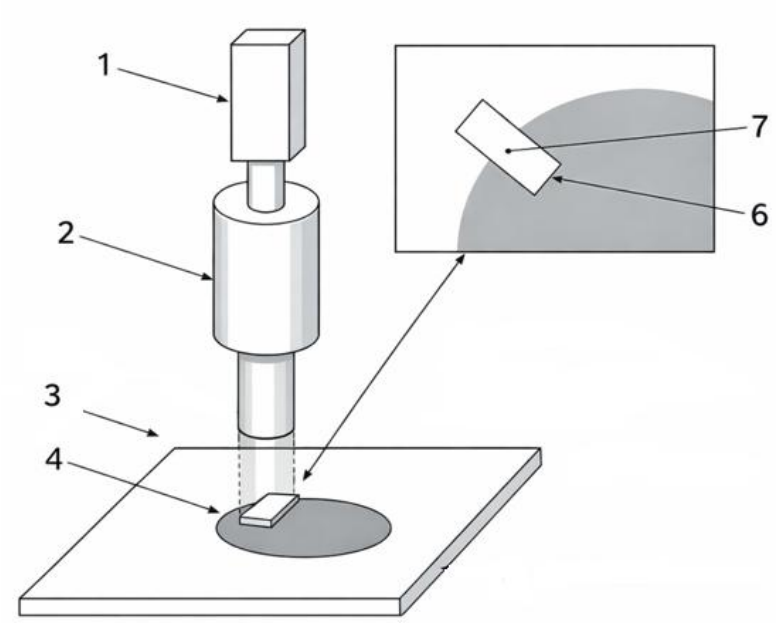
Bununla birlikte çok uçlu prob kullanımı her uygulama için uygun değildir. Dar toleranslı ölçümlerde, uzun stylus kombinasyonlarının esneme riskinin arttığı durumlarda veya prob uçlarının birbirine ve parçaya çok yakın olduğu geometrilerde tek uçlu prob tercih edilebilir. Ancak karmaşık parçaların verimli ve tek bağlama prensibine

uygun şekilde ölçülmesi gerektiğinde çok uçlu problar, CMM sisteminin ölçüm kabiliyetini önemli ölçüde artıran bir çözüm olarak değerlendirilir.

4.6. Görüntülü Probu Olan CMM'ler

Bu bölümde, doğrusal boyutları ölçmek amacıyla her türlü görüntüleme problama sistemini kullanan bir CMM'in performansını doğrulamak için gerekli kabul testleri anlatılmaktadır. Ayrıca, CMM'in performansının düzenli aralıklarla yeniden doğrulamasını sağlayan yeniden doğrulama testlerine de yer verilmektedir. Tipik bir görüntüleme problama sistemi şematik olarak Şekil 4.12'de verilmektedir. Bu şekildeki elemanlar aşağıdaki gibi sıralanabilir. (ISO 10360-7, 2011)

1- Ölçülen nesnenin görüntüsünü yakalamak için kamera veya başka bir cihaz
2- Görüntüleme problama sisteminin çeşitli optik elemanları
3- Ölçülen nesne
4- FOV (field of view) (nesne)
5- FOV (field of view) (görüntü)
6- Ölçüm penceresi
7- Ölçülen nokta



Şekil 4.12. Görüntüleme Problama Sistemi

4.6.1. Çevresel ve metrolojik gereklilikler

Sıcaklık koşulları, havadaki nem oranı, titreşim ve basınç gibi çevresel koşullara ilişkin izin verilen sınırlar ve kurulum yerindeki ortam aydınlatması ölçümü etkilemektedir. CMM ölçümü yapacak firma ISO 10360-7 testinin gerçekleştirileceği çevresel koşulları belirleme konusunda serbesttir. Bu testler, üreticinin veri sayfasında belirtilen sınırlar dahilinde yapılmaktadır. Eğer ortam spesifikasyonları karşılamıyorsa, izin verilen maksimum hataların doğrulanması ve limitleri talep edilemez.

CMM, aşağıda belirtilen durumlarda üretici tarafından sağlanan kullanım kılavuzundaki prosedürler doğrultusunda işletilmelidir.

a) makine başlatma/ısınma döngüleri,
b) temizlik prosedürleri,
c) problama sistemi kalifikasyonu,
d) kalibrasyondan önce problama sisteminin termal kararlılığı,
e) problama yaklaşım yönü,
f) ortam aydınlatması,
g) aydınlatma sistemi,
h) termal sensörlerin yeri, tipi, sayısı,
i) görüntüleme probu kurulumu ve büyütme,
j) görüntü işleme filtreleri ve algoritmaları.

Bu bölümde, görüntüleme problu CMM'lerin çeşitli konfigürasyonları da yer almaktadır. Üreticinin spesifikasyonları ve gerekli test prosedürü bu nedenle bir miktar esnekliğe sahiptir. Bazı görüntüleme problu CMM'ler, üç boyutlu ölçümler gerçekleştirmek üzere tasarlanmış ve bu amaçla geliştirilmiştir. Ancak bazıları üç boyutlu ölçüm yapma yeteneğine sahip değildir. Spesifikasyonlarda belirli bir esneklik sağlamak, aynı zamanda metrolojik özellikler için gerekli tüm gereksinimlerin karşılandığından emin olmak amacıyla, tanımlanmış MPE'lerin kullanımı için spesifikasyon varyasyonlarına İzin verilmektedir.

a) Görüntüleme probu, CMM hacminin herhangi bir noktasında uzamsal (üç boyutlu) ölçüm gerçekleştirebilen bir cihazdır. Bu bölüm, görüntüleme problu CMM'ler için iki farklı test yöntemine olanak tanımaktadır: Bileşen yaklaşımı ve kompozit yaklaşım.

1) Bileşik yaklaşım, uzunluk ölçüm hataları için tek bir maksimum İzin verilebilir hata (MPE) içerir, yani EB, MPE veya EU, MPE.

2) Bileşen yaklaşımı aşağıdaki üç MPE değerini içerir:

i) EBXY, MPE veya EUXY, MPE;

ii) EBZ, MPE veya EUZ, MPE;

iii) ESQ, MPE.

Bileşik ve bileşen yaklaşımlarından elde edilen MPE değerleri doğrudan karşılaştırılamaz.

b) Üç eksende hareket edebilen, ancak yalnızca iki boyutlu bir düzlemde ölçüm gerçekleştirebilen görüntüleme probuna sahip CMM'ler için uzunluk ölçüm hataları açısından iki MPE değeri mevcuttur.

1) ESQ, MPE;

2) EBXY, MPE veya EUXY, MPE.

c) Sadece herhangi bir iki boyutlu düzlemde ölçüm gerçekleştirebilen görüntüleme problu CMM'ler için, uzunluk ölçüm hataları açısından bir MPE değeri bulunmaktadır:

EBXY, MPE veya EUXY, MPE.

PF2D, MPE tüm makine yapılandırmaları için zorunludur. Problama hatası, PF2D için test prosedürü, hem makine hareketini hem de görüş alanının kullanılabilir kısmını kapsar. Makine hareketi olmaksızın görüş alanında ölçüm yapabilen makineler için PFV2D, MPE'ye izin verilir, ancak bu durum zorunlu değildir. Problama hataları, PF2D ve PFV2D, ilgili izin verilen maksimum hatayı aşmamalıdır. PF2D, MPE ve PFV2D, MPE imalatçı ve kullanıcı tarafından tanımlanmakta ve mikrometre cinsinden ifade edilmektedir.

Uzunluk ölçüm hatalarının (RB veya RU değerleri) tekrarlanabilirlik aralığı, maksimum izin verilen sınırını, RB, MPL veya RU, MPL, aşmamalıdır ve mikrometre cinsinden ifade edilir.

4.6.2. Kabul testleri ve doğrulama testleri

Tüm testler için prob sistemi, üreticinin standart prosedürlerine uygun olarak kurulmalı ve kalifiye edilmelidir. Tüm prob sistemi kalifikasyonları, CMM'nin normal kullanımında prob kalifikasyonları için üretici tarafından sağlanan artefakt kullanılarak gerçekleştirilmelidir; başka test artefaktları veya diğer artefaktlar kullanılmamalıdır.

Değerlendirme, beş farklı kalibre edilmiş test uzunluğunun belirlenen değerlerinin karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilmelidir. Her bir test uzunluğu, kalibre edilmiş değerlerine göre üç kez ölçülmelidir. Belirlenen değerler, hizalama yönünde yansıtılan noktalar arasındaki uzunluk ölçümleri ile hesaplanmalıdır. Her bir nokta, üreticinin önerilerine uygun olarak tek bir ölçüm penceresi kullanılarak ölçülmelidir. Bu ölçüm penceresinin boyutları, görüş alanının % 10'undan daha büyük olmamalıdır.

Termal genleşme kompanzasyonu bulunmayan CMM'ler için iş parçası ile kalibre edilmiş test uzunluğu arasında önemli bir hata meydana gelebilir. Termal genleşme kompanzasyonuna sahip CMM'lerde ise, termal kaynaklı hata büyük ölçüde azalır. Bu tür CMM'lerde kalan termal hatanın önemli bir kısmı, test uzunluğunun CTE'sindeki belirsizlikten kaynaklanmaktadır. CTE, kusurlu termal genleşme düzeltmesi ile sonuçlanmaktadır.

Her bir pozisyon için belirlenen en uzun kalibre edilmiş test uzunluğu, kalibre edilmiş test uzunluğu boyunca bir ölçüm hattı üzerindeki CMM'in maksimum hareketinin en az % 66'sını karşılamalıdır. Bu nedenle, bir gövde diyagonali boyunca yerleştirilen İzin verilen minimum en uzun kalibre edilmiş test uzunluğu, bir eksen yönü boyunca yerleştirilen İzin verilen minimum en uzun kalibre edilmiş test uzunluğundan daha fazla olmalıdır. Her bir kalibre edilmiş test uzunluğu, uzunluk açısından diğerlerinden belirgin şekilde farklılık göstermelidir. Uzunluklar, ölçüm hattı üzerinde dengeli bir şekilde dağıtılmalıdır. Genel olarak, bir pozisyonda kullanılan beş kalibre edilmiş test uzunluğunun uzunlukları, örneğin farklı ölçüm hatları boyunca CMM hareketinin kapsamı nedeniyle, başka bir pozisyonda kullanılanlardan farklılık gösterebilir.

1 m’lik bir ölçüm hattı üzerinde dengeli bir şekilde dağıtılmış kalibre edilmiş test uzunluklarına örnek olarak; 100 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm verilebilir. EBV veya EUV için isteğe bağlı test, CMM’in hareketine İzin vermez. Bu durumda maksimum hareket, görüntüleme probunun görüş alanındaki maksimum ölçülebilir uzunluğu belirler.

Yedi farklı konumun her birine beş adet kalibre edilmiş test uzunluğu yerleştirilmelidir. Bu konumlar ve yönler, CMM’in ölçüm hacminde değerlendirilmeli ve her bir uzunluk toplamda üç kez ölçülmelidir. Bu işlem, toplamda 105 ölçüm gerçekleştirilmesini sağlar. Yedi konumdan dördü, Çizelge 4.17’de belirtildiği üzere alan köşegenleri olarak seçilmelidir. Kullanıcı, kalan üç konumu belirleme hakkına sahiptir. Varsayılan konumlar Çizelge 4.3’de gösterildiği gibi CMM eksenlerinin her birine paralel konumlandırılmıştır. Üretici, kendi takdirine bağlı olarak her bir CMM ekseni için izin verilen maksimum çift yönlü hata veya tek yönlü uzunluk ölçümünü belirleyebilir. Bu durum 5, 6 ve 7 numaralı konumlar için geçerlidir.

- Çift yönlü uzunluk ölçümleri için gösterim şu şekilde olmalıdır
    - EBX ve EBX, MPE,
    - EBY ve EBY, MPE ve
    - EBZ ve EBZ, MPE.

- Tek yönlü uzunluk ölçümleri için gösterim şu şekilde olmalıdır
    - EUX ve EUX, MPE,
    - EUY ve EUY, MPE ve
    - EUZ ve EUZ, MPE.

Çizelge 4.17. Ölçüm hacminde oryantasyon

Pozisyon Numarası	Ölçüm Hacmindeki Yönelim	Gerekli veya Varsayılan
1	Uzayda (1, 0, 0) noktasından (0, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
2	Uzayda (1, 1, 0) noktasından (0, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
3	Uzayda (0, 1, 0) noktasından (1, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
4	Uzayda (0, 0, 0) noktasından (1, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
5	(0,0,0)'dan (1,0,0)'a tezgahta +x yönünde.	Varsayılan
6	(0,0,0)'dan (0,1,0)'a tezgahta +y yönünde.	Varsayılan
7	(0,0,0)'dan (0,0,1)'a tezgahta +z yönünde.	Varsayılan
NOT : Bu çizelgedeki spesifikasyonlar için, ölçüm hacminin karşılıklı köşelerinin aşağıdaki gibi olduğu varsayılır (X, Y, Z) koordinatlarında (0, 0, 0) ve (1, 1, 1).		

Yüksek en-boy oranına sahip CMM'ler için eksenlerin uzunlukları arasında üretici ve kullanıcı arasında karşılıklı bir anlaşma sağlanarak iki ek ölçüm pozisyonu eklenmesi önerilmektedir. Yüksek en-boy oranı, en uzun eksenin uzunluğunun ara eksenin uzunluğunun en az üç katı olduğu durumlarda söz konusu olmaktadır. Önerilen pozisyonlar, her biri üç kez ölçülen beş kalibre edilmiş test uzunluğundan oluşmakta olup en uzun eksene dik bir düzlemdeki iki köşegen (köşeden köşeye) şeklindedir. Eğer X en uzun eksen ise, bu iki köşegen Y-Z düzleminde yer almakta ve yaklaşık olarak X ekseninin orta noktasında konumlanmaktadır.

