



Development of jerk/acceleration limited tool path planning algorithm for circular and helical motions of CNC machining tools

Ethem Kelekçi^{1*}, Selçuk Kizir²

¹Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, Celal Bayar University, Manisa, 45400, Turkey

²Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, 41000, Turkey

Highlights:

- A novel circular/helical tool path planning algorithm is proposed.
- Acceleration and jerk limited velocity profiles provide the vibration-free machine operations.
- Proposed methods are verified by the real-time experiments on a 4-axis industrial CNC-Milling machine.

Keywords:

- Circular/Helical Motion
- Jerk Limited Velocity Profile
- CNC-Milling
- Taylor's Equations
- CNC Control Unit

Article Info:

Research Article
Received: 16.04.2021
Accepted: 25.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.917764

Correspondence:

Author: Ethem Kelekçi
e-mail:
ethem.kelekci@cbu.edu.tr
phone:+90 236 314 7750

Graphical/Tabular Abstract

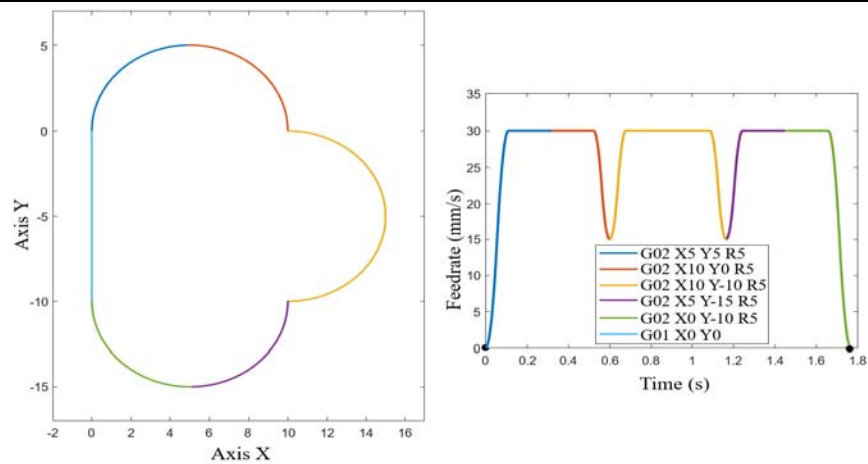


Figure A. a) Circular motion in cartesian space b) jerk limited velocity profile of the CNC machining

Purpose: This study presents a novel circular/helical tool path planning algorithm for CNC machining based on G02 and G03 commands to prevent contour error occurred by existing methods in the literature. Also, the proposed method is interpolated by jerk and acceleration limited velocity profiles optimized with velocity transition algorithm between G-Commands for the purpose of vibration-free machine operations.

Theory and Methods:

In this study, the circular / helical tool paths are generated using X, Y, Z and R data in G02 and G03 commands without contour errors, and the required velocity values in transitions of G-commands are determined. According to the velocity values at the transition points, jerk constant velocity profiles not exceed the acceleration capacities of the axis motors are designed. Also, the tool path planned in cartesian space is interpolated by Taylor's equations based on the designed velocity and acceleration profiles.

Results:

In order to observe the performance and effectiveness of the study, the application of the spherical milling and circular pocket milling is achieved on a 4-axis industrial CNC-Milling Machine. The spherical milling is conducted with two different G-code files: rough process (with 1500 lines of G-code) and finish process (with 35.000 lines of G-code) whereas circular pocket milling is achieved by 1200 lines of G-code. Also, axial trajectory tracking results of each experiment is observed using RMSE and MSE performance indices.

Conclusion:

For all experiments, the maximum jerk, acceleration and velocity values are specified by 10.000 mm/s^3 , 1000 mm/s^2 and 30 mm/s , respectively. It is observed from the velocity, acceleration, and jerk graphs of the interpolation process that the maximum parameters are not exceeded, and the acceleration and jerk graphs that directly affect the machine vibrations have a continuous and stable structure. Also, the processed products using over a thousand lines of G-code files show that the mathematical structure of the tool path planning algorithm is robust and comprehensive.



CNC tezgâhlarında dairesel ve helisel hareketler için jerk/ivme sınırlandırılmalı yörünge planlama algoritmasının geliştirilmesi

Ethem Kelekçi^{1*}, Selçuk Kizir²

¹Celal Bayar Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 45400 Turgutlu Manisa, Türkiye

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 41000, Kocaeli, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dairesel ve helisel kesici takım yörünge planlama algoritması önerilmiştir
- İvme ve jerk sınırlandırılmalı hız profilleri titreşimsiz tezgâh operasyonları sağlamıştır
- Önerilen yöntemler endüstriyel bir CNC-Freze tezgâhi üzerindeki deneylerle doğrulanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 16.04.2021
Kabul: 29.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.917764

Anahtar Kelimeler:

Dairesel/helisel hareket,
jerk sınırlandırılmalı hız
profil,
CNC-freze,
Taylor denklemleri,
CNC kontrol ünitesi

ÖZ

Endüstriyel üretimin önemli bir parçası olan CNC tezgâhlarının çalışma performanslarının ve ürün işleme kabiliyetlerinin artırılması akademik çalışmaların önemli bir konusu olmuştur. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, endüstriyel CNC tezgâhlarında dairesel ve helisel hareketlerin yüksek hızlı, yüksek hassasiyetli ve titreşimsiz tezgâh operasyonları ile gerçekleşmesi için jerk ve ivme sınırlandırılmalı yörünge planlama algoritması geliştirilmiştir. Dairesel ve helisel hareketlerin tanımlandığı G02/G03 komutlarında yer alan X-Y-Z ve R bilgileri üzerinden, normalde kontur hatalarına yol açan ve ana yörüngeyi terk eden literatürdeki mevcut yöntemlerin dezavantajlarını ortadan kaldıran yörünge planlama algoritması geliştirilmesi çalışmanın en önemli katkısı olmuştur. Ayrıca yapılan çalışmada komut satır geçişlerinde optimum hız değerlerinin tespit edilmesi ve geçiş noktalarındaki hız değerlerine göre CNC tezgâhi üzerindeki eksen motorlarının ivme kapasitelerini aşmayan sabit jerkli hız profilleri temelinde interpolasyon işlemi uygulanması yöntemi önerilmiştir. Geliştirilen algoritmalar endüstriyel 4 eksen CNC-Freze tezgâhi üzerinde kapsamlı iki ürün işleme uygulaması ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. CNC tezgâhi üzerindeki eksen motorları EtherCat protokolü üzerinden yazarlar tarafından geliştirilen CNC kontrol ünitesi yazılımı ile kontrol edilmiştir. 1ms veri yenileme hızı ile kontrol edilen eksen motorlarına ilişkin yörünge takip sonuçları hata değerleri ölçütleri üzerinden incelenmiştir. Bin satırın üstünde G-kod dosyalarını kullanarak hatasız ürün işleme uygulamalarının gerçekleştirilmesi önerilen yöntemlerin matematiksel alt yapısının güçlü ve kapsamlı olduğunu göstermiştir.