EB, MPE veya EU, MPE için üretici spesifikasyonunun $\alpha < 2 \times 10^{-6}/°C$ gerektirdiği durumlarda, normal bir CTE malzemesi üzerinde ek bir ölçüm gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu ölçüm, test uzunluğunun 0,5 m veya CTE malzeme test uzunluğunun % 50'sinden daha az olması şartıyla yapılmalıdır. Ölçüm, CMM eksen hareketinin en uzun olduğu noktada, CMM ölçüm hacminin merkezinde ve CMM eksenlerinden birine paralel olarak gerçekleştirilmelidir. Bu işlem üç kez tekrarlanmalıdır. Üretici, bu test uzunluğunun CTE'sini kalibre edebilir.

105 ölçümün tamamı için, her bir test uzunluğunun belirtilen değeri ile kalibre edilmiş değeri arasındaki farkı hesaplayarak her bir uzunluk ölçüm hatası, EB veya EU olarak belirlenir. Kalibre edilmiş bir test uzunluğunun belirli bir ölçümünün belirtilen değeri, sistematik hataları veya CMM'in bu amaçla kullanılan aksesuar cihazları varsa termal olarak indüklenen hataları (termal genleşme dahil) dikkate alarak düzeltilebilir. Bilgisayar çıktısından elde edilen sonuçların sıcaklık veya diğer düzeltmeleri hesaba katmak amacıyla manuel olarak düzeltilmesine, çevresel koşullar 4.6.3'de belirtilen şartları sağladığında İzin verilmemelidir. Tüm uzunluk ölçüm hatalarını, belirtilen şekilde bir diyagram üzerinde gösterilmeli ve MPE'nin ifade edilen formuyla uyumlu bir biçimde sunulmalıdır.

Beş adet kalibre edilmiş test uzunluğu, görüntüleme probunun ölçüm düzlemine nominal olarak dik bir açıyla yerleştirilmelidir. Kullanıcı, konumu belirleme yetkisine sahiptir. Kalibre edilmiş beş test uzunluğunun her biri için, toplamda 15 ölçüm sonucu elde etmek amacıyla her bir test uzunluğundan üç ölçüm sonucu alınmalıdır.

15 ölçümün tamamı için, her bir test uzunluğunun belirtilen değeri ile kalibre edilmiş değeri arasındaki farkı hesaplayarak her bir uzunluk ölçüm hatası, EBZ veya EUZ olarak belirlenir. Kalibre edilmiş bir test uzunluğunun belirli bir ölçümü, eğer CMM bu amaçla gerekli aksesuar cihazlara sahipse sistematik hataları veya termal olarak indüklenen hataları dikkate almak amacıyla CMM tarafından düzeltilebilir (termal genleşme dahil). Bilgisayar çıktısından elde edilen sonuçların sıcaklık veya diğer düzeltmeleri dikkate alarak manuel olarak düzeltilmesine çevresel koşulların 4.6.3.1'de belirtilen şartları sağlamadığı durumlarda İzin verilmemelidir.

Görüntüleme probunun ölçüm düzlemine nominal olarak paralel olan dört farklı konumuna (konumlar ve yönler) beş adet kalibre edilmiş test uzunluğu yerleştirilmelidir. Bu konumların ikisi düzlemsel yüz köşegenleri olarak belirlenmiştir. Kullanıcı, kalan iki konumu seçme hakkına sahiptir; varsayılan konumlar nominal olarak CMM eksenlerinin her birine, yani X ve Y'ye paraleldir. Dört farklı konum nominal olarak paralel düzlemler olmasına rağmen birbirlerinden farklılık gösterebilir. Kalibre edilmiş beş test uzunluğunun her biri için üç ölçüm sonucu alınmalıdır. Toplamda 60 ölçüm sonucu elde etmek amacıyla, dört ölçüm konumunun her biri için bu işlemi tekrarlamak gerekmektedir.

EBXY, MPE veya EUXY, MPE için üretici spesifikasyonunun $\alpha < 2 \times 10^{-6}/°C$ gerektirdiği durumlarda, normal CTE'ye sahip malzeme üzerinde kalibre edilmiş test uzunluğu ile ek bir ölçüm gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Normal CTE malzeme test uzunluğu, 0,5 m veya X veya Y eksenindeki en uzun CMM hareketinin % 50'sinden daha küçük bir değerden büyük olmalıdır. Bu ölçüm, CMM ölçüm hacminin merkezinde ve X veya Y CMM eksenine paralel bir şekilde yapılmalıdır. Ölçüm işlemi üç kez tekrarlanmalıdır. Üretici, bu test uzunluğunun CTE'sini kalibre etme yeteneğine sahiptir.

60 ölçümün tamamı için, her bir test uzunluğunun belirtilen değeri ile kalibre edilmiş değeri arasındaki fark hesaplanarak her bir uzunluk ölçüm hatası, EBXY veya EUXY olarak belirlenir. Kalibre edilmiş bir test uzunluğunun belirli bir ölçümü, sistematik hataları veya CMM'in bu amaçla kullanılan aksesuar cihazları varsa termal olarak indüklenen hataları (termal genleşme dahil) dikkate almak amacıyla CMM tarafından düzeltilebilir. Bilgisayar çıktısından elde edilen sonuçların sıcaklık veya diğer düzeltmeleri dikkate alarak manuel olarak düzeltilmesine, çevresel koşulların 4.6.3'te belirtilen şartları sağlamadığı durumlarda İzin verilmemelidir.

Kalibre edilmiş beş test uzunluğu için her birinden üç ölçüm sonucu alınmalıdır. Toplamda 60 ölçüm sonucu elde etmek amacıyla, dört ölçüm konumunun her biri için bu işlemi tekrarlanır. 60 ölçümün tamamı için her bir uzunluk ölçüm hatası, belirtilen değer ile kalibre edilmiş her bir test uzunluğunun değeri arasındaki farkı hesaplayarak belirlenir. Kalibre edilmiş bir ölçümün belirli bir ölçümünde, eğer CMM bu amaçla gerekli aksesuar cihazlara sahipse sistematik hataları veya termal olarak indüklenen hataları dikkate almak amacıyla CMM tarafından düzeltme yapılabilir (termal genleşme dahil). Manuel düzeltmeler, çevresel koşulların 4.6.3'de belirtilen şartları sağladığı durumlarda, bilgisayar çıktısından elde edilen sonuçlara uygulanmamalıdır.

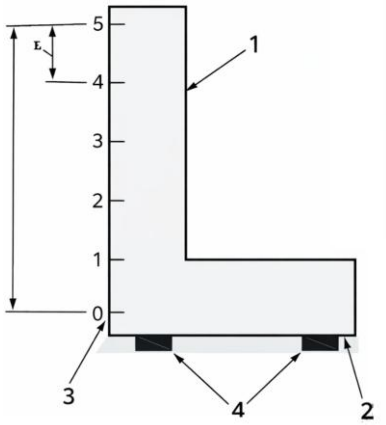
4.6.2.1. Karasellik hatası

Değerlendirme yönteminin temel prensibi, görüntüleme problu CMM'in hem YZ hem de ZX hareket düzlemleri için belirlenen maksimum izin verilen karesellik hata; ESQ, MPE dahilinde ölçüm yapıp yapamayacağını belirlemek amacıyla metreye kadar izlenebilir ve kalibre edilmiş bir mekanik gönye (şekil 4.14) kullanmaktır.

Değerlendirme süreci, bir kare üzerinde altı farklı konumun (bir sıfır noktası ve beş ölçüm noktası) ölçülmesi ve elde edilen sonuçların karenin kalibrasyon değerleriyle karşılaştırılması ile gerçekleştirilmelidir. Sonuçlar, belirtilen değerlere göre, düzgün bir şekilde hizalanması gereken karenin referans yüzeyine göre CMM'nin XY hareket düzleminde ölçülür. Karenin ölçümü genellikle CMM'e takılacak bir tür gösterge veya gösterge mastarının kullanılmasını gerektirmektedir. Gerekirse bu harici gösterge test cihazı tarafından sağlanmalıdır.

Karesellik ölçümleri, CMM Z ekseninin maksimum hareketinin en az % 66'sı boyunca gerçekleştirilmelidir. Z eksenine paralel ölçüm noktaları arasındaki mesafe, Z ekseninin maksimum hareketinin en az % 10'u kadar olmalıdır. Kare üzerinde ölçülecek her bir konum, karenin referans yüzeyine göre kalibre edilmelidir. Kare üzerindeki boyut ve ölçüm konumları için gereklilikler Şekil 4.14'de belirtilmiştir.

CMM performansının derecelendirildiği maksimum iş parçası kütlesi, seçim aşamasında dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.13. Karesellik hatasını kontrol etmek için kare, Es

Şekil 4.13'de verilen sembollerin açıklaması aşağıda sunulmuştur.

1- hassas mekanik gönye
2- karenin referans yüzeyi
3- karenin sıfır noktası
4- referans noktalarına kare yerleştirmek için sabitleme (uygunsa)
a- Minimum ölçüm hattı uzunluğu Z hareketinin %66'sıdır.
b- Noktalar arasındaki minimum mesafe Z hareketinin %10'udur.

Kalibre edilmiş kare, iki ayrı ölçüm pozisyonuna yerleştirilmelidir. İlk pozisyon, nominal olarak CMM'in ZX hareket düzlemine paralel olmalıdır. İkinci pozisyon ise nominal olarak CMM'in YZ hareket düzlemine paralel olmalıdır.

Kullanılan hizalama yönteminin, kalibrasyon prosedürleriyle tutarlı olması önerilmektedir. Hizalama yöntemi genellikle karenin referans yüzeyindeki bir düzlemin ölçülmesini içerir. Ölçüm noktalarının düzlem üzerindeki konumu, gönyenin kalibrasyonuna göre belirlenmelidir. Kareyi konumlandırmak veya CMM'nin çalışma yüzeyinden yükseltmek için yükseltici bloklar veya diğer sabitleme elemanları kullanılabilir. Bu, gönyenin kalibre edildiği şekilde hizalanması açısından önem taşımaktadır.

Kare hizalandıktan sonra, görüntüleme probu CMM kullanılarak kare üzerinde +Z yönünde ölçüm noktaları alınır. İlk ölçüm noktası sıfır veya referans noktası olarak belirlenir. Sıfır noktası Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Sıfır noktasının karenin kalibrasyonu ile uyumlu olması önerilmektedir. Her bir beş ölçüm konumu için, kalibre edilmiş yüzeyde tek bir ölçüm sonucu elde edilir ve kare daha sonra +Z yönünde hareket ettirilir. Karenin ilk konumunda, ZX'e paralel düzlemde yerleştirildiğinde, okumalar X yönünde gerçekleşmelidir.

Kalibre edilmiş kare, YZ düzlemine paralel olan ikinci ölçüm konumuna yerleştirildikten sonra, harici gösterge kurulumu ve hizalaması gerektiği gibi tekrarlanır. Bu aşamada sıfır noktası ile kare üzerindeki beş ölçüm noktası tamamlanır ve okumalar Y yönünde olmalıdır.

On ölçümün tamamı için, her bir ölçüm sonucunun sıfır noktası ile karşılık gelen ölçüm sonucu arasındaki fark hesaplanmaktadır. Bu farklar, karenin belirlenen değerlerini temsil etmektedir. Kare ölçüm hatası, ESQ, her bir ölçüm noktası için belirtilen değer ile kare üzerindeki her bir ölçüm noktasının kalibre edilmiş değeri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Kalibre edilmiş değer, kare üzerindeki ölçüm noktasının geleneksel gerçek değeri olarak kabul edilmektedir.

Eğer ölçülen sıfır noktası, cihazın kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıfır noktasına uymuyorsa, karenin kalibre edilmiş değerlerinde gerekli düzeltmeler yapılmalıdır. Kalibre edilmiş karenin belirli bir ölçümünün belirtilen değeri, CMM

tarafından sistematik hatalar veya CMM'in bu amaçla kullanılan aksesuar cihazları varsa termal olarak indüklenen hatalar (termal genleşme dahil) dikkate alınarak düzeltilebilir. Bilgisayar çıktısından elde edilen sonuçların manuel olarak düzeltilmesi, çevre koşullarının 4.6.3'deki şartları sağlaması durumunda sıcaklık veya diğer düzeltmelerin dikkate alınmasına İzin verilmemelidir.

4.6.2.2. Uzunluk ölçüm hatasının tekrarlanabilirlik aralığı, RB veya RU

Tekrarlanan üç ölçüm seti için, bu ölçümlerin her birinde gerçekleştirilen üç uzunluk ölçümünün aralığını değerlendirerek ilgili tekrarlanabilirlik aralığını, RB veya RU, hesaplanır. Tüm tekrarlanabilirlik aralığı değerlerini, izin verilen maksimum limitin (MPL) belirtilen biçimiyle uyumlu olarak gösterildiği şekilde belirtilmelidir.

4.6.2.3. Problama performansı,PF2D

Problama hatasının değerlendirilmesi için kullanılan yöntem, ölçüm yapılan noktaların Gauss ilişkili dairenin merkezine olan uzaklık aralığını belirleyerek, CMM'in belirtilen maksimum izin verilen problama hatası, PF2D ve MPE çerçevesinde ölçüm yapma yeteneğini tespit etmektir.

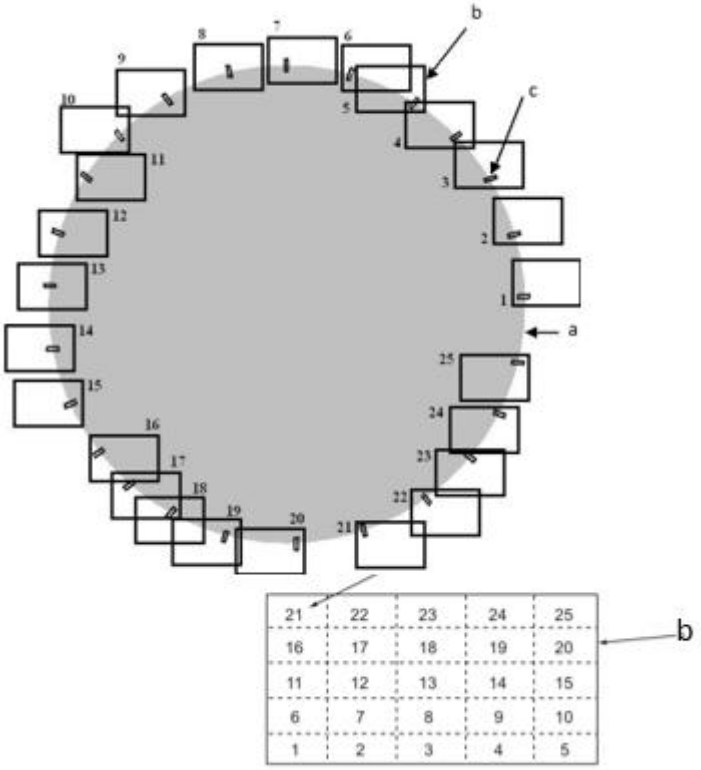
Test dairesinin nominal çapı, görüş alanının en küçük ekseninin en az %150'si kadar olmalı, ancak 51 mm'den fazla olmamalıdır. Test çemberinin şeklinin kalibre edilmesi gerekmektedir; çünkü şekil sapması test sonuçlarını etkileyebilir ve spesifikasyona uygunluk veya uygunsuzluk durumunda dikkate alınmalıdır.

25 nokta ölçüp kaydedilir. Noktalar, tam daire etrafında yaklaşık olarak eşit bir şekilde yerleştirilmelidir (her biri yaklaşık 14,4 derecede bir). Her bir nokta, tek bir ölçüm penceresi ile alınmalıdır. Noktaların yerleşimi, aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurularak kullanıcının tercihine bağlı olmalıdır.

CMM, 25 farklı görüş alanı için tüm ölçüm noktaları arasında hareket etmelidir. Görüş alanları arasında belirli bir çakışmaya İzin verilir, ancak ölçüm pencereleri aynı

görüş alanında üst üste gelmemelidir. 25 ölçüm penceresi, tüm görüş alanına eşit şekilde dağıtılmalıdır. Noktalar arasında odaklanmaya müsaade edilir.

Şekil 4.15, bu maddenin gerekliliklerini karşılayabilecek birçok olasılıktan birini gösteren bir modeli temsil etmektedir ve varsayılan ya da zorunlu bir model olarak değerlendirilmemelidir. Şekil 4.15'de, test dairesi üzerindeki görüş alanının konumu ile test penceresinin görüş alanındaki konumu arasındaki ilişki, gerekli 25 noktadan biri olan 21. nokta için vurgulanmıştır.



Şekil 4.14. PF2D'yi ölçmek için tüm görüş alanı boyunca 25 ölçüm noktasının İzin verilebilir bir modeli ve olası dağılımı

Şekil 4.14'te; a test çemberini, b görüş alanını ve c ise ölçüm penceresini göstermektedir. 25 ölçümün tamamını kullanarak Gauss ilişkili dairenin hesaplamasını yapılır. Her bir ölçüm için, 25 ölçümün her birine ait Gauss radyal mesafesi R'nin belirlenmesi gerekir. Problama hatasını, PF2D olarak, 25 Gauss radyal mesafesinin aralığı olan Rmax - Rmin değerleri üzerinden hesaplanır.

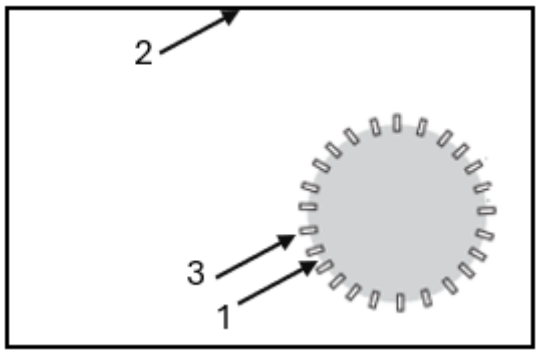
Problama hatasının değerlendirilmesi için kullanılan yöntem, ölçülen noktaların Gauss ilişkili dairenin merkezine olan mesafelerinin aralığını tespit ederek, CMM'in

belirtilen maksimum İzin verilen problama hatası, PFV2D ve MPE çerçevesinde ölçüm yapma yeteneğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Test dairesinin nominal çapı, görüş alanının en küçük ekseninin % 10 ile % 30'u arasında olmalıdır. Form sapması, test r'sini etkilediğinden, test çemberinin şeklinin kalibre edilmesi gerekmektedir.

Görüntüleme problama sistemi konfigürasyonunu ve test çemberinin montaj konumunu belirtilen sınırlar içinde herhangi bir yerde olabilir. Problama sisteminin, üreticinin standart prosedürlerine uygun olarak kurulması ve nitelendirilmesi gerekmektedir. Test dairesi, görüntüleme probunun odak düzlemine nominal olarak paralel bir şekilde yerleştirilmelidir. 25 ölçüm noktası alınmalı ve kaydedilmelidir. Bu noktalar, tam daire etrafında yaklaşık olarak eşit bir şekilde dağıtılmalıdır (yaklaşık her 14,4 derecede bir). Noktaların konumu, aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurularak belirlenmelidir:

- Görüntüleme problama sisteminin görüntüsü içindeki test dairesinin konumu, kullanıcının tercihine bağlıdır. Şekil 4.15, isteğe bağlı bir konumu göstermektedir. Test için yalnızca bir pozisyon seçilmelidir. Şekil 4.15'deki test dairesinin konumu, bu maddenin gerekliliklerini karşılayacak birçok olasılıktan sadece biridir ve varsayılan ya da zorunlu bir konum olarak değerlendirilmemelidir.
- Görüş alanındaki ölçüm pencereleri birbirinin üzerine gelmemelidir.
- 25 farklı ölçüm penceresi kullanılmalıdır.
- CMM, ölçüm noktaları arasında hareket ettirilmemelidir.

25 ölçümün tamamını kullanarak Gauss bağlantılı daire hesaplanır. Her bir 25 ölçüm için Gauss radyal mesafesi R belirlenir. Tarama hatası (PFV2D), 25 Gauss radyal mesafesinin (Rmax − Rmin) farkı olarak hesaplanır.



Şekil 4.15. Görüş alanı içindeki test dairesinin İzin verilen konumu

Şekil 4.16'te; 1 test çemberini, 2 görüş alanını ve 3 ise ölçüm penceresini göstermektedir.

4.6.3. Spesifikasyonlara uygunluk

Görüntüleme problarıyla donatılmış CMM'nin performansı, aşağıdaki koşullar altında doğrulanmaktadır:

- Uzunluk ölçüm hataları (EB veya EU değerleri), imalatçı tarafından çizimde belirtilen şekilde, uzunluk ölçümünün izin verilen maksimum hatası (EB, MPE veya EU, MPE) sınırları içinde olmalıdır.
- Karşılık gelen tekrarlanabilirlik aralığı (RB veya RU değerleri), üretici tarafından grafikte gösterildiği gibi, tekrarlanabilirlik aralığının (RB, MPL veya RU, MPL) ilgili maksimum izin verilen sınırları içinde olmalıdır.
- Problama hatası (PF2D değerleri), imalatçı tarafından belirtilen şekilde, problama hatasının izin verilen maksimum hatası (PF2D, MPE) sınırları içinde olmalıdır.
- Ayrıca, görüntüleme probunun problama hatası (PFV2D değerleri) ve görüntüleme probu uzunluğu ölçüm hatası (EBV veya EUV değerleri), ilgili yönetmelik tarafından belirlenen maksimum izin verilen hatalar dahilinde olmalıdır.
- XY uzunluğu ölçüm hataları (EBXY veya EUXY değerleri), üretici tarafından belirtilen uzunluk ölçümüne ilişkin izin verilen maksimum hatalar (EBXY, MPE veya EUXY, MPE) dahilinde olması gerekmektedir.
- Z uzunluğu ölçüm hataları (EBZ veya EUZ değerleri) ise, imalatçı tarafından belirtilen uzunluk ölçümünün maksimum izin verilen hataları (EBZ, MPE veya EUZ, MPE) dahilinde olması gerekmektedir.
- Karelik hatalar (ESQ değerleri) ise, imalatçı tarafından belirlenen karelik hatasının (ESQ, MPE) izin verilen maksimum hatası dahilinde olması gerekmektedir.
- Tarama hataları (PF2D değerleri), imalatçı tarafından belirtilen tarama hatasının (PF2D, MPE) izin verilen maksimum hata sınırları içinde olduğu belirtilmelidir.
- Ayrıca, görüntüleme probunun problama hatası (PFV2D değerleri) ve görüntüleme probu uzunluğu ölçüm hatasının (EBV veya EUV değerleri) ilgili yönetmelik tarafından belirlenen maksimum izin verilen hatalar dahilinde olması gerekmektedir.

Sınırlı iki ve üç boyutlu ölçüm kapasitesine sahip görüntüleme probu CMM'leri için üreticinin spesifikasyonları EB, MPE, EU, MPE, EBZ, MPE, EUZ, MPE veya ESQ, MPE'yi içermeyebilir. Bu durumlarda, görüntüleme probu CMM'nin doğrulanması bu testleri gerektirmemektedir.

EB veya EU için, 4.6.4 maddesi gereğince tekrarlanan üç ölçümden oluşan 35 setinden en fazla beşinde uzunluk ölçüm hatasının üç değerinden biri uygunluk bölgesinin dışında kalabilir. EBZ veya EUZ için, 4.6.4'e dayanarak tekrarlanan üç ölçümden oluşan beş setten en fazla birinde uzunluk ölçüm hatasının üç değerinden biri uygunluk bölgesinin dışına çıkabilir.

EBXY veya EUXY için, 4.6.5 uyarınca tekrarlanan üç ölçümden oluşan 20 setinden en fazla üçünde uzunluk ölçüm hatasının üç değerinden biri uygunluk bölgesinin dışında olabilir. EBV veya EUV için, 4.6.5'e göre tekrarlanan üç ölçümden oluşan 20 setinin en fazla üçünde uzunluk ölçüm hatasının üç değerinden biri uygunluk bölgesinin dışına çıkabilir. Uygunluk bölgesinin dışında kalan her bir ölçüm ilgili konumda üç kez yeniden ölçülmelidir.

Tekrarlanan üç ölçümden elde edilen kalibre edilmiş bir test uzunluğunun gösterge hatalarının tüm değerleri uygunluk bölgesi içinde ise, CMM'nin o konumdaki performansı doğrulanmış olur. EB veya EU için, kalibre edilmiş bir test uzunluğu 4.6.5'e göre yeniden ölçüldüğünde, tekrarlanan üç ölçümün aralığı, o konumda karşılık gelen RB veya RU'yu belirlemek amacıyla kullanılmalı ve üç orijinal ölçüm geçersiz sayılmalıdır.

Doğrusal boyutları ölçmek amacıyla kullanılan CMM'in performansı, 3.6.5'te belirtilen tüm test sonuçları, 3.6.5'te tanımlanan ilgili maksimum İzin verilen hatalardan ve maksimum İzin verilen sınırlardan daha büyük değilse, doğrulanmış olarak kabul edilir.

4.6.4. Uygulamalar

Bir üretici ile bir kullanıcı arasındaki satın alma sözleşmesi, bakım sözleşmesi, onarım sözleşmesi, yenileme sözleşmesi veya yükseltme sözleşmesi olduğunda tanımlanan kabul testi, üretici ve kullanıcı arasında mutabık kalınan maksimum İzin verilebilir hatalar ile maksimum izin verilebilir sınırlar doğrultusunda, görüntüleme probları ile donatılmış CMM'nin performansını doğrulamak amacıyla bir test olarak kullanılabilir. Üretici, belirtilen maksimum İzin verilebilir hatalar ve maksimum İzin verilebilir sınırlar için geçerli olan ayrıntılı kısıtlamaları belirleme yetkisine sahiptir. Eğer böyle bir spesifikasyon mevcut değilse, belirtilen maksimum izin verilebilir hatalar ve maksimum İzin verilebilir limitler, CMM'in ölçüm hacmindeki her konum ve yön için geçerli kabul edilir.

Bir kuruluşun iç kalite güvence sisteminde, bu bölümünde tanımlanan performans doğrulaması, kullanıcı tarafından belirlenen maksimum izin verilen hatalar ve sınırlar çerçevesinde doğrusal boyutları ölçmek amacıyla kullanılan CMM'in performansını doğrulamak için bir test olarak uygulanabilir. Kullanıcı, aşağıda belirtilen değerleri tanımlayarak, izin verilen maksimum hatalar ve sınırlar için geçerli sınırlamalar belirleyebilir.

4.6.5. Görüntülü Probu Olan CMM'lerin Avantajlar

CMM sistemlerinde görüntülü prob (optical veya vision prob), temas gerektirmeyen optik algılama prensibiyle çalışan ve özellikle hassas, küçük boyutlu veya temasla ölçümü zor olan yüzeylerin kontrolünde kullanılan bir ölçüm bileşenidir. Bu tür problar, yüksek çözünürlüklü kamera, optik büyütme sistemi ve görüntü işleme algoritmaları kullanarak kenar, kontur ve profil bilgilerini yüzeye fiziksel temas olmadan algılar. Bu özellikleri sayesinde görüntülü problar, geleneksel temaslı problarla ölçülmesi güç olan mikro geometrilerin ve hassas yüzeylerin kontrolünde önemli bir avantaj sağlar.