Development of jerk/acceleration limited tool path planning algorithm for circular and helical motions of CNC machining tools

H I G H L I G H T S

- A novel circular/helical tool path planning algorithm is proposed
- Acceleration and jerk limited velocity profiles provide the vibration-free machine operations
- Proposed methods are verified by the experiments on an industrial CNC-Milling machine

Article Info

Research Article
Received: 16.04.2021
Accepted: 25.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.917764

Keywords:

Circular/helical motion,
jerk limited velocity profile,
CNC-milling,
Taylor's equations,
CNC control unit

ABSTRACT

Improvement of CNC machines' operating performance and product processing capabilities, which are an important part of industrial production, has been an important subject of academic studies. In this study, jerk and acceleration limited tool path planning algorithm for the circular and helical motions of industrial CNC machining is proposed to provide high speed, high precision and vibration-free machine operations. The most important contribution of the study is the development of a circular/helical trajectory planning algorithm, which eliminates the disadvantages of existing methods in the literature that normally cause contour errors and deflections from the main trajectory, based on the X-Y-Z and R information in G02/G03 commands. Also, it is proposed that applying the interpolation process on the basis of constant jerk speed profiles that do not exceed the acceleration capacities of the axis motors according to optimum velocity values at the command line transition points. The proposed methods are verified by two applications of the product processing on a 4-axis industrial CNC-Milling Machine. The axis motors on the CNC machine are controlled over the EtherCat protocol using CNC control unit software developed by the authors. Trajectory tracking performance of the axis motors controlled with 1ms sampling time is analyzed based on the error evaluation criteria. The processed products using over a thousand lines of G-code files show that the mathematical structure of the tool path planning algorithm is robust and comprehensive.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ethem.kelekci@cbu.edu.tr, selcuk.kizir@kocaeli.edu.tr /

Tel: +90 236 314 7750

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Takım tezgâhlarının çalıştırılmasının, durdurulmasının, takım değiştirilmesinin, eksen hareketlerinin ve buna benzer tezgâhın çalışması ile ilgili tüm işlemlerin bir kontrol ünitesi tarafından yönetildiği CNC (Computer Numeric Control) tezgâhları otomotiv, elektronik, ahşap işleme gibi pek çok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tezgâh operasyonlarının yüksek hassasiyete sahip olması, tezgâhın çalışma temposunun her zaman yüksek olması ve aynı hassasiyette parça üretimini mümkün kılması CNC tezgâhlarının imalat sanayinde yaygın kullanılmasının başlıca sebepleri arasında sıralanabilir. Belirtilen özelliklerin bir CNC tezgâhında bulunması tezgâhın kinematik ve dinamik yapılarının hedeflenen hareket kabiliyeti için yeterli olmasını ve kontrol ünitesinin yüksek performans göstermesini gerektirmektedir. Bir CNC tezgâhının kontrolü, ISO (International Organization for Standardization) standartlarına uygun yazılan G kodları ve yardımcı M kodları temelinde gerçekleşmektedir. G-Kodları CNC tezgâhlarının temel hareket planlamasına ilişkin noktasal bilgileri içermektedir. Genel anlamda bir ürün işleminde en çok karşılaşılan G-komutları G01 (doğrusal hareket) ve G02/G03 (daireysel hareket) komutlarıdır [1]. Literatürde, doğrusal hareketler temelinde titreşimsiz tezgâh hareketleri ile pürüzsüz ürün işlenmesine yönelik çok sayıda güncel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak hedefi ise CNC tezgâhlarını maksimum hız ve maksimum hassasiyet ile kontrol etmektir. Hız ve hassasiyet kavramları birbirine göre ters orantılı oldukları için bu iki durum arasında optimum değerlerin elde edilmesine yönelik yeni yöntemler geliştirilmektedir. Fakat doğrusal hareketler kadar önemli olan bir diğer hareket tipi ise daireysel hareketlerdir. Çünkü neredeyse tüm ürün çıktılarının hatlarında bir yumuşaklık vardır. Bu yumuşak geçişler ise çoğu zaman daireysel hareketlerle sağlanır. CAM programlarında daireysel hareket seçeneği kapatılarak daireysel hareketler G01 komutları ile mikro boylardaki doğrusal hareketler üzerinden tezgâhta işlenebilmektedir. Fakat bu yöntem iki açıdan tehdit oluşturmaktadır. Çok sayıda ardışık doğrusal hareket tezgâhın titreşimli veya dur/kalk yaparak çalışmasına neden olurken aynı zamanda da daireysel hareket kadar yumuşak geçişler olmayacağı için ürün üzerinde pürüzlülük sorunu oluşabilmektedir. Eğer mikro boylardaki doğrusal parçalar hassas bir eğriye dönüştürülmüş ise, bu durumda da ana yörüngede sapmalar yani kontur hataları oluşacaktır. Bu nedenle daireysel hareketlerin CAM program çıktısına uygun olarak, ürün üzerinde birebir işlenebilmesi hem işlenecek ürün kalitesi yönünden hem de tezgâhın titreşimsiz ve dur/kalk yapmadan çalışabilmesi yönünden çok önemlidir.

Özellikle mikro boylardaki doğrusal parçaların hassas yörüngelere dönüştürülmesine yönelik literatürde çok sayıda güncel çalışma bulunmaktadır. Sneha T. ve Yusuf A. [2] çoklu doğrusal parçaları beşinci dereceden B-spline (quintic B-spline) eğrilerine dönüştürerek kartezyen uzayda belirlenen tolerans limitinde kontur hatası ile C3

sürekliliğinde yörüngeler elde etmiştir. Wei F. vd. [3] G01 komutlarından oluşan nokta bulutlarını kabul edilebilir kontur hatasıyla dörtlü Bezier segmentlerinden oluşan G3 interpolatif takım yollarına dönüştüren gerçek zamanlı takım yolu yumuşatma algoritması önermişlerdir. YeCui Y. vd. [4] yaptıkları çalışmada beş eksenli doğrusal segmentlerin köşelerini düzeltmek ve G2 sürekliliği ile pürüzsüz takım yolunu oluşturmak için çift kübik NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) eğrisi temelli yörünge planlama algoritması geliştirmişlerdir. Akılan B. ve Jingyan D. [5] daha yüksek seviyeli dinamik durumlara sahip problemler için optimal bir minimum zaman yörüngesi sağlayabilen sezgisel bir yörünge planlama algoritması önermişlerdir. Çalışmalarında, yörüngeyi takım yolu boyunca nokta nokta optimize etmek yerine, yüksek sıralı sürekliliğe sahip parçalı eğri interpolasyonu ile konum-hız faz düzlemindeki bir dizi düğüm noktalarını kullanarak oluşturmuşlardır. Shingo T. ve Burak S. [6] yüksek hızlı CNC takım tezgâhları için yeni bir kinematik köşe düzeltme tekniği sunmuşlar ve kısa G01 hareketlerinden ötürü verilen referans takım yollarını yaylar ve eğriler aracılığıyla geometrik olarak daha hassas ve sürekli yörüngelere dönüştürmüşlerdir. Fengming L. vd. [7] bir doğru parçası ile bir eğri parçası arasındaki Hausdorff mesafesini kullanarak G01 çoklu doğrusal parçalar için bir eğri uydurma algoritması geliştirmişler ve geleneksel iki aşamalı model yerine, hata kısıtlamaları ve dinamik kısıtlamalara sahip birleşik bir yörünge planlama modeli önermişlerdir. Xiaoyong H. vd. [8] geometrik eğrinin ve besleme hızı profiline integral planlamasını gerçekleştirmek için bir çift kama şeklindeki yivlere dayanan geometrik ve kinematik kısıtlamalar altında çoklu doğrusal parçalar için yeni bir yumuşatma yöntemi geliştirmişlerdir. Ayrıca literatürde [8] çalışma ile aynı amaca sahip ama farklı yöntemler önerilen önemli çalışmalar bulunmaktadır [9-11]. Doğrusal parçaların hassas eğrilere dönüştürülmesi veya köşe yumuşatma yöntemlerinin hepsinde meydana gelen ortak problem kontur hatalarının oluşmasıdır.