Optik prob kullanımının en belirgin faydalarından biri, temas kuvvetinin ortadan kalkmasıdır. Temaslı ölçümde prob ucu ile yüzey arasındaki kuvvet, özellikle ince cidarlı, esneyebilir veya hassas işlenmiş parçaların ölçümünde istenmeyen

deformasyonlara neden olabilir. Görüntülü prob ise yüzeye dokunmadan veri topladığı için bu tür yüzeylerde ölçüm doğruluğunu artırır ve ölçüm kaynaklı deformasyon riskini tamamen ortadan kaldırır. Ayrıca ince kenarlar, mikro kanallar, küçük delik ağızları, plastik yüzeyler ve optik bileşenler gibi temasla zarar görebilecek bölgelerde optik ölçüm açık bir avantaj sunar.

Görüntülü probların bir diğer önemli yararı, özellikle küçük ve karmaşık detayların hızlı şekilde ölçülebilmesidir. Görüntü tabanlı kenar tespiti, temaslı probla noktasal temas almaktan çok daha kısa sürede sonuç verir ve yüksek nokta yoğunluğu sayesinde kontur verileri daha detaylı elde edilir. Bu nedenle elektronik bileşenler, tıbbi cihaz parçaları, hassas kalıp elemanları ve mikro işlenmiş yüzeyler gibi yüksek çözünürlüklü ölçüm gerektiren parçalar için optik prob sistemi oldukça verimlidir.

Optik problar aynı zamanda hibrit CMM sistemlerinde temaslı problarla birlikte kullanılarak ölçüm esnekliğini artırır. Temaslı problar, makro ölçülerde geometrik konum ve form ölçümleri için kullanılırken, görüntülü prob daha ince detayların ölçümünde devreye girer. Bu sayede tek makine üzerinde hem temaslı hem de temassız ölçüm yöntemleri bir arada kullanılabilir ve ölçüm stratejisi parçanın gereksinimlerine göre uyarlanabilir.

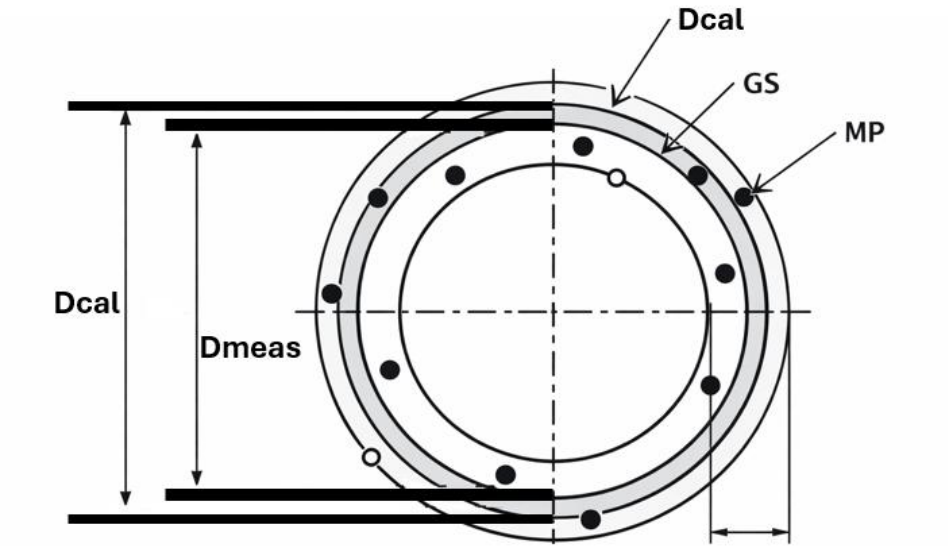
Bununla birlikte görüntülü prob her uygulama için uygun değildir. Yüksek yüzey yansımaları, düşük kontrastlı yüzeyler veya derin delikler gibi optik algılamayı zorlaştıran geometrilerde temaslı prob daha güvenilir sonuç verebilir. Ayrıca optik sistemlerin ölçüm doğruluğu, görüntü kalitesi ve ışıklandırma koşullarına bağlı olduğundan uygun aydınlatma kontrolü önemlidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde görüntülü prob kullanılan CMM'ler, özellikle hassas kontur ölçümü, küçük parçaların analizi ve temassız ölçüm gerektiren uygulamalarda ölçüm kalitesini ve verimliliğini önemli ölçüde artıran bir çözüm sunar.

4.7. Optik Sensör'ü Olan CMM'ler

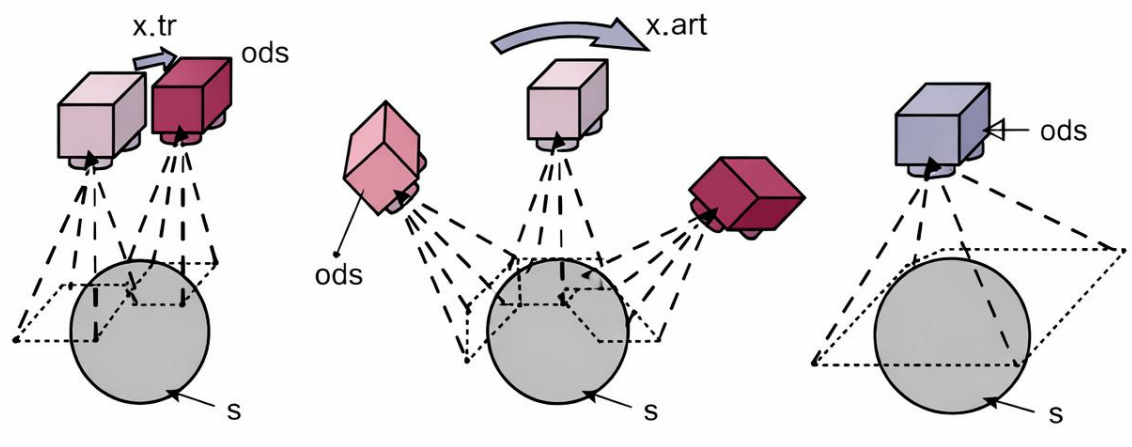
Bu bölümde, optik mesafe sensörlerine sahip Kartezyen CMM'lerin performansını doğrulamak amacıyla kabul testlerinin nasıl yapılacağı anlatışmıştır.

Ayrıca, CMM'in performansını düzenli olarak yeniden doğrulamasını sağlayan yeniden doğrulama testlerini de anlatılmıştır. (ISO 10360-8, 2013)



Şekil 4.16. Küre

Dcal : test küresinin kalibre edilmiş çapı
Dmeas : test küresinin ölçülen çapı
GS : Gaus İlişkili Küre
MP : Ölçülen Noktalar



a. Çeviri b. Eklemli c. Sabit

Şekil 4.17. Tr, Art ve St çizimi

4.7.1. Metrolojik özellikler için gereklilikler

Ölçüm sırasında izin verilen çevresel koşullara dair sınırlar, ölçümleri etkileyen kurulum yerindeki sıcaklık, hava nemi, titreşim ve ortam aydınlatması gibi faktörler göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Üreticinin CMM veri sayfasında belirtilen limitler çerçevesinde testin gerçekleştirileceği çevresel koşulları seçilebilir. Eğer ortam spesifikasyonları karşılamıyorsa, İzin verilen maksimum hataların doğrulanması gerekmemektedir.

CMM, testleri gerçekleştirirken imalatçının kullanım kılavuzunda verilen prosedürler kullanılarak çalıştırılmalıdır. Üretici kılavuzunda uyulması gereken belirli alanlar şunları içerir:

a) makine başlatma/ısınma döngüleri,
b) sistem yeterliliğinin araştırılması,
c) kalibrasyon öncesinde prob sisteminin termal stabilitesi,
d) termal sensörlerin konumu, türü, sayısı ve
e) yazılım filtresi.

Tarama formu hatası, imalatçı ve kullanıcı tarafından belirtildiği gibi, İzin verilen maksimum tarama formu hatasını aşmamalıdır ve mikrometre cinsinden ifade edilmelidir.

Tarama dağılım değeri, PForm, tarama dağılım değerinin İzin verilen maksimum sınırı imalatçı ve kullanıcı tarafından belirlenen değerleri aşmamalıdır ve mikrometre cinsinden ifade edilmelidir. Üreticiler, kendi takdirlerine bağlı olarak, özel çalışma koşulları için isteğe bağlı olarak PForm'un ek özelliklerini belirtebilirler.

Problama boyutu hatası, Psize, imalatçı ve kullanıcı tarafından belirlenen İzin verilen maksimum problama boyutu hatasını aşmamalıdır ve mikrometre cinsinden ifade edilmelidir. Üreticiler, kendi takdirlerine bağlı olarak, özel çalışma koşulları için isteğe bağlı olarak Psize'nin ek özelliklerini belirtebilirler.

Uzunluk ölçüm hatası, imalatçı ve kullanıcı tarafından belirlenen İzin verilen maksimum uzunluk ölçüm hatasını aşamaz ve mikrometre cinsinden ifade edilmelidir. Üreticiler, kendi takdirine bağlı olarak, özel çalışma koşulları için isteğe bağlı olarak ek özellikler belirtebilirler.

Düz form ölçüm hatası, imalatçı ve kullanıcı tarafından belirlenen İzin verilen maksimum düz form ölçüm hatasını aşamaz, ve mikrometre cinsinden ifade edilmelidir. Üreticiler, kendi takdirine bağlı olarak, özel çalışma koşulları için isteğe bağlı olarak ek özellikler belirtebilirler.

Uzunluk ölçüm hatası, CMM'nin performansının değerlendirildiği maksimum iş parçası kütlesine kadar yüklendiğinde, imalatçı tarafından belirlenen İzin verilen maksimum hatayı aşmamalıdır. Uzunluk ölçüm hatasının testi, aşağıdaki şartlara bağlı olarak kullanıcı tarafından seçilen herhangi bir iş parçası yükü altında gerçekleştirilebilir:

- Test için sağlanan yükün fiziksel hacmi, CMM'nin ölçüm hacmi içinde yer almalı ve yük, serbest bir şekilde durmalıdır;
- İmalatçı, CMM desteği yüzeyinde ve/veya bireysel nokta yüklerinde (kg/cm2) birim alan başına maksimum yük (kg/m2) için bir sınır belirleyebilir; Nokta yükleri için, herhangi bir spesifik temas noktasındaki yük, diğer herhangi bir temas noktasındaki yükün iki katını geçmemelidir;
- İmalatçı tarafından aksi belirtilmediği sürece, yük, CMM tablasının yaklaşık merkezi ve simetrik bir şekilde yerleştirilmelidir.

4.7.2. Kabul testleri ve yeniden doğrulama testleri

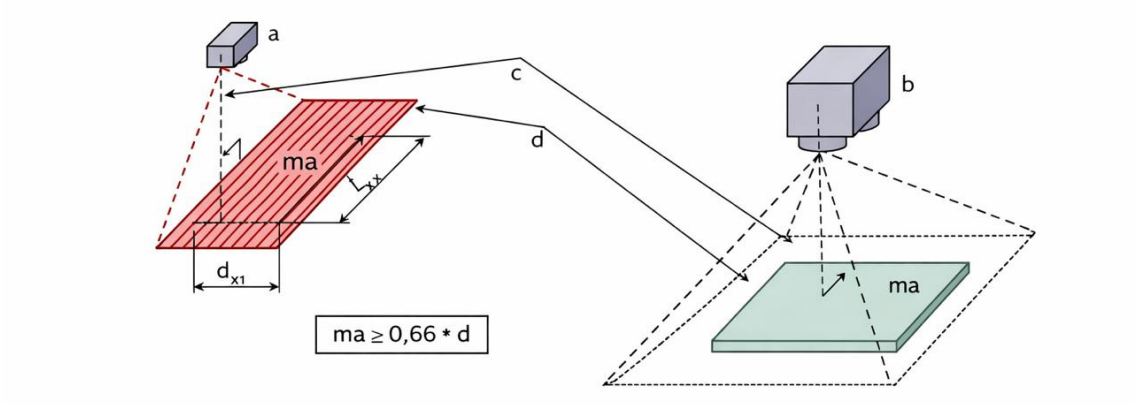
Kabul testleri imalatçının spesifikasyonlarına ve prosedürlerine göre yürütülmelidir.Yeniden doğrulama testleri kullanıcının spesifikasyonlarına ve imalatçının prosedürlerine göre gerçekleştirilmelidir.

Tarama hataları ve limitleri için değerlendirme yönteminin temel prensibi, optik mesafe sensörüne sahip CMM'nin belirlenen maksimum izin verilen tarama hataları ve limitler çerçevesinde ölçüm yapma yeteneğini tespit etmektir.

Problama hatasının ve değerinin tespitinde seramik veya çelik malzeme standartları kullanılmaktadır. Bununla birlikte, diğer uygun malzemelere de İzin verilmektedir. Seçilen malzeme, yansıtma, optik nüfuz derinliği (hacim saçılımı), renk, saçılma özellikleri gibi çeşitli optik özelliklere sahip olabilmelidir; bu durum, problama hatalarının değerlerinin ve doğrulanacak değerlerin değişkenlik gösterebileceği anlamına gelmektedir. İncelenen malzeme standartlarının pürüzlülüğü, ilgili MPE'lere veya MPL'ye göre ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır. Üreticinin malzeme ve malzeme standardının yüzeyine dair bir tanım yapmadığı durumlarda, bu seçim serbestçe yapılmalıdır.

Test küresinin boyutu, varsayılan olarak 10 mm ile 51 mm çapında olmalıdır. Eğer test küresinin boyutu sensör alanına göre oldukça küçükse (bkz. Şekil 4.17), yakalanan noktaların sayısı yetersiz kalabilir ve sensörün distorsiyonu değerlendirilemeyebilir. Test küresindeki ölçüm alanı, sensör alanının % 66'sından daha az olduğunda, yerel bir test düzlüğü de ölçülmelidir. Üretici ve kullanıcının büyük küre kullanımı konusunda mutabakata varması durumunda, yerel test düzlüğü yerine çapı 51 mm'den büyük bir küre tercih edilebilir. Yerel test düzlüğündeki veya daha büyük test küresindeki ölçüm alanı, sensör alanının en az % 66'sını kapsamalıdır.

Çapı 10 mm ile 51 mm arasında değişen test küresi, problama şekli hatası, problama dağılım değeri, problama boyutu hatası ve problama boyutu hatasını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Yerel test düzlüğü ve daha büyük test küresi, problama şekli hatası ile problama dağılım değerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Eğer şekil 4.18'da gösterilen çizgi tarama veya nokta tarama sensörleri test ediliyorsa, yerel test düzlüğünün kısa kenar uzunluğu, en azından prob testi için kullanılan kürenin normal çapı kadar olmalıdır.



a- Çizgi tarama veya nokta tarama sensörü örneği b. İki boyutlu görüntü yansıtma sensörü örneği

Şekil 4.18. Ölçüm alanı ile sensör alanı arasındaki ilişki (ISO 10360-8, 2013)

Lx1 : çizgi tarama veya nokta tarama sensörü durumunda test düzlüğünün daha kısa uzunluğu

Lx2 : Çizgi tarama veya nokta tarama sensörü durumunda daha uzun test düzlüğü uzunluğu

Ma : ölçüm alanı sensör alanının en az % 66'sı

a : çizgi tarama veya nokta tarama sensörü

b : iki boyutlu görüntü yansıtma sensörü

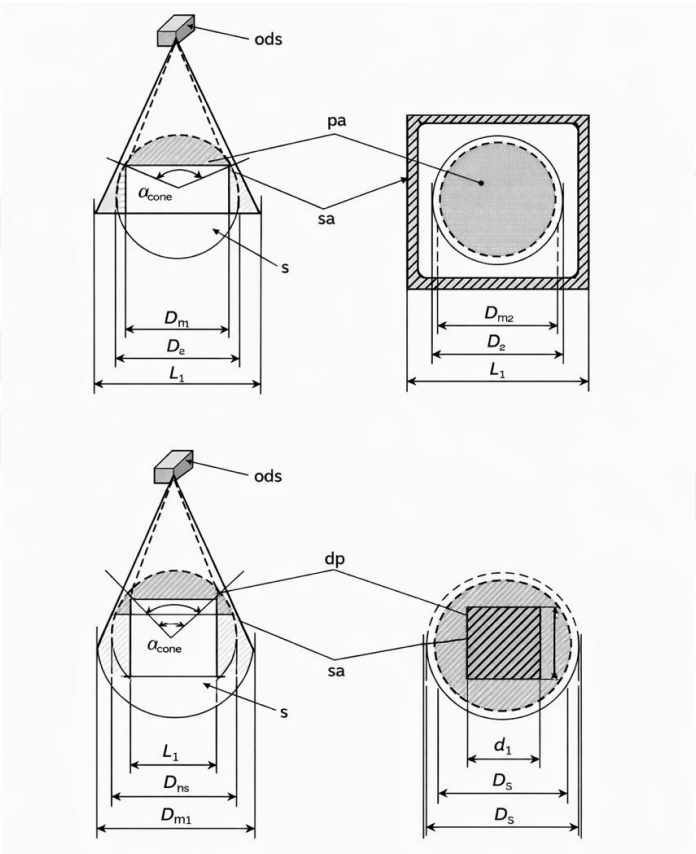
c : sensörü ekseni

d : sensör alanı

Test küresinin yüzey alanı ölçülmeli ve (Şekil 4.19) ölçüm yapılan alan, imalatçı tarafından tanımlanan kürenin en geniş koni açısını kapsamalıdır. Seçilen noktaların bulunduğu küre bölgesinin koni açısı, veri sayfasında yer almalıdır. Sonrasında test düzleminin yüzey alanı ölçülmeli ve ölçüm yapılan alan, üretici tarafından belirtilen sensör alanı içindeki en geniş alan olmalıdır. Seçilen noktaların bulunduğu dairenin ölçülen alanı, veri sayfasında belirtilmelidir.

Optik mesafe sensörleri ile donatılmış CMM'ler için değerlendirilen veri noktalarının sayısındaki farklılık, test sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Eğer yazılımın başka bir yüzeye ait noktaları kaldırmaya yönelik otomatik bir işlevi mevcutsa, bu işlev kullanılabilir. Değerlendirilen noktaların manuel olarak seçilmesi,

normal çalışma prosedürünün bir parçası ise; başka bir yüzeye ait noktaların çıkarılması durumunda, bu veri seçimi veri sayfasında belirtilmeli ve deney sırasında gerçekleştirilmelidir. Otomatik veya manuel seçimle elenenler dışındaki tüm ölçüm verileri kullanılmalıdır. Otomatik veya manuel veri seçimi, aykırı değerlerin ortadan kaldırılması amacıyla kötüye kullanılmamalıdır. Kullanıcının verilerin ortadan kaldırılması konusunda yeterli bilgiye sahip olması teşvik edilmektedir; optik mesafe sensörünün özellikleri, test küresi yüzeyinin optik özellikleri, ortam aydınlatması ve filtre algoritması dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.19. Test küresindeki ölçüm alanı ve raporlanacak koni açısı (ISO 10360-8, 2013)

Ls : projeksiyon çizgisinin uzunluğu

Dprj : test küresi üzerinde öngörülen ölçüm alanının çapı

Θ : koni koni açısı

Ods : optik mesafe sensörü

s : test küresi

sa : sensör alanı

pa : test küresi üzerinde öngörülen ölçüm alanı

Test küresindeki veya yerel test düzlüğündeki ölçüm alanlarından 25 alan seçilerek, her bir alan için temsili bir nokta oluşturulmalıdır. Bu alanlar, tüm ölçüm noktalarını kapsayacak şekilde yaklaşık eşit bir dağılım ile yerleştirilmelidir.

Bu tezin diğer bölümlerinde belirtilen karşılaştırılabilirlik açısından, problama formu hatası veya problama boyutu hatası test edilirken yalnızca bir nokta alınmalıdır. Eğer alan ölçüm sensörleri (örneğin nokta tarama, çizgi tarama, saçak projeksiyonu) ile donatılmış bir CMM test ediliyorsa, ölçülen noktalardan 5 mm²'den büyük olmayan bir alana indirgenmiş bir nokta, temsili nokta olarak kullanılmalıdır. Bu alan, temsili bir noktanın türetilmesi için kullanılan tüm veri noktalarını kapsayan dairesel veya kare bir çevre ile sınırlanmalıdır. Eğer 5 mm²'den büyük olmayan alanın teknik nedenlerden dolayı uygulanabilir olmadığı kabul edilirse, karşılıklı anlaşma ile daha büyük bir alan kullanılabilir ve bu alanın büyüklüğü veri sayfasında belirtilmelidir.

4.5.2'te belirtilen 25 konum, test küresi üzerinde gerçekleştirilen testlerde, test küresinin 25 alanının merkez noktaları olarak önerilmektedir. Eğer bireysel noktaları ölçen bir sensörle donatılmış bir CMM kullanılırsa, 4.5.2'te belirtilen prosedür doğrultusunda bu 25 nokta ölçülmelidir. Sensör, yarım küreyi tam olarak ölçemiyorsa, ölçülebilir koni açısı üretici tarafından tanımlanabilir. Noktaların yer aldığı küre bölgesinin koni açısı, veri sayfasında belirtilmelidir. Üretici, özel çalışma koşulları için ek filtreler belirleme hakkına sahiptir. MPE'lerin belirlenmesi veya test edilmesi sırasında, test malzemesi standardına dair bilgi gerektiren filtrelerin kullanılması mümkün değildir.

25 temsili noktanın tamamını kullanarak, kısıtlamasız Gauss (yani en küçük kareler) ile ilişkili bir küre hesaplanır. Her bir temsili nokta için Gauss radyal mesafesi, r, hesaplanır. 25 temsili noktanın en küçük kareler küre merkezine göre Gauss radyal mesafeleri aralığını, yani görünür küre formunu kaydedilir; bu, r max - r min olarak ifade edilir. Bu farkın mutlak değeri gözleme formu hatasıdır, PForm. 25 temsili noktanın tamamını kullanarak, kısıtlamasız Gaussian (yani en küçük kareler) ile ilişkili düzlemi hesaplanır. Her bir temsili nokta için Gauss normal mesafesi (d) belirlenir. En küçük kareler düzlemine göre 25 temsili noktanın Gauss normal mesafelerinin aralığı kaydedilir; bu, dmax - dmin şeklinde ifade edilir. Bu farkın mutlak değeri, araştırma formu hatasını temsil etmektedir.

Tarama formu hatası için kullanılacak olan 25 temsili nokta aynen uygulanmalıdır. Küre üzerinde temsili bir nokta belirlemek amacıyla her alanda ölçülen noktaların Gauss ile ilişkili bir küreye yerleştirilmesi önerilmektedir. 25 temsili noktanın tamamı kullanılarak, Gauss ile ilişkili küre, yarıçapı sınırsız olacak şekilde en küçük kareler yöntemi ile belirlenmektedir. Tarama boyutu hatası, $P_{size.Sph.1x25:j:ODS}$, kürenin ölçülen çapı D ile kalibre edilmiş çapı Dcal arasındaki farktan aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{size.Sph.1x25:j:ODS} = D_{meas} - D_{cal} \qquad (4.1)$$

Bireysel ayrı noktaları ölçen bir sensörle donatılmış bir CMM kullanıldığında, izin verilen maksimum hata ve nokta bulutuna göre sınırların belirlenmesi ile testlerin gerçekleştirilmesine gerek kalmaz. Filtrelemenin üretici tarafından belirlenen normal çalışma koşullarının bir parçası olup olmadığına bakılmaksİzin, deney, kullanıcı tarafından seçilebilen yazılım filtrelemesi olmaksİzin yapılmalıdır. Üretici, isteğe bağlı olarak, belirtilen türde filtrelemenin uygulandığı durumlar için nokta bulutu aracılığıyla problama özelliklerine dair ek spesifikasyonlar sunabilir.

Ölçülen tüm noktaların % 95'ini kapsayan küresel kabuğun genişliği belirlenir. Bu aralık, çalışma dağılım değeri olarak tanımlanır. Yerel test düzlüğü kullanıldığında, ölçülen tüm noktaların % 95'inin dahil olduğu Gauss ilişkili düzlemden normal mesafelerin aralığını hesaplanmalıdır. Test küresi için alınan tüm ölçüm noktaları, yarıçapı sonsuz olan Gauss küresi ile ilişkilendirilir. Tarama boyutu hatası, All, Psize, kürenin ölçülen çapı Dmeas ile kalibre edilmiş çap Dcal arasındaki fark kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

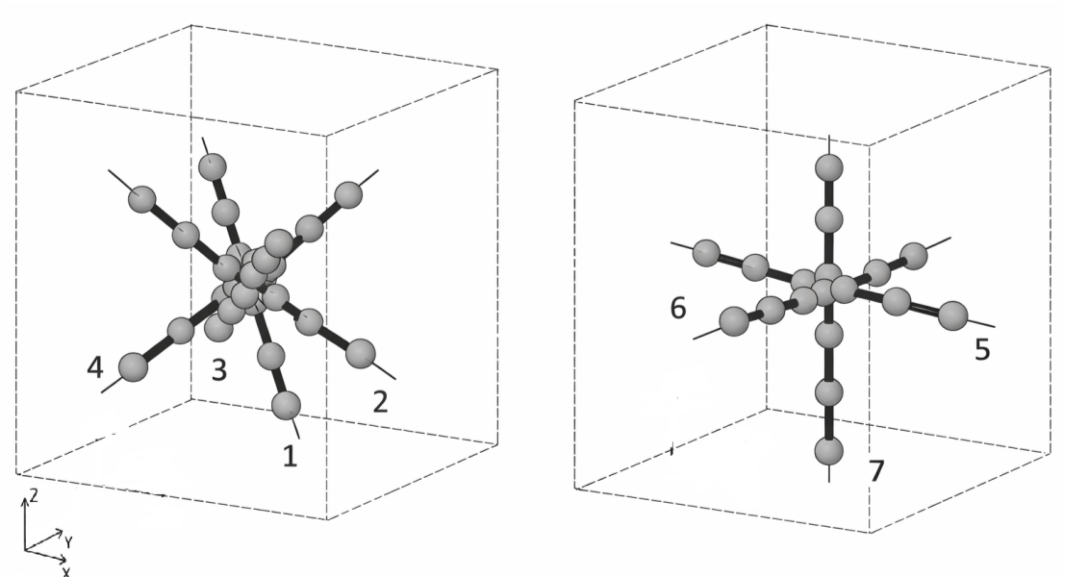
$$P_{size.Sph.All:j:ODS} = Dmeas - Dcal. \qquad (4.2)$$

Uzunluk ölçüm hatasının değerlendirilmesi için kullanılan yöntem, optik mesafe sensörleriyle donatılmış CMM'nin belirlenen maksimum izin verilen uzunluk ölçüm hatası sınırları içinde ölçüm yapma yeteneğini belirlemeye yöneliktir. Eğer CMM, dokunsal veya görüntü prob sistemleri gibi farklı bir prob sistemi ile donatılmışsa, uzunluk ölçüm testi, üretici tarafından belirtilen prob sistemlerinden biri kullanılarak

gerçekleştirilmelidir. Sadece optik sensörlerin mevcut olduğu durumlarda ise, bu bölümünde tanımlanan uzunluk ölçüm hatası testi uygulanmalıdır.