Bu çalışmada, CNC tezgâhlarındaki daireysel ve helisel hareketler için jerk/ivme sınırlandırılmalı yörünge planlama algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin en önemli iki katkısı; Dairesel/helisel hareketlerin G-Kod dosyasındaki verilerden hiç sapmadan yani kontur hatası oluşturmadan tezgâh üzerinde gerçekleşmesini sağlamak ve kartezyen uzayda planlanan yörüngelere titreşimsiz tezgâh hareketlerini garanti eden jerk/ivme sınırlandırılmalı hız profillerine uygun interpolasyon işlemi uygulamaktır. G02 ve G03 komutları temelinde daireysel ve helisel hareketleri kapsayan yörünge planlama algoritmasının geliştirilmesi bu çalışmanın birinci bölümünü oluşturmaktadır. Planlanan yörüngelere ikinci bölümde jerk/ivme sınırlandırılmalı hız profiline uygun interpolasyon işlemi uygulanmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise her komut satırı için oluşturulan hız profilleri arasındaki geçişlerin kontrol edilmesidir. Bu kapsamda üçüncü bölümde hız geçiş kontrollerinin detayları anlatılmıştır. Son bölümde ise, önerilen yöntemlerin endüstriyel 4 Eksen CNC-Freze tezgâhında deneysel olarak doğrulanması işlemine yer verilmiştir.

2. KESİCİ TAKIM YÖRÜNGE PLANLAMASI (TOOL PATH PLANNING)

G Kodları CAM programlarından text dosyası olarak alınan, CNC tezgâhlarının çalışma davranışlarını içeren ISO standartlarına göre yazılan bir programlama dilidir. Fakat G Kodlarının belli standartlara göre yazılması o kodların her CNC'ye doğrudan uyarlanacağı anlamına gelmemektedir. Bu durumun nedenleri arasında her CNC'nin kendine özgü eksen takımının olması, komut isterlerinin kontrol ünite markalarına göre farklılık gösterebilmesi veya otomatik kesici takım değiştirme gibi yardımcı özelliklerinin olması gösterilebilir. Bu farklılıkların önüne geçmek için ise Post-İşleyici (Post-Processor) yöntemi geliştirilmiştir. G kodu ile yazılmış bir program dosyası Post olarak ifade edilmektedir. Post-İşleyici bir G-Kod dosyasının CNC kontrol ünitesinin anlayacağı formata çevirme görevini üstlenmektedir. G-Kod standartlarına göre dairesel hareketlerin tanımlanmasında iki yöntem kullanılır. Tezgâh kontrol ünitesinin isteği doğrultusunda dairesel hareketler ya yarıçap (R) bilgisi ile ya da yarıçap merkez bilgileri (I, J, K) ile belirtilir. Bu seçim işlemini düzenleyen birim de Post- Processor'dür. Endüstride kullanılan CNC tezgâhlarında genellikle R verisine bağlı dairesel hareket planlama işlemi yapılmaktadır. Bunun en büyük sebebi ise manuel program yazımında yarıçap merkez bilgilerinin yani I, J, K verilerinin tespitinin çok zor olmasıdır. Yarıçap bilgisi tüm teknik resimlerde gösterildiği için, bir operatör teknik resimdeki R bilgilerini kullanarak çok kolay manuel program yazabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada da dairesel hareketlerde R verisi kullanılmaktadır.

2.1. G02/G03 Komut Fonksiyonlarının Çıkarılması (Mathematical Functions of the G02/G03 Commands)

G02 komutu belirtilen noktalar arasında saat yönündeki dairesel hareketi ifade etmektedir. Tezgâhlarda genellikle G17 (XY) düzlemi varsayılan düzlemdir. Eğer G02 komutu öncesinde G18 veya G19 düzlem seçimi yapılmamış ise kontrol ünitesi XY düzlemine göre dairesel hareket işlemi yapar. "G02 X... Y... Z... R..." saat yönündeki dairesel bir hareketin genel tanımlama şeklidir. Bu komutta yer alan kartezyen uzaydaki X-Y-Z noktaları tezgâhın hareket bitiminde ulaşması gereken pozisyon bilgileridir. Bu komutu G17 düzlemi için yorumlamak gerekirse, G02 komutu ile verilen X-Y noktasına R yarıçapında dairesel bir hareket yap, eğer bulunduğu Z noktası ile G02 komutunda bulunan Z noktası arasında bir farklılık varsa, yeni verilen Z noktasına dairesel harekete senkronize olarak doğrusal hareket işlemi gerçekleştir anlamı çıkmaktadır. (Karışıklıkların önüne geçebilmek için çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde aksi belirtilmediği takdirde G17 düzlemi seçilmiş varsayılacaktır). G03 komutu da format olarak (G03 X...

Y... Z... R...) G02 komutu ile aynı olmakla birlikte tezgâhın saat yönünün tersinde hareket yapması gerektiğini göstermektedir. Verilen bilgiler doğrultusunda, dairesel yörünge planlaması sürecine aşağıda verilen işlem adımları sırasıyla uygulanması ile başlanmaktadır.

- G02/G03 komutu ile verilen X-Y noktalarından geçen R yarıçapındaki radyusun merkezinin bulunması
- Belirtilen noktalardan geçen iki daire bulunduğu için hangi dairenin seçileceğinin belirlenmesi
- Radyusun başlangıcının dairenin hangi noktasına karşılık geldiğinin belirlenmesi
- Radyusun kaç derecelik olduğunun ölçülmesi

2.1.1. Dairesel hareketin merkez noktasının tespit edilmesi (Determining the center point of the circular motion)

Eş. 1-Eş. 6'da G02/G03 komutundaki X-Y ve R verilerine göre verilen noktalardan geçen iki daire merkezinin nasıl bulunduğu gösterilmiştir. Eşitlikte (x_1, y_1) bir dairenin merkez noktaları, (x_2, y_2) ise diğer dairenin merkez noktalarıdır. (x_0, y_0) tezgâhın dairesel harekete başlamadan önce bulunduğu başlangıç noktası, (x_1, y_1) ise dairesel hareket sonucunda ulaştığı bitiş noktasıdır. Şekil 1'de, verilen noktalar arasından geçen R yarıçapındaki iki dairenin nasıl oluştuğu görülmektedir.

$$x_{c1} = \frac{-(x_0 + x_1) \rho - |(y_0 - y_1)|(\varphi)}{2\rho} \quad (1)$$

$$x_{c2} = \frac{(x_0 + x_1) \rho + |(y_0 - y_1)|(\varphi)}{2\rho} \quad (2)$$

$$\varphi = \sqrt{4r^2 - x_0^2 + 2x_0x_1 - x_1^2 - y_0^2 + 2y_0y_1 - y_1^2} \quad (3)$$

$$\rho = \sqrt{x_0^2 - 2x_0x_1 + x_1^2 + y_0^2 - 2y_0y_1 + y_1^2}$$

$$y_{c1} = -\frac{2(x_0 - x_1)x_{c1} - (\gamma)}{2(y_0 - y_1)} \quad (4)$$

$$y_{c2} = -\frac{2(x_0 - x_1)x_{c2} - (\gamma)}{2(y_0 - y_1)} \quad (5)$$

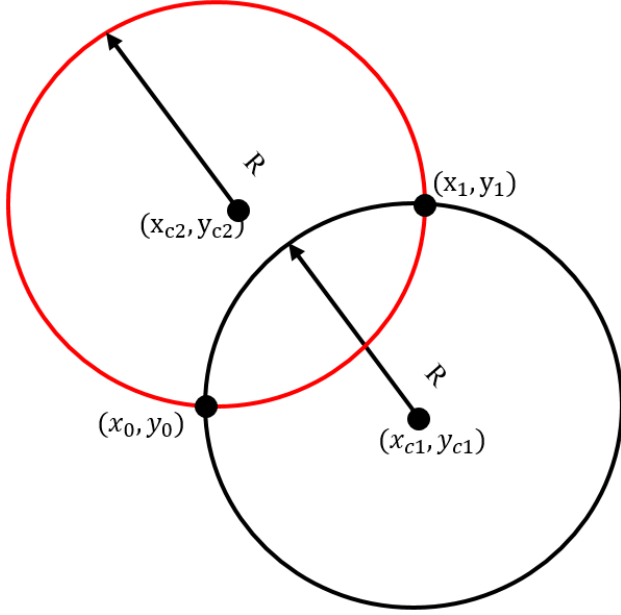
$$\gamma = x_0^2 - y_0^2 + x_1^2 + y_1^2 \quad (6)$$