Yansıma faktörü, optik nüfuz derinliği (hacim saçılımı), renk, saçılma özellikleri gibi çeşitli optik özellikler, uzunluk ölçüm hatalarının değerlerinin ve doğrulanacak değerlerin değişkenlik gösterebileceğini ifade etmektedir. İncelenen özelliklerin pürüzlülüğü, uzunluk testinin İzin verilen maksimum hatasına göre göz ardı edilebilecek kadar küçük olmalıdır. Üreticinin malzeme ve malzeme standardının yüzeyini belirtmediği durumlarda, bu seçim isteğe bağlı olarak yapılabilir. Kullanıcı, kalibre edilmiş test uzunluğunu sağlamadığı sürece, kalibre edilmiş test uzunluğunu temsil eden malzeme standardını seçme hakkına sahiptir. Her bir konum için en uzun kalibre edilmiş test uzunluğu, kalibre edilmiş test uzunluğu boyunca bir ölçüm hattı boyunca CMM'nin maksimum hareketinin en az % 66'sını kapsamalıdır. Bu nedenle, bir gövde köşegeni boyunca yerleştirilen minimum izin verilen en uzun kalibre edilmiş test uzunluğu, bir eksen yönü boyunca yerleştirilen minimum izin verilen en uzun kalibre edilmiş test uzunluğundan daha uzun olmalıdır.

CMM'nin ölçüm hacmindeki yedi farklı konumun her birine beş adet kalibre edilmiş test uzunluğu yerleştirilmelidir. Her bir uzunluk, toplamda 105 ölçüm elde etmek amacıyla üç kez ölçülmelidir. Yedi pozisyondan dördü, Çizelge 4.18 ve Şekil 4.22'de gösterildiği üzere uzay köşegenleri olarak belirlenmiştir. Kullanıcı, kalan üç pozisyonu seçme hakkına sahiptir; varsayılan konumlar ise Çizelge 4.18'de belirtildiği gibi CMM eksenlerine paralel konumlandırılmıştır. Çizelge 4.18 ve Şekil 4.20'deki düzenlemeler dışında farklı düzenlemeler, karşılıklı mutabakat ile kabul edilebilir ve bu durumda düzenleme veri sayfasına kaydedilmelidir. Problama sisteminin kurulumu ve kalifikasyonu, imalatçının standart prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Yazılımın başka bir yüzeye ait noktaları kaldırmaya yönelik otomatik bir işlevi mevcutsa, bu işlev kullanılabilir. Eğer değerlendirilen noktaların manuel seçimi normal çalışma prosedürünün bir parçasıysa ve başka bir yüzeye ait noktalar varsa, bu veri seçimi veri sayfasında belirtilmeli ve deney sırasında uygulanmalıdır. Hem otomatik hem de manuel veri seçimi, gürültü veya aykırı değerlerin ortadan kaldırılması amacıyla kötüye kullanılmamalıdır.



Şekil 4.20. Gerekli dört çapraz konum ve koordinat sisteminin eksenleri boyunca varsayılan üç konum

Çizelge 4.18. Ölçüm hacmindeki yönelim

Pozisyon Numarası	Ölçüm Hacmindeki Yönelim	Gerekli veya Varsayılan
1	Uzayda (1, 0, 0) noktasından (0, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
2	Uzayda (1, 1, 0) noktasından (0, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
3	Uzayda (0, 1, 0) noktasından (1, 0, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
4	Uzayda (0, 0, 0) noktasından (1, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
5	(0, 1/2, 1/2) noktasından (1, 1/2, 1/2) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
6	(1/2, 0, 1/2) noktasından (1, 1, 1/2) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
7	(1/2, 1/2, 0) noktasından (1/2, 1/2, 1) noktasına kadar makine ölçeklerine paralel	Varsayılan
NOT Bu çizelgedeki spesifikasyonlar için, ölçüm hacminin karşılıklı köşelerinin aşağıdaki gibi olduğu varsayılır (X, Y, Z) koordinatlarında (0, 0, 0) ve (1, 1, 1).		

105 ölçümün tümü için bir uzunluk ölçüm hatası elde edilir. $E_{Bi:j:ODS}$ ve $E_{Uni:j:ODS}$

Uzunluk ölçüm hatasının karşılaştırılabilirliği açısından tek bir nokta alınmalıdır. Alan ölçüm sensörleriyle donatılmış bir CMM test edilirse, alanı 5 mm^2'den büyük olmayan, ölçülen noktalardan azaltılmış bir nokta temsili nokta olarak uygulanmaldır. 5 mm^2'den büyük olmayan alanın teknik nedenlerden dolayı pratik olmadığı kabul edilirse, karşılıklı anlaşma ile daha büyük bir alan uygulanabilir ve alanın büyüklüğü veri sayfasında belirtilmelidir.

Malzeme standartları çift yönlü olarak kullanıldığında ve ölçüldüğünde, her $E_{Bi:j:ODS}$, her malzeme standardının ölçülen ve kalibre edilmiş değerleri arasındaki farktan hesaplanır,

$$E_{Bi:j:ODS} = L_{Bi.meas} - L_{Bi.cal} \quad (4.3)$$

Malzeme standartları tek yönlü olarak kullanıldığında ve ölçüldüğünde, her $E_{Uni:j:ODS}$, her malzeme standardının ölçülen ve kalibre edilmiş değerleri arasındaki farktan hesaplanır,

$$E_{Uni:j:ODS} = L_{Uni.meas} - L_{Uni.cal} \quad (4.4)$$

Alan ölçüm sensörleri, optik sistemdeki bozulmalar ve montaj hataları gibi doğal hatalardan etkilenebilir. Bu tür hataların tespit edilmesi, araştırma formu testi ile kolay bir şekilde gerçekleştirilemez. Alan ölçüm sensörlerine sahip CMM'ler genellikle yüzey formlarını ölçmek ve değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu hatalar, yüzey form ölçümlerini önemli ölçüde etkileyebileceğinden, alan ölçüm sensörlü CMM'ler için düz form testi yapılması gerekmektedir.

Sensör alanından daha büyük bir geometriye sahip iş parçaları ölçülürken, birleşik bir görüntü elde etmek için "dikiş" adı verilen veri birleştirme işlemi uygulanır. Dikiş işlemi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Birleştirme kartezyen CMM'ler tarafından elde edilen üç boyutlu koordinatlara atıfta bulunarak basit veri birleştirmeye

dayalı olanlarla sınırlandırılmaktadır. Örneğin, örtüşen alanlara atıfta bulunarak yapılan sayısal uydurma veya bir referans işaretleyicinin kullanımı bu standardın kapsamı dışındadır.

Düz form ölçüm hatasına yönelik değerlendirme yönteminin ilkesi, optik mesafe sensörlü CMM'nin belirtilen maksimum İzin verilen düz form ölçüm hatası dahilinde ölçüm yapıp yapamayacağını belirlemektir. Düz form ölçüm hatalarını belirlemek amacıyla seramik veya çelikten üretilmiş test düzlemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, diğer uygun malzemelerin de kullanımı mümkündür. Farklı malzemelerin tercih edilmesi durumunda, kullanılan malzemenin her durumda belirtilmesi gerekmektedir. Yansıma faktörü, optik nüfuz derinliği (hacim saçılımı), renk, saçılma özellikleri gibi çeşitli optik özellikler, yani düz form ölçüm hatalarının değerleri ve doğrulanacak değerler arasında farklılıklar olabilir. İncelenen özelliklerin pürüzlülüğü, düz testin İzin verilen maksimum hatasına göre göz ardı edilebilecek kadar küçük olmalıdır. Üreticinin eserin malzemesi ve yüzeyi hakkında bilgi vermediği durumlarda, bu unsurlar keyfi olarak seçilebilir. Form sapması, test sonuçlarını etkilediğinden, test düzleminin formu kalibre edilmeli ve spesifikasyona uygunluğunun doğrulanmasında dikkate alınmalıdır.

Test düzleminin boyutları aşağıdaki gibi olmalıdır:

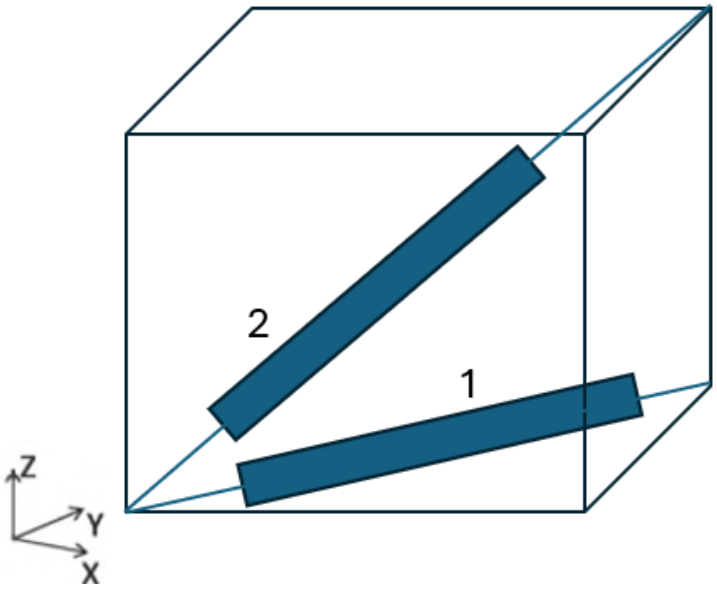
- Düzlemin uzun kenarının uzunluğu, çizgi tarama veya nokta tarama sensörü için projeksiyon çizgisinin uzunluğunun ya da alan ölçüm sensörü için ölçüm alanının genişliğinin en az iki katı olmalıdır.
- Çizgi tarama veya nokta tarama sensörünün prob testi için kullanılan küre normal çapının çapı kadar uzun olması durumunda düzlemin kısa kenar uzunluğu belirlenir.
- Alan ölçüm sensörünün ise, prob testi için kullanılan kürenin normal çapından veya ölçüm alanının genişliğinden daha küçük olan bir uzunluğa sahip olması halinde düzlemin kısa kenar uzunluğu belirlenir. Daha uzun bir şapka kullanıldığında doğrusallık ölçüm hatası daha belirgin hale gelmektedir.

Problama sistemi kalifikasyonu amacıyla, optik mesafe sensörleri ile birlikte CMM tarafından sağlanan referans düzlemi bu testte kullanılmamalıdır. Eğer önerilen boyutu kapsayan bir test düzlemi mevcut değilse, alternatif olarak hareketli bir düz yüzey, hareketli bir platforma monte edilmiş küçük bir test düzlemi veya benzeri ekipmanlar tercih edilmelidir.

Test düzlemi, iki farklı konumda yerleştirilmelidir: CMM masası üzerinde ve CMM'nin makine koordinat sistemindeki diyagonal boyunca mümkün olduğunca yakın bir şekilde. Şekil 4.21 ve Çizelge 4.19'te önerilen düzenleme tercih edilmelidir. Şekil 4.21'de farklı düzenlemeler ise belgelenmelidir.

Ölçülen noktaların sayısı belirlenmeli ve kaydedilmeli. Bu noktaların sayısı en az 25 olmalıdır. Noktalar, test düzlemi üzerinde yaklaşık olarak eşit bir şekilde dağıtılmalıdır.

Prob sistemi, eklemleme işlevi ile donatıldığında, test sonuçları optik mesafe sensörünün konumundan önemli ölçüde etkilenebilir. CMM'nin özelliklerini ortaya koymak amacıyla test sırasında optik mesafe sensörlerinin farklı yönlere ayarlanması önerilmektedir. Yazılımın başka bir yüzeye ait noktaları kaldırmaya yönelik otomatik bir işlevi mevcutsa, bu işlevin kullanılması faydalıdır. Değerlendirilen noktaların manuel olarak seçilmesi, normal çalışma prosedürünün bir parçası ise, örneğin başka bir yüzeye ait noktalar varsa, bu veri seçiminin veri sayfasında belirtilmesi ve deney sırasında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. MPE'ler test edilirken genel filtrelerin kullanılmaması önerilmektedir.



Şekil 4.21. Değerlendirmede test düzlemlerinin önerilen konumları: x-y düzlemindeki çapraz çizgi boyunca bir konum ve bir çapraz konum

Çizelge 4.19. Ölçüm Hacmindeki Yönelim

Pozisyon Numarası	Ölçüm Hacmindeki Yönelim	Gerekli veya Varsayılan
1	X-Y düzleminde (0, 0, 0) noktasından (1, 1, 0) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
2	Uzayda (0, 0, 0) noktasından (1, 1, 1) noktasına kadar olan köşegen boyunca	Gerekli
NOT Bu çizelgedeki spesifikasyonlar için, ölçüm hacminin karşılıklı köşelerinin aşağıdaki gibi olduğu varsayılır (X, Y, Z) koordinatlarında (0, 0, 0) ve (1, 1, 1).		

Ölçülen tüm noktaların % 95'inin yer aldığı ilgili düzlemden normal mesafelerin aralığını belirlenmelidir. Ölçülen noktaların normal mesafeleri aralığı, düz form ölçüm hatası , $E_{\text{Form.Pla.D95\%:}j\text{:ODS,MPE}}$ olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$E_{\text{Form.Pla.D95\%:}j\text{:ODS,MPE}} = d_{max} - d_{min} \qquad (4.5)$$

4.7.3. Spesifikasyonlara uygunluk

Optik mesafe sensörlerine sahip CMM'nin performansının geçerli sayılabilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

Ölçüm formu hatası, PForm, üretici tarafından belirlenen ve ISO 14253-1 standardına göre ölçüm belirsizliğini dikkate alan maksimum İzin verilen ölçüm formu hatasından daha büyük olmamalıdır. Ölçüm boyutu hatası, Psize, üretici tarafından belirlenen ve ISO 14253-1 standardına göre ölçüm belirsizliğini dikkate alan maksimum İzin verilen ölçüm boyutu hatasından daha büyük olmamalıdır.

Uzunluk ölçüm hatası, üretici tarafından belirlenen ve ISO 14253-1 ile ISO/TS 23165 standartlarına göre ölçüm belirsizliğini dikkate alan maksimum İzin verilen uzunluk ölçüm hatasından daha büyük olmamalıdır. Optik mesafe sensörleri ile donatılmış CMM'de farklı bir prob sistemi mevcutsa, uzunluk ölçüm testi, üretici tarafından belirtilen prob sistemlerinden biri kullanılarak gerçekleştirilmelidir.

Alan ölçüm sensörleriyle donatılmış CMM'ler için, ek bir yerel test düzlemi veya büyük kürenin ölçülmesi durumunda, prob formu hatası, üretici tarafından belirlenen ve ISO 14253-1 standardına göre ölçüm belirsizliğini dikkate alan maksimum İzin verilen prob formu hatasından daha büyük olmamaktadır.

Problama boyutu hatası, İzin verilen maksimum problama boyutu hatasından daha fazla değildir. Tüm bu değerler, üretici tarafından belirtilmiş olup, ISO 14253-1'e göre ölçüm belirsizliğini göz önünde bulundurarak belirlenmiştir. Düz form ölçüm hatası ise, üretici tarafından tanımlanan ve ISO 14253-1'e göre ölçüm belirsizliğini dikkate alan maksimum İzin verilen düz form ölçüm hatasından daha büyük değildir.

4.7.4'e göre, üç tekrarlı ölçümün 35 setinden en fazla beşi, uzunluk ölçüm hatasının üç değerinden birinin uygunluk bölgesinin dışında olabilir. Uygunluk bölgesinin dışında kalan her bir ölçüm, ilgili konumda üç kez yeniden ölçülmelidir. Eğer üç tekrarlı ölçümden elde edilen uzunluk ölçüm hatalarının tümü uygunluk bölgesinin içindeyse, CMM'nin performansı o konumda onaylanmış olur.

Düz form ölçümünün performansı test edilmeden doğrulanamazsa, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek hatalar açısından prob ekipmanının kontrol edilmesi gerekmektedir. Herhangi bir hata tespit edilirse düzeltilmeli ve ilgili test yalnızca bir kez tekrarlanmalı, orijinal ölçüm sonuçları ise geçersiz sayılmalıdır. Ayrıca, tekrarlanan ölçüm yapılmamalıdır.

4.7.4. Uygulamalar

Bir üretici ile bir kullanıcı arasında, satın alma, bakım, onarım, yenileme veya yükseltme sözleşmesinde belirtilen sözleşmesel durumlarda, bu bölümde tanımlanan kabul testleri, optik mesafe sensörlü bir CMM'nin prob ve uzunluk ölçüm performansını, üretici ile kullanıcı arasında mutabık kalınan maksimum izin verilen hata değerlerine uygun olarak doğrulamak amacıyla kullanılabilir.

Bu bölümde sunulan yeniden doğrulama testleri, bir kuruluşun iç kalite güvence sisteminde, optik mesafe sensörlü bir CMM'nin prob ve uzunluk ölçüm performansının,

kullanıcı tarafından belirlenen uygun maksimum izin verilen hata değerlerine ve tüm olası detaylı sınırlamalara uygun olarak doğrulanması için kullanılabilir.

Bir kuruluşun iç kalite güvence sisteminde, azaltılmış yeniden doğrulama testleri, CMM'nin izin verilen maksimum hata seviyelerine uyum sağlama olasılığını göstermek amacıyla belirli aralıklarla uygulanabilir. Bu bölümde ele alınan optik mesafe sensörleri için ara kontrollerin kapsamı, değerlendirilen gerçek ölçüm noktalarının sayısı bakımından azaltılabilir.

Problama sisteminin düzenli olarak gözden geçirilmesi ve problama performansını önemli ölçüde etkileyebilecek her türlü olaydan sonra kontrol edilmesi önerilmektedir.

4.7.6. Optik Sensör'ü Olan CMM'lerin Avantajları

Optik sensörlü CMM'ler, temas gerektirmeyen ölçüm prensipleri sayesinde özellikle hassas yüzey karakteristiğine sahip veya temasla ölçülmesi uygun olmayan parçaların kontrolünde kullanılan sistemlerdir. Bu sensörler, yüzeyden yansıyan ışığı analiz ederek yüksek yoğunluklu nokta verisi üretir ve yüzey topografisinin ayrıntılı bir şekilde modellenmesini sağlar. Temassız ölçüm yapabilme yeteneği nedeniyle optik sensörlü CMM'ler, karmaşık konturların, ince cidarlı yapılarının ve hassas yüzeylerin hızlı ve güvenilir analizinde önemli avantaj sunar.

Optik sensörlerin en belirgin kullanım alanları, mikro boyutlu yüzeylerin, ince kenarların, plastik veya elastik malzemelerin, işleme izlerinin, serbest form yüzeylerin ve yüzey profilinin kritik olduğu parçaların ölçümüdür. Temaslı probların uyguladığı kuvvetin ölçüm sonucunu etkileyebileceği ince veya hassas yüzeylerde optik sensörler deformasyon riskini ortadan kaldırır. Bu durum özellikle kalıpçılık, havacılık, elektronik bileşen üretimi, tıbbi cihazlar ve mikro işleme endüstrilerinde optik sensörlü sistemleri öne çıkarır.

Optik sensörler, yüksek nokta yoğunluğu üretme kabiliyeti sayesinde yüzey form analizi, profil ölçümü ve serbest yüzeylerin taranmasında temaslı yöntemlere göre daha ayrıntılı veri sağlar. Bu yüksek veri yoğunluğu, yüzey dalgalanmalarının, lokal

şekil sapmalarının ve mikro geometrik hataların tespitinde ölçüm güvenilirliğini artırır. Ayrıca optik sensörlerin ölçüm hızı temaslı problara kıyasla çok daha yüksektir. Büyük yüzeylerin kısa sürede taranabilmesi, üretim süreçlerinde kalite kontrolün daha verimli bir şekilde yürütülmesine katkıda bulunur.

Optik sensörlü CMM'lerin bir diğer avantajı, temaslı ölçümle birlikte hibrit olarak kullanılabilmesidir. Bu yaklaşımda optik sensör, yüzey formu ve detay gerektiren bölgelerde görev alırken; temaslı prob genel geometrik ölçüler ve konum ilişkileri için kullanılır. Böylece tek bir makine üzerinde hem makro hem mikro ölçüm ihtiyaçlarına cevap verebilen esnek bir ölçüm stratejisi oluşturulabilir.

Bununla birlikte optik sensörler, yüzey yansımaları, düşük kontrast veya çok derin geometri içeren bölgelerde sınırlamalar gösterebilir. Işıklandırma koşullarının uygun şekilde kontrol edilmesi, optik ölçüm doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Buna rağmen uygun yüzey ve ortam şartlarında optik sensörlü CMM'ler, hızlı, temassız ve yüksek çözünürlüklü veri toplama yeteneği sayesinde modern ölçüm teknolojisinin önemli bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

ŞİRKET HASSAS

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Doğrusal Boyutları Ölçmek İçin Kullanılan CMM'ler

Bu çalışmada, Koordinat Ölçüm Makinesi'nin (CMM) performans doğrulaması ISO 10360-2:2009 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. ISO 10360-2, uzunluk ölçüm hatasının belirlenmesi ve cihazın geometrik doğruluğunun değerlendirilmesi için uluslararası kabul görmüş bir yöntem sunmaktadır.

Kalibrasyon sürecinde kullanılan standart referans parçalar üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, makinenin ölçüm hatası (EL,MPE) ve tekrarlanabilirlik (R) değerleri elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları, üretici tarafından belirtilen maksimum izin verilebilir hata (MPE) sınırlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda ölçülen uzunluk aralıklarında ölçüm hatası CMM tezgahının kabul limitleri içerisinde kalmıştır.

Bu bulgular, CMM'nin ISO 10360-2 standardına uygun çalıştığını ve sistematik hataların minimize edildiğini göstermektedir. Ayrıca sonuçlar literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, ölçüm belirsizliklerinin makine sınıfı ve çevresel koşullar açısından kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

ISO 10360-2'ye göre yapılan doğrulama testleri, cihazın yalnızca nominal ölçüm doğruluğunu değil, aynı zamanda ölçüm stratejisi, prob konfigürasyonu ve operatör etkisini de içeren bütünsel bir performans değerlendirmesi sunmaktadır. Bu nedenle, elde edilen sonuçların CMM'nin üretim içi kalite kontrol uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

5.2. Döner Tabla Eksenini Dördüncü Eksen Olarak Kullanan CMM'ler

Bu bölümde, Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) üzerinde kullanılan prob sisteminin performansı, ISO 10360-3:2000 standardı kapsamında değerlendirilmiştir.

ISO 10360-3 standardı, CMM prob sistemlerinin ölçüm performansını doğrulamak amacıyla kullanılan küresel test artefaktı üzerinden rotary ile yapılan ölçümlere dayanmaktadır.

Kalibrasyon sürecinde, sert metalden imal edilmiş referans bir küre (kalibrasyon küresi) kullanılmıştır. Küre, makinenin ölçüm hacmi içinde farklı yönelimlerde ve noktalarda prob tarafından rotary üzerinde ölçülmüş; böylece FRA (Eksen Doğrusallık Hatası), FTA (Eksen Düzlemsellik Hatası) ve FAA (Eksen Açısal Hatası) hassasiyeti değerlendirilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda ISO 10360-3 standardında tanımlanan maksimum İzin verilebilir hata sınırları (MPE) dahilinde değerlendirilmiş ve sistemin prob hassasiyeti ile eksenel geometrik uygunluğu tarafımca doğrulanmıştır.

Bu bulgular, CMM prob sisteminin ISO 10360-3 standardında belirtilen doğruluk ve tekrarlanabilirlik kriterlerini sağladığını göstermektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, prob sisteminin geometrik stabilitesinin ve ölçüm stratejisinin güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

5.3. Tarama Ölçüm Modunda Kullanılan CMM'ler

Bu çalışmada, Koordinat Ölçüm Makinesi’nin (CMM) tarama (scanning) ölçüm modu performansı ISO 10360-4:2000 standardı esas alınarak değerlendirilmiştir. ISO 10360-4, sürekli temaslı (analog) prob sistemleri kullanan CMM’lerin tarama sırasında gösterdiği geometrik doğruluk ve tekrarlanabilirliği belirlemek için geliştirilmiş bir uluslararası standarttır.

Deneysel çalışmalarda, kalibrasyonu yapılmış referans bir küre standardı kullanılmış; küre üzerinde tarama ölçümleri gerçekleştirilmiştir. yapılan ölçümlerde özellikle MPETHP (maximum premissible scanning probing error) ve MPTT (maximum permissible time) parametreleri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, CMM'nin tarama modu performansının ISO 10360-4 standardına uygun olduğunu ve sistemin dinamik davranışının ölçüm güvenilirliğini olumsuz etkilemediğini göstermektedir.

Bu bulgular, CMM'nin sadece tek noktalı ölçümlerde değil, aynı zamanda tarama tabanlı geometrik ölçümler için de yeterli doğrulukta çalıştığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla cihazın hem kalite kontrol hem de tersine mühendislik uygulamalarında güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

5.4. Tek Ve Çoklu Uçlu Temaslı Prob Sistemleri Kullanan CMM'ler

Bu çalışmada, Koordinat Ölçüm Makinesi'nin (CMM) tek nokta temaslı prob sistemi performansı ISO 10360-5:2010 standardı esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu standart, prob sisteminin nokta bazlı ölçümlerde gösterdiği doğruluk, yönelime duyarlılık ve tekrarlanabilirliği belirlemek amacıyla geliştirilmiştir.

Dokunmalı (tactile) prob sistemine sahip CMM cihazında, izlenebilirliği belgelenmiş referans küreye 25 farklı yönden prob temasları uygulanarak ölçüm verileri elde edilmiştir. Bu veriler üzerinden, her temas noktası için ölçülen değer ile referans değer arasındaki fark hesaplanarak prob sapması analiz edilmiştir. Ardından, sistemin performansı, standardın tanımladığı Maximum Permissible Error (MPE) limit değerleri ile karşılaştırılmış ve ölçüm sonuçlarının bu sınırlar dahilinde kalıp kalmadığı teknik olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, prob sisteminin tekrarlanabilirlik ve yönelime bağımlılık kriterlerini ISO 10360-5 standardına uygun şekilde sağladığını ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, ISO 10360-5 testleri, CMM'nin noktasal ölçümlerde güvenilir sonuçlar verdiğini ve sistematik prob hatalarının minimum düzeyde olduğunu göstermiştir. Bu doğrulama, makinenin yüksek hassasiyet gerektiren boyutsal kalite kontrol ve referans geometri ölçümleri için uygun olduğunu kanıtlamaktadır.

5.5. Görüntülü Probu Olan CMM'ler

Bu çalışmada kullanılan Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM), temaslı ölçüm prensibine göre çalışmaktadır. Bununla birlikte, CMM'lerde optik ve görüntü tabanlı ölçüm sistemlerinin performansının değerlendirilmesi için ISO 10360-7:2011 standardı geliştirilmiştir.