Dairesel hareketin G kod dosyasına uygun oluşması için merkez seçiminin doğru yapılması gerekmektedir. Merkez seçim işlemi çalışma kapsamında geliştirilen algoritma ile sağlanmaktadır. Önerilen yöntem, çok fazla olasılık bulunduğu için radyüs hareketini başlangıç ve bitiş noktalarına göre dairesel hareketi dört bölgeye ayırmaktadır. G02 ve G03 komutları için bölge seçim yöntemi Tablo 1'de ayrı ayrı verilmiştir. Doğru bölge seçimi yapıldıktan sonra

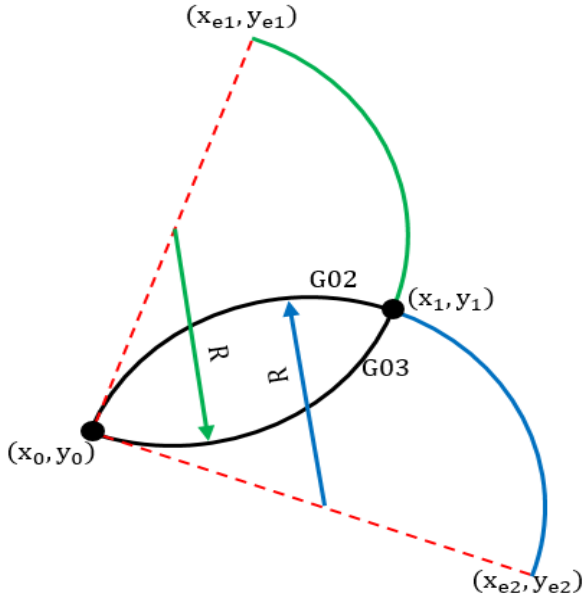
Tablo 1. Başlangıç ve bitiş noktalarına göre bölge seçim işlemi (Region selection based on start and end points of the radius)

	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge
G02	$(x_1 > x_0) \& (y_1 \geq y_0)$	$(x_1 \geq x_0) \& (y_0 > y_1)$	$(x_0 > x_1) \& (y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \geq x_1) \& (y_1 > y_0)$
G03	$(x_1 < x_0) \& (y_1 \geq y_0)$	$(x_1 \leq x_0) \& (y_0 > y_1)$	$(x_0 < x_1) \& (y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \leq x_1) \& (y_1 > y_0)$

başlangıç noktasının (x_0, y_0) 180° karşısına denk gelen (x_{e1}, y_{e1}) ve (x_{e2}, y_{e2}) noktaları Eş. 7 ile Şekil 2'de görüldüğü gibi bulunmaktadır.



Şekil 1. İki noktası ve yarıçapı bilinen dairenin merkez noktaları
(Center points of a circle found based on the radius and two points)



Şekil 2. Başlangıç noktasının 180° karşısına denk gelen noktaların bulunması
(Determination of the opposite points (180°) of the start point)

$$\begin{aligned} x_{e1} &= x_0 + 2(x_{c1} - x_0) ; y_{e1} = y_0 + 2(y_{c1} - y_0) \\ x_{e2} &= x_0 + 2(x_{c2} - x_0) ; y_{e2} = y_0 + 2(y_{c2} - y_0) \end{aligned} \quad (7)$$

Bölge seçimi yapıлып, (x_{e1}, y_{e1}) ve (x_{e2}, y_{e2}) noktaları tespit edildikten sonra Şekil 3'te durum diyagramı ile verilmiş

G02/G03 komutları için merkez seçim algoritması kullanılmaktadır. Önerilen yöntem kartezyen uzayda oluşabilecek tüm dairesel hareket olasılıklarını kapsadığı için tekrarlanabilir ve güvenilir bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak ilgili dairesel hareketin merkezi, durum diyagram çıktısı olan (x_c, y_c) noktasıdır.

2.1.2. Dairesel hareketin başlangıç noktasının ve dairesel hareket miktarının hesaplanması (Computation of the initial point and angle of the circular motion)

İstenen radyüsün başlangıç noktasının, belirlenen merkez noktasına göre ortaya çıkan dairesel yörüngenin hangi noktasına karşılık geldiği Eş. 8-Eş. 9'daki denklemler kullanılarak G02 ve G03 komutları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. θ_{02} , G02 komutu ile verilen saat yönündeki dairesel hareketin daire üzerindeki başlangıç açısı, θ_{03} ise G03 komutuna ilişkin saat yönünün tersinde oluşan dairesel hareketin ilgili daire üzerindeki başlangıç açısıdır.

$$\theta_{02} = \begin{cases} \tan^{-1}\left(-\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)}\right) & \text{if } (x_0 > x_c) \\ 180 + \tan^{-1}\left(-\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)}\right) & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_{03} = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)}\right) & \text{if } (x_0 > x_c) \\ 180 + \tan^{-1}\left(\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)}\right) & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (9)$$

Son adımda ise radyüsün, (x_0, y_0) noktasından sonra kaç derecelik açı yapacağını belirlenmesi gerekmektedir. Radyüs açısı değeri, θ değişkeni ile ifade edilmekte ve G02 komutu için Eş. 10, G03 komutu için ise Eş. 11 ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = 180 - 2 \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}}\right) \quad (10)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}}\right) \quad (11)$$

Önerilen yöntem doğrultusunda, G-kod dosyasına göre takip edilmesi gereken dairesel bir yörünge için gereken tüm değişkenler G02 ve G03 komutları için Şekil 4a ve Şekil 4b'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Dairesel hareket önceki bölümde bahsedildiği gibi seçilen düzlem özelliğine göre iki eksenle gerçekleşir. Eğer üçüncü eksen için de bir hareket söz konusu ise, yani kartezyen uzayda helisel bir hareket varsa, bu eksen içinde dairesel harekete senkronize doğrusal bir yörünge tanımlanmalıdır. G17 düzlemindeki dairesel bir hareket için, X-Y eksenlerinde oluşan yörüngeler ve X-Y eksen hareketine senkronize olan üçüncü eksen (Z) için oluşturulan yörünge denklemleri G02 ve G03 komutları için Eş. 12-Eş. 13'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
x &= (-R) \cos(\alpha) + x_c \\
y &= (R) \sin(\alpha) + y_c \\
z &= z_0 + \text{sign}(z_1 - z_0)(\alpha - \theta_{02}) \frac{|z_1 - z_0|}{\theta} \\
\alpha &= \left[\theta_{02} \frac{\pi}{180}, (\theta_{02} + \theta) \frac{\pi}{180} \right]
\end{aligned} \quad (12)$$

Her düzlem için farklı denklem yapısı kurulmaması için Tablo 2'de yer alan değişken değiştirme yöntemi önerilmektedir. Eğer bu yöntem kullanılırsa X-Y eksen her zaman dairesel, Z eksen de doğrusal hareket eksenidir.

$$\begin{aligned}
x &= (R) \cos(\alpha) + x_c \\
y &= (R) \sin(\alpha) + y_c \\
z &= z_0 + \text{sign}(z_1 - z_0)(\alpha - \theta_{03}) \frac{|z_1 - z_0|}{\theta} \\
\alpha &= \left[\theta_{03} \frac{\pi}{180}, (\theta_{03} + \theta) \frac{\pi}{180} \right]
\end{aligned} \quad (13)$$

3. YÖRÜNGE İNTERPOLASYON İŞLEMLERİ (INTERPOLATION PROCESS OF THE PATH)

Merkez noktası (x_c, y_c), başlangıç açısı (θ_0) ve dairesel hareket açısı (θ) bulunması eksen yörüngelerinin oluşturulmasında önemli bir yere sahiptir. Fakat interpolasyon parametresi olan α değişkeninin sabit artışlarla kullanılması, tezgâhın istenen hız değerinde çalışmasına

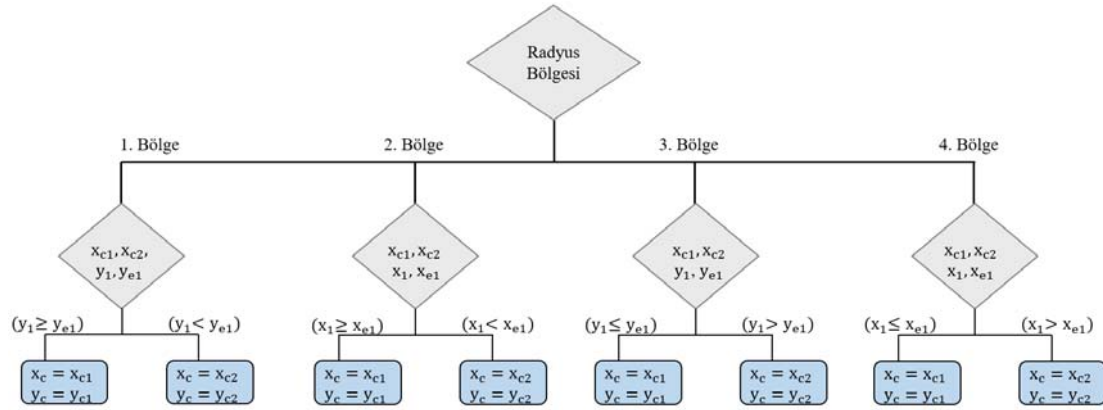
engel olmaktadır. Bu nedenle her komut satırı için bir hareket planlaması yaparak interpolasyon parametresinin hedeflenen hız profiline uygun bulunması sağlanmalıdır.

Tablo 2. Seçilen düzleme göre değişken değiştirme yönteminin uygulanması
(Implementation of variable change method according to the selected plane)

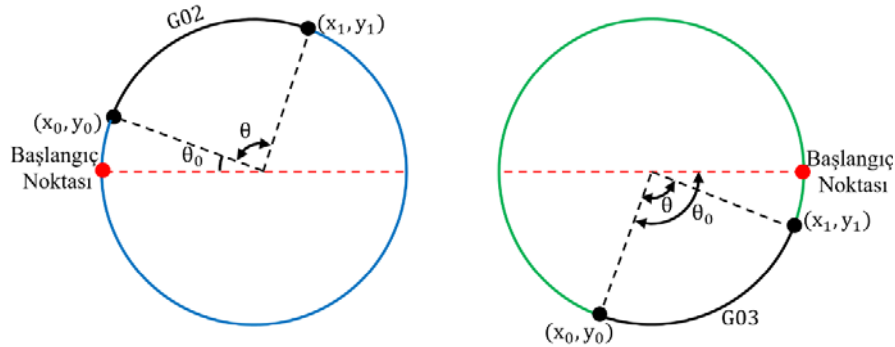
G17 (XY Düzlemi)	G18 (XZ Düzlemi)	G19 (YZ Düzlemi)
$x = x$	$x = x$	$x = y$
$y = y$	$y = z$	$y = z$
$z = z$	$z = y$	$z = x$

3.1. Jerk ve İvme Sınırlı Hız Profillerinin Çıkarılması (Jerk and Acceleration Limited Velocity Profiles)

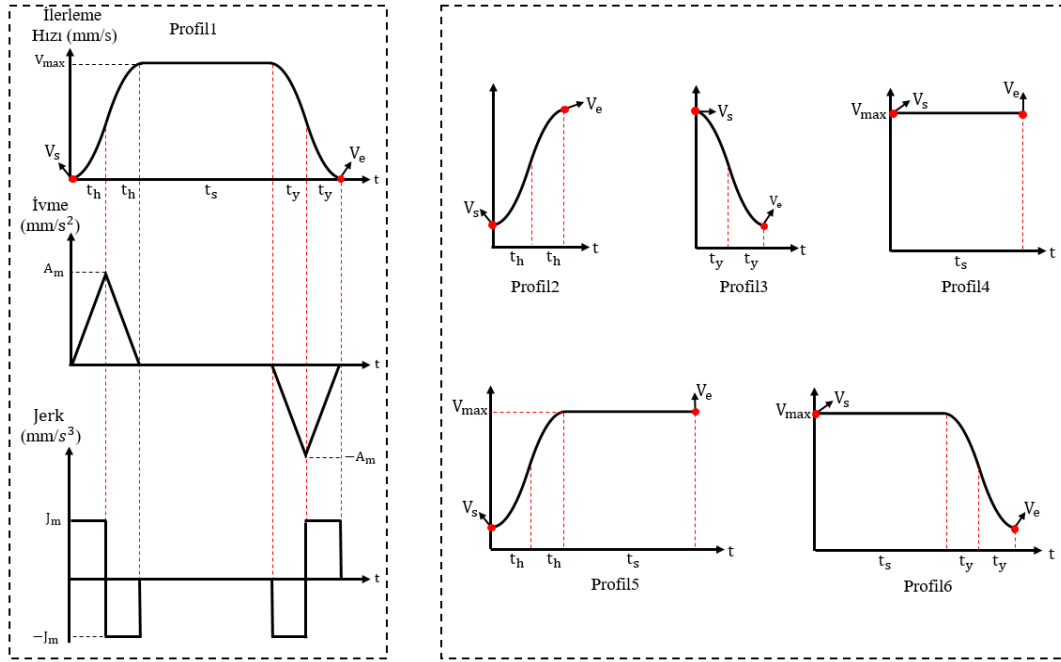
Bu çalışmada jerk ve ivme sınırlı hız profilleri oluşturularak tezgâhın istenen hız değerlerinde titreşimsiz çalışması garantiye alınmıştır. Çünkü kullanılan hız profillerinin jerk ve ivme sınırlama özelliği olmasının yanında, jerk her noktada sabit tutulmaktadır. Dolayısıyla tezgâhta meydana gelecek olası titreşim problemlerinin önüne geçilmektedir. Jerk ve ivme sınırlı hız profilleri Bezier, B-spline, NURBS eğrileri başta olmak üzere birçok eğrisel yörüngeler için farklı yapılarla oluşturulabilmektedir [12]. Şekil 5'te, beş parçalı sabit jerkli



Şekil 3. Merkez noktası seçimine ilişkin durum diyagramı (flow chart diagram for the selection of center point)



Şekil 4. G02 ve G03 komutları için başlangıç açısı ve radyüs açısının gösterimi
(Start angle and radius angle for G02 and G03 commands)



Şekil 5. Radyüs boyuna ve başlangıç/bitiş hız değerlerine bağlı olarak değişen hız profilleri
(The velocity profiles depending on the radius length and start/end velocity values)

ve hız/jerk sınırlandırılmalı hız profili [13-15] ve buna bağlı oluşan ivme ve jerk profilleri görülmektedir. Şekildeki grafiklerin oluşmasında hızlanma zamanı (t_h), sabit hız zamanı (t_s) ve yavaşlama zamanı (t_y) değerleri büyük öneme sahiptir. Bu zaman değerleri, oluşturulan hız profilinde meydana gelen jerk ve ivmeyi her zaman maksimum jerk ve ivme değerlerinin altında tutmaktadır. Şekil 5'te verilen hız profili (Profil1), ilk iki parçası hızlanma, bir parçası sabit hız ve son iki parçası da yavaşlanma olmak üzere toplamda 5 parçadan oluşmaktadır. Fakat radyüs boyuna ve başlangıç/bitiş hız değerlerine (V_s/V_e) bağlı olarak hız profil seçimi değişkenlik gösterebilir. Profil1 dışında seçilebilecek tüm hız profilleri yine Şekil 5'te görülmektedir. Eş. 14'te, Şekil 5'te görülen hız ivme ve jerk profillerine ilişkin denklemler tanımlanmıştır.