ISO 10360-7, temassız (optik veya video tabanlı) ölçüm sistemlerinin doğruluk ve tekrarlanabilirlik değerlendirmelerini tanımlar. Bu standart, kamera veya lazer tabanlı sistemlerde; uzunluk ölçüm hatası, optik eksen hizalaması ve görüntüleme tekrarlanabilirliği gibi parametreleri belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada doğrudan ISO 10360-7'ye göre bir test gerçekleştirilmemiştir; ancak standart hakkında bilgi verilmesi, farklı CMM teknolojilerinin karşılaştırılması açısından önem taşımaktadır.

Temassız sistemler özellikle küçük boyutlu parçaların, hassas yüzey geometrilerinin ve deformasyona duyarlı malzemelerin ölçümünde avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, optik sistemlerin doğruluk seviyesi genellikle çevresel ışık, yüzey yansıtıcılığı ve odak uzaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir.

Sonuç olarak, ISO 10360-7 standardı, temaslı ölçüm yapan sistemlerin performansını değerlendiren ISO 10360-2 ve ISO 10360-5 standartlarını tamamlayıcı nitelikte olup, optik ölçüm teknolojilerinin kalibrasyon ve doğrulama sürecinde uluslararası bir referans olarak kullanılmaktadır.

5.6. Optik Sensör'ü Olan CMM'ler

Bu çalışmada kullanılan Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM), tek prob konfigürasyonu ile ölçüm gerçekleştirmektedir. Ancak, CMM teknolojilerinde birden fazla prob sistemi veya değiştirilebilir prob uçlarının kullanıldığı durumlarda performans doğrulamasının ISO 10360-8:2013 standardına göre yapılması gerekmektedir.

ISO 10360-8, çoklu prob sistemlerine sahip CMM'lerin geometrik doğruluk ve hizalama performansını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş bir standarttır. Bu standardın temel amacı, farklı prob veya prob ucu değişimlerinde makinenin ölçüm doğruluğunun ve sistematik sapmalarının tespit edilmesidir.

Standardın kapsamı, farklı prob konfigürasyonları arasında oluşabilecek referans koordinat kaymalarını, prob değişimi sonrası oluşan konumlandırma hatalarını ve bu değişimlerin genel ölçüm doğruluğuna etkisini belirlemeyi içerir.

Bu tez kapsamında ISO 10360-8'e göre deneysel bir uygulama yapılmamıştır; ancak standart hakkında bilgi verilmesi, CMM'lerin çoklu sensör teknolojilerine geçiş sürecinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

Günümüzde otomatik prob değiştiriciler veya farklı temas uçları (örneğin düz, küresel, yıldız uçlu) kullanan sistemlerde, bu standart sistemsel geçişlerin ölçüm sonuçlarına etkisini minimize etmek için referans alınmaktadır.

Sonuç olarak, ISO 10360-8 standardı, farklı prob sistemleri arasında ölçüm sürekliliği ve tekrarlanabilirliğin sağlanmasına yönelik uluslararası bir doğrulama çerçevesi sunmaktadır. Bu yönüyle, ISO 10360-2, ISO 10360-3, ISO 10360-4 ve ISO 10360-5 standartlarını tamamlayıcı nitelikte olup, CMM sistemlerinin çoklu sensör uyumluluğunun değerlendirilmesinde temel kaynaklardan biridir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, hızla gelişen havacılık sanayisinde kullanımı giderek artan koordinat ölçüm makinelerinin kalibrasyon süreçlerinin nasıl gerçekleştirildiği, sektörde görev yapan mühendis ve teknisyenlere yol gösterici olmak amacıyla ayrıntılı ve sistematik bir şekilde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, koordinat ölçüm makinelerinin doğru ve etkin kullanımının ölçüm güvenilirliği üzerindeki etkisi vurgulanmış; böylece ölçüm cihazları hakkında bilgi düzeyi artan mühendis ve operatörlerin, üretim sürecinde ölçüm kaynaklı hataları ve kayıpları en aza indirebilmeleri hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, koordinat ölçüm makineleri hakkında genel bilgiler sunularak kullanıcıların cihazların temel yapısı ve çalışma prensipleri konusunda bilgi sahibi olmaları amaçlanmıştır. İkinci bölümde ise koordinat ölçüm makinelerinin kalibrasyonuna ilişkin uluslararası standartlar esas alınarak uygulamaya yönelik bilgiler verilmiştir. Bu kapsamda; ISO 10360-2 standardına göre doğrusal boyut ölçüm kalibrasyonunun nasıl gerçekleştirildiği, ISO 10360-3 standardına göre döner tablanın dördüncü eksen olarak kullanıldığı koordinat ölçüm makinelerinde kalibrasyon ölçümlerinin uygulanışı açıklanmıştır. Ayrıca ISO 10360-4 standardına göre tarama modunda çalışan koordinat ölçüm makinelerinin kalibrasyonu, ISO 10360-5 standardına göre çok uçlu prob sistemlerinin kalibrasyon ölçümleri, ISO 10360-7 standardına göre görüntüleme problu ölçüm sistemlerinde ölçüm yöntemleri ve son olarak ISO 10360-8 standardına göre optik mesafe ölçerli cihazların kalibrasyon süreçleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, koordinat ölçüm makinelerinin kalibrasyonuna ilişkin olarak uygulamaya yönelik, güncel, standartlara dayalı ve bütüncül bir referans dokümanın bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, bilgiye erişimin kişisel deneyimlere bağımlı hale gelmesine ve kurumsal bilgi sürekliliğinin sağlanmasında zorluklara yol açabilmektedir. Hazırlanan bu tez çalışması ile söz konusu dokümantasyon eksikliğinin giderilmesi, kalibrasyon süreçlerine ilişkin bilgilerin sistematik ve standartlarla uyumlu bir yapı altında toplanması ve kurumsal bilgi birikiminin sürdürülebilirliğinin desteklenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın,

koordinat ölçüm makineleriyle yeni çalışmaya başlayan mühendis ve teknisyenler için temel bir eğitim dokümanı niteliği taşıması hedeflenmiştir.

Günümüzde koordinat ölçüm makinelerinin; çok eksenli yapılar, yüksek hızlı tarama modları ve temassız ölçüm teknolojileri ile daha karmaşık geometrilerin ölçümüne olanak sağladığı görülmektedir. Bu gelişmelere paralel olarak, gelecekte CMM sistemlerinin ölçüm süreçlerinin dijital ikiz (digital twin) yaklaşımları ile desteklenmesi, sanal ortamda ölçüm senaryolarının önceden analiz edilmesi ve ölçüm stratejilerinin optimize edilmesi beklenmektedir. Bu sayede ölçüm sürelerinin kısaltılması, ölçüm belirsizliğinin azaltılması ve ölçüm süreçlerinin daha öngörülebilir hale gelmesi öngörülmektedir.

Bununla birlikte, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmaların CMM yazılımlarına entegre edilmesiyle, otomatik alignment oluşturma, ölçüm noktası seçimi ve ölçüm verilerinin değerlendirilmesi gibi işlemlerin daha az operatör bağımlı hale geleceği değerlendirilmektedir. Bu gelişmelerin, ölçüm tekrarlanabilirliğini artırarak kullanıcı kaynaklı hataların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Gelişen ölçüm teknolojilerine paralel olarak, koordinat ölçüm makineleri için uygulanan kalibrasyon ve doğrulama standartlarının da evrilmeye devam edeceği düşünülmektedir. ISO 10360 serisinin, gelecekte daha karmaşık ölçüm sistemlerini ve çoklu sensör yapılarını kapsayacak şekilde genişletilmesi ve dijital ölçüm verilerinin izlenebilirliğini artıracak düzenlemeleri içermesi beklenmektedir. Bu bağlamda, standartlara dayalı ve güncel kalibrasyon dokümanlarının önemi daha da artacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışmanın koordinat ölçüm makineleriyle çalışan uzmanların gerçekleştirdikleri ölçüm ve değerlendirme süreçlerini daha güvenilir ve doğru bir şekilde yürütmelerine katkı sağlayacağı; bununla birlikte kurum bünyesinde standart bir kalibrasyon yaklaşımı oluşturulmasına, kurumsal bilgi sürekliliğinin sağlanmasına ve personel eğitimine uzun vadeli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Baç, Ö. (2013). *Üç Serbestlik Dereceli Bir Koordinat Ölçüm Cihazının Tasarım ve İmalatı.* İstanbul Teknik Üniversitesi

Boeckmans, B., Vlaeyen, M., Probst, G., Dewulf, W., Haitjema, H., & J.-P., Kruth, (2019). *CMM tactile probe performance evaluation according to ISO/DIS 10360-5:2018.* KU Leuven, Dept. of Mechanical Engineering,

Edward P. M., Sami A. F.. (2004). A*lternatıve artıfacts for evaluatıng scannıng cmm performance.* Department of Mechanical Engineering and Engineering Science The University of North Carolina at Charlotte.

Flack, D. (2001). *CMM Verification, Good Practice Guide No. 42*. National Physical Laboratory.

İmamoğlu, M.,Poyrazoğlu, O. & Gürkan D. (2023). *İmalat Sektöründe Cmm Kullanımının Verimlilik Ve Kaliteye Etkisinin İncelenmesi.* Gazi Üniversitesi. https://doi.org/10.2339/politeknik.1307207

In Process Quality Control. Erişim: https://www.ipqcco.com/blog/cmm-machine-probe-calibration-procedure-purpose-result-reading-influencing-factors, Erişim tarihi: 17.06.2025

ISO 10360 Geometrical Product Specifications — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)

ISO 10360 OVERVIEW, ZEISS

ISO 10360-2. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. 2009

ISO 10360-3. Geometrical Product Specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis (2000)

ISO 10360-4. Geometrical Product Specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 4: CMMs used in scanning measuring mode. (2000)

ISO 10360-5. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 5: CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems. (2010)

ISO 10360-7. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems. (2011)

KAYNAKLAR DİZİNİ

ISO 10360-8. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS). Part 8: CMMs with optical distance sensors. (2013)

Mantel, M.R. (1993). *Coordinate measuring machines : a modern inspection tool in manufacturing.* New Jersey Institute of Technology

Mega Danışmanlık. Erişim: https://www.megadanismanlik.com.tr/Upload/pdf/urun/TDA%20LH108_EN_2016-10_B.PDF, Erişim tarihi : 17.06.2025

Mohammad A., Aljamaan F., Khaled M. A. & Shuqayr S.B. (2025). *Coordinate Measuring Machine (CMM) Performance Verification Using Standard Step Gauges With New Measurement Model And Modified Uncertainty Analysis*. https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101658

Petro, S., Moroni, G. (2021). *Statistics-based decision rules for the ISO 10360 series of standard tests.* Mechanical Engineering Department, Politecnico di Milano. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108937

Renishaw. Erişim: https://www.renishaw.com.tr/tr/sp600--6687, Erişim tarihi: 17.06.2025

Rotary Precision Instruments. Erişim: https://www.rpiuk.com/rpi-rotary-table-enables-major-european-aerospace-manufacturer-save-40-inspection-time/, Erişim tarihi: 17.06.2025

Sariki Metrology. Erişim: https://www.sariki.es/en/measuring-equipment/3d-measurement/multisensor-probes/laser-scanner-probe/, Erişim tarihi: 17.06.2025

Savio, E. (2007). *Uncertainty in testing the metrological performances of coordinate measuring machines*. University of Padova. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60476-4

So I., Daisuke T., Kazuhide K., Kimihisa M. & Noritaka K. (2020). *Measurement of form error of a probe tip ball for coordinate measuring machine (CMM) using a rotating reference sphere.* Toyama Prefectural University, Japan.

Sousa, A. R. (2018). *Metrological evaluation of a Coordinate Measuring Machine with 5-axis measurement technology.* 15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.035

Status Metrology. Erişim : https://status-cmm.co.uk/services/maintenance-services/cmm-upgrades/, Erişim tarihi: 17.06.2025

KAYNAKLAR DİZİNİ

Status Metrology. Erişim: https://status-cmm.co.uk/new-used-cmms/a-brief-history-of-cmm-technology, Erişim tarihi: 17.06.2025

Stefano P., Giovanni M. (2021). *A statistical point of view on the ISO 10360 series of standards for coordinate measuring systems verification.* https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108937

Teke, İ., Yandayan,T. & Karadayı, R. (2013). *Koordinat Ölçüm Metrolojisi, Üç Boyutlu Ölçüm Cihazı (Cmm) Modernizasyonu, Kalibrasyonu, Verifikasyonu, Dünyada Ve Ülkemizdeki Durum.* VIII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, Kocaeli

Verisurf. Erişim: https://www.verisurf.com/blog/article/what-is-a-cmm, Erişim tarihi: 17.06.2025

Wahyudin Syam. Erişim: *https://www.wasyresearch.com/coordinate-measuring-machine-cmm-an-introduction-types-considerations-and-applications/*, Erişim tarihi: 17.06.2025

Wenzel. Erişim: https://www.wenzelamerica.com/what-everybody-ought-to-know-about-the-history-of-cmm-coordinate-measuring-machines, Erişim tarihi: 17.06.2025

Wikipedia. Erişim: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine, Erişim tarihi: 17.06.2025

Willrich Precision Instrument. Erişim: https://willrich.com/product/nikon-cmm-manager-software, Erişim tarihi : 17.06.2025

Mitutoyo. Erişim: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wpcontent/uploads/Test_CMM_2016_Hand-Out.pdf, Erişim tarihi : 17.06.2025

Hexagon. Erişim: https://support.hexagonmi.com/s/article/Acceptance-and-re-verification-tests-for-Coordinate-Measuring-Machines , Erişim tarihi : 17.06.2025