Eşitliklerde; $R_{boy} = (R)(\theta \frac{\pi}{180})$, $t_h = \sqrt{\frac{(V_{max}-V_s)}{J_m}}$, $t_y = \sqrt{\frac{(V_{max}-V_e)}{J_m}}$, $t_s = \frac{R_{boy} - (V_s+V_{max})t_h + (V_{max}+V_e)t_y}{V_{max}}$, $t_1 = t_h$, $t_2 = 2t_h$, $t_3 = 2t_h + t_s$, $t_4 = 2t_h + t_s + t_y$ ve $t_5 = 2t_h + t_s + 2t_y$ değerlerine sahiptirler. Ayrıca Eş. 14'te, $f_{1s} = f_0 + \frac{1}{2} J_m t_h^2$, $f_{2s} = f_{1s} + A_m t_h - \frac{1}{2} J_m t_h^2$, $f_{3s} = f_{2s}$, $f_{4s} = f_{3s} - \frac{1}{2} J_m t_y^2$ ve $D_m = J_m t_y$ olarak kullanılmaktadır.

3.2. Komut Satırları Arası Hız Geçiş Değerlerinin Bulunması

(Determination of the Velocity Transition Values between G-Commands)

Endüstriyel uygulamalarda binlerce satır G-kod dosyaları ile çalışıldığı için her komut satırı arasındaki geçişlerde hız değerlerinin kontrol edilmesi titreşimsiz tezgâh operasyonları açısından çok önemlidir. Bu doğrultuda çalışmanın önemli katkılarından birisi de her komut satırı

için oluşturulan hız profilleri arasındaki geçişlerin kontrol edilmesine yönelik algoritma geliştirilmesidir. Hareket geçişlerinin düzenlenmesinde, CNC tezgâhında o an işlenecek komut satırının başlangıç (x_0, y_0) ve bitiş noktaları (x_1, y_1), bir sonraki komut satırının ise bitiş noktası (x_2, y_2) kullanılarak aradaki açı değeri hesaplanmaktadır. (x_0, y_0) ve (x_1, y_1) arası bir doğru, (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) arası da bir doğru kabul edilerek, bu doğrular arasındaki açı değeri (β) Eş. 15 yardımı ile elde edilmektedir.

$$j(t) = \begin{cases} J_m, & 0 \leq \tau < t_1 \\ -J_m, & t_1 \leq \tau < t_2 \\ 0, & t_2 \leq \tau < t_3 \\ -J_m, & t_3 \leq \tau < t_4 \\ J_m, & t_4 \leq \tau < t_5 \end{cases}$$

$$a(t) = \begin{cases} J_m \tau, & 0 \leq \tau < t_1 \\ -A_m - J_m \tau, & t_1 \leq \tau < t_2 \\ 0, & t_2 \leq \tau < t_3 \\ -J_m \tau, & t_3 \leq \tau < t_4 \\ -A_m + J_m \tau, & t_4 \leq \tau < t_5 \end{cases} \quad (14)$$

$$v(t) = \begin{cases} f_0 + \frac{1}{2} J_m \tau^2, & 0 \leq \tau < t_1 \\ f_{1s} + A_m \tau - \frac{1}{2} J_m \tau^2, & t_1 \leq \tau < t_2 \\ f_{2s}, & t_2 \leq \tau < t_3 \\ f_{3s} - \frac{1}{2} J_m \tau^2, & t_3 \leq \tau < t_4 \\ f_{4s} - D_m \tau + \frac{1}{2} J_m \tau^2, & t_4 \leq \tau < t_5 \end{cases}$$

$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{(dx_{10} dx_{21}) + (dy_{10} dy_{21})}{\sqrt{dx_{10}^2 + dy_{10}^2} \sqrt{dx_{21}^2 + dy_{21}^2}} \right) \quad (15)$$

$$\beta^{(c)} = 180^\circ - \beta' \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

Denklemlerde, $dx_{10} = x_1 - x_0$, $dy_{10} = y_1 - y_0$, $dx_{21} = x_2 - x_1$, $dy_{21} = y_2 - y_1$ eşitliklerini ifade etmektedir. β açısının $0^\circ-180^\circ$ arasındaki değerlerini kapsayan bölge Norm₁ olarak isimlendirilirken, $180^\circ-360^\circ$ arasını kapsayan bölge ise Norm₋₁ olarak kabul edilmektedir. Şekil 6a'da, Norm₁ durumu için dört farklı (x_2, y_2) noktasının β açı aralıkları, Şekil 6b'de ise Norm₋₁ bölgesinde bulunan dört farklı (x_2, y_2) noktası için oluşan β açı değerleri örnek olarak gösterilmiştir.

Norm, β açı değeri ve satır geçişlerindeki G koduna bağlı olarak, o an işlenen yörüngenin bitiş hızı (V_e), sonraki komut satırındaki hareketin ise başlangıç hızı (V_s), $V_{e/s}$ değişkeni üzerinden Tablo 3'te görüldüğü gibi tespit edilmektedir. G01, doğrusal hareket komutu olduğu için G02 ya da G03 komutundan G01 komutuna bir geçiş söz konusu ise $V_{e/s} = 0$ olarak kabul edilmektedir.

3.3. Dairesel Hareket İnterpolasyon Parametrelerinin Hesaplanması

(Calculation of Circular Motion Interpolation Parameters)

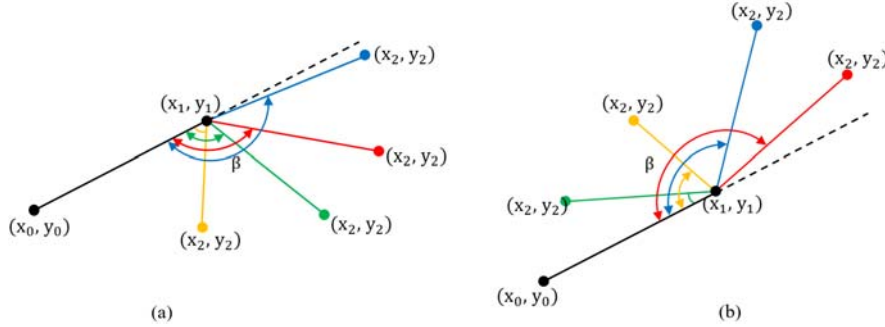
Hedeflenen sabit jerkli hız ve ivme profillerinin, dairesele yörüngelerin interpolasyon işleminde uygulanabilmesi için Taylor denklemi kullanılmaktadır. Taylor denklemleri literatürde CNC tezgâh kontrolüne ilişkin farklı matematiksel yöntemlerin uygulanmasında tercih edilen bir yöntemdir [16]. Dairesel ve helisel yörüngelerin interpolasyon işleminde ikinci dereceden Taylor denklemi Eş. 16'da görülen yapı ile kullanılmıştır.

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + T' + T''$$

$$T' = \frac{V(\alpha_i)}{|R'(\alpha_i)|} T_s \quad (16)$$

$$T'' = \frac{1}{|R'(\alpha_i)|} \left(A(\alpha_i) - \frac{R'(\alpha_i)R''(\alpha_i)}{|R'(\alpha_i)|^3} V(\alpha_i)^2 \right) \frac{T_s^2}{2}$$

Eşitlikteki α değeri, G02/G03 komutu için, hedeflenen hız ve ivme profili temelinde bulunan interpolasyon parametresidir. Ayrıca eşitlikteki $R'(k_i)$ ve $R''(k_i)$ ifadeleri her α_i değeri için hesaplanan yarıçapın birinci ve ikinci türevleri, $V(\alpha_i)$ ve $A(\alpha_i)$ ise hedeflenen hız ve ivme profillerinin her α_i parametresine karşılık gelen değerleridir. Son olarak eşitlikte yer alan T_s ise eksen veri yenileme süresidir. G17 düzleminde, altı komut satırından oluşan bir G-kod dosyası üzerinden önerilen yöntemlerin nasıl kullanıldığını Şekil 7'de örnek olarak gösterilmiştir. G02 komutları için, merkez noktası (x_c, y_c) , başlangıç açı değeri (θ_0) ve açısal hareket miktar (θ) değerleri bulunarak Şekil 7a'da görülen yörünge elde edilmektedir. G01 doğrusal hareket komutu bu çalışma kapsamına girmediği için sembolik olarak gösterilmiş ve yörünge planlamasına dâhil edilmemiştir. Fakat beşinci satırdaki G02 komutundan sonra G01 komutuna geçiş olduğu için bu noktada $V_{e/s} = 0$ değerini almaktadır. İlk beş satır için tüm $V_{e/s}$ ilerleme hız bilgileri bulunmuş ve bu veriler doğrultusunda oluşturulan genel hız/ivme profili Şekil 7b'de görüldüğü gibi oluşturulmaktadır. Dairesel hareket interpolasyon parametresi bulunduktan sonra ise X-Y eksenini için oluşan nihai eksen yörüngeleri Şekil 10a'da görüldüğü gibi elde edilmektedir. Z ekseninde herhangi bir hareket olmadığı için ürün işleme sürecinde sıfır olarak kalmaktadır.



Şekil 6. β açı aralıklarının gösterimi a) Norm₁ b) Norm₋₁ durumları için
(Representation of β angle for a) Norm₁ b) Norm₋₁)

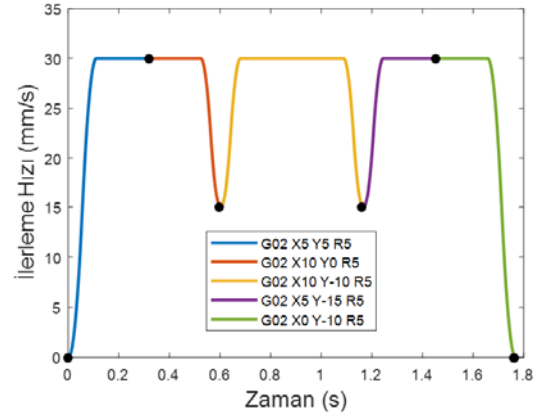
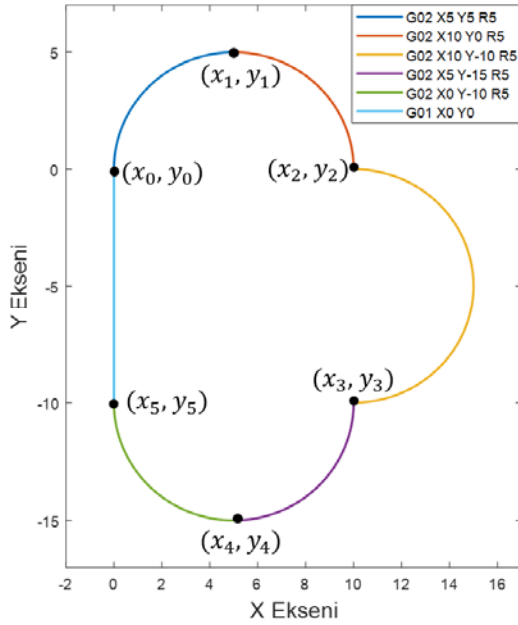
Tablo 3. Komut satır geçişlerine uygun $V_{e/s}$ değerlerinin bulunması (Determination of the $V_{e/s}$ Values between G-Commands)

	Norm ₁		Norm ₋₁	
	$\beta < 90$	$\beta \geq 90$	$\beta < 90$	$\beta \geq 90$
G02 → G01	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$
G02 → G02	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = V_{max}/2$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}/2$
G02 → G03	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$
G03 → G01	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$
G03 → G02	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$
G03 → G03	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = V_{max}/2$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}/2$

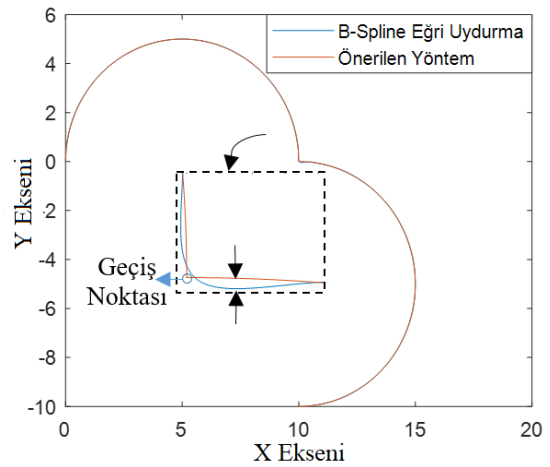
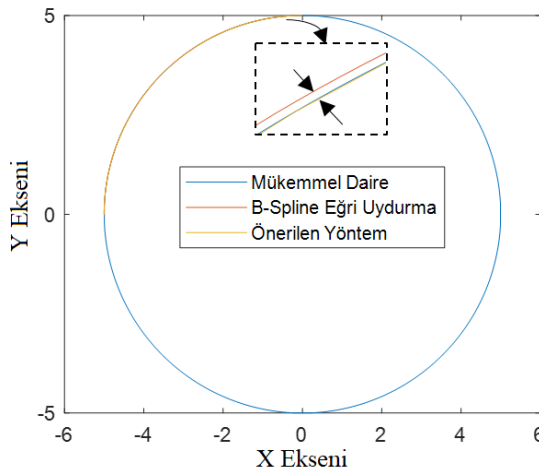
Bu çalışmada önerilen yörünge planlama algoritmasında doğrudan G02 ve G03 komutları ile verilen X-Y-Z ve R bilgileri kullanıldığı için, normalde kontur hatalarına yol açan ve ana yörüngeyi terk eden mevcut eğri uydurma (curve fitting) ve köşe yumuşatma (corner smoothing) yöntemlerinin bu dezavantajı ortadan kaldırılmaktadır. Yarıçapı 5 olan bir radius için, önerilen yöntem ve literatürdeki en gelişmiş eğri uydurma yöntemlerinden biri olan B-spline eğri uydurma yöntemi [17-19] ile çıkarılan yörüngeler, yüksek çözünürlüklü mükemmel daire olarak nitelendirilen dairesel yörünge üzerinde Şekil 8a'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. B-spline eğrisi G-kod dosyasında daire üzerinde belirli aralıklarla verilen nokta bulutlarına uygun yörünge planlaması yaptığı için Şekil 8a'da görüldüğü gibi kontur hatası oluşurken, önerilen yöntemle çıkarılan yörünge mükemmel daire üzerinde

olduğu görülmektedir. Şekil 8b'de ise ardışık iki dairesel harekete ilişkin yörünge karşılaştırılması yer almaktadır. B-spline eğrisi ile elde edilen yörünge iki dairesel hareket arasındaki geçiş noktasında ana yörüngeye bir miktar sapma yaptığı Şekil 8b'de görülmektedir. Fakat önerilen yöntemde G komutları ile verilen X-Y-Z ve R verilerine uygun yörünge planlaması yapıldığı için geçiş noktasında sapma meydana gelmemektedir.

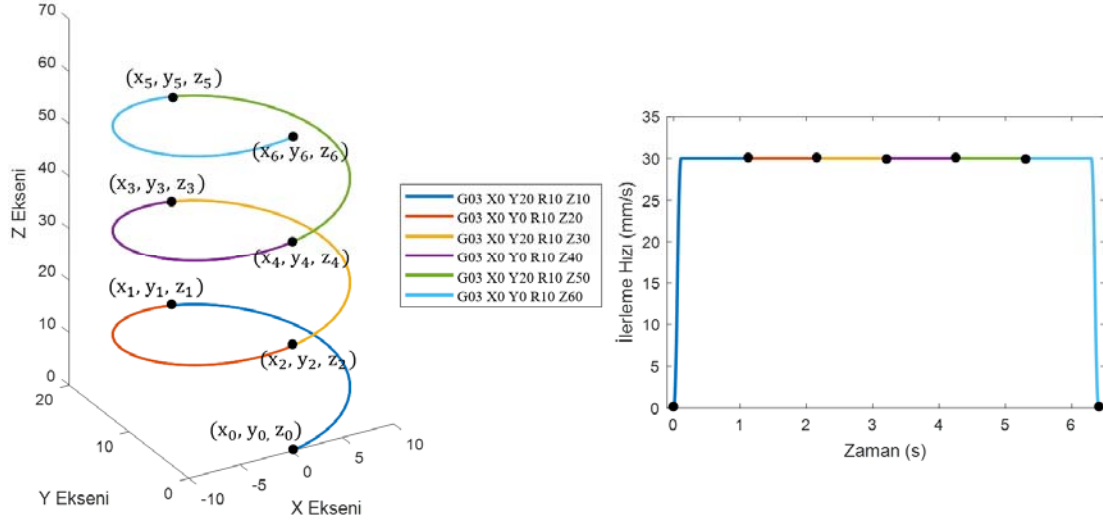
Helisel yörüngelerde dairesel harekete senkron çalışan üçüncü eksen için nasıl yörünge planlaması yapıldığını göstermek için ise G17 düzleminde yine altı komut satırından oluşan G03 komut temelli G-kod dosyası kullanılmıştır. G-kod dosyasına uygun çıkarılan yörünge Şekil 9a'da ve bu helisel yörünge için oluşturulan hız profili ise Şekil 9b'de verilmiştir.



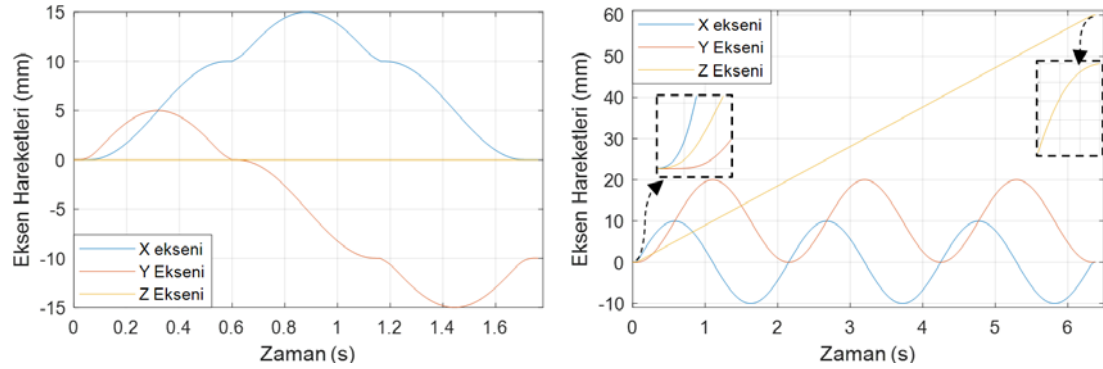
Şekil 7. a) Kartezyen uzayda işlenecek dairesel yörünge b) CNC tezgâhının takip edeceği hız profili
a) Circular motion in cartesian space b) velocity profile of the CNC machining)



Şekil 8. Önerilen yöntem ve B-spline eğri uydurma yöntemi ile çıkarılan yörüngelerin karşılaştırılması
(Comparison of the proposed method and B-spline curve fitting method)



Şekil 9. a) Kartezyen uzayda işlenecek helisel yörünge b) CNC tezgâhının takip edeceği hız profili
a) Helical motion in cartesian space b) velocity profile of the CNC machining)



Şekil 10. Eksen yörüngeleri a) dairesel hareket b) helisel hareket için
(Axis trajectories for a) circular motion b) helical motion)

Her komut satırı için β açısı 90 dereceden küçük ve her satırda G03 komutu kullanıldığı için komut geçiş hızları Tablo 3'ten $V_{e/s} = V_{max}$ olarak elde edilmekte ve bu nedenle Şekil 9b'de görüldüğü gibi sabit hızlı hareket planlaması oluşmaktadır. Eş. 16 ile bulunan interpolasyon parametresi (α), Eş. 13'te kullanılarak Şekil 10b'de görülen X, Y ve Z eksen yörüngeleri üretilmektedir. X-Y ekseninde dairesel hareket meydana gelirken, Z ekseninde ise kalkış ve duruşta sabit jerkli hız profili nedeniyle yumuşak geçişleri olan doğrusal hareket gerçekleşmektedir. Z eksenine senkronize hareket ettiği için helisel yörüngede doğrusal hareketten kaynaklı bir kayma oluşmamaktadır.

Jerk ve ivme sınırlandırılmalı hareket planlaması kartezyen uzayda yapılmasına rağmen eksenlerde oluşan ivme değerleri de motor kapasitelerini zorlamayacak düzeyde oluşmaktadır. Çünkü hız profilinin parametreleri olan maksimum jerk ve ivme değerleri tezgâh üzerindeki eksen motor kapasitelerine uygun seçilmektedir. Ayrıca aksel ivmeleri etkileyen bir diğer önemli parametre ise komut satırları arasındaki geçişte oluşan eksen yörüngelerinin yönelimidir. Eğer bir komuttan diğerine geçerken bir

eksende ters yönlü hareket ortaya çıkarsa bu noktalarda yüksek ivmelenme görülür. Bu tür sorunların önüne ise Tablo 3'teki hız seçim işlemi geçmektedir. Genel yapısı ile önerilen yöntemler eksenlerde oluşabilecek yüksek ivmeleri de engellemiş olmaktadır. Çalışmanın eksen ivmelerindeki etkisini göstermek için, aksel ivme sonuçları, interpolasyon parametresinin klasik bir yöntem olan sabit artımlı olarak belirlenmesi sonucunda (Eş. 17) oluşan aksel ivmelerle karşılaştırılmıştır. Dairesel ve helisel yörüngelerin işlenmesinde oluşan eksen ivmeleri Şekil 11'de görülmektedir. Önerilen yöntemle yapılan interpolasyon işlemlerinde eksen ivme değerleri 500 mm/s^2 değerini aşmaz iken, klasik yöntemde özellikle komut satır geçişlerinde çok yüksek ivmeler oluşmaktadır. Ayrıca eksenlerin kalkış ve duruş hareketlerinde ivmeler yavaş yavaş değişirken, klasik yöntemde bu şekilde bir kontrol yapısı bulunmamaktadır.

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{(V_{max})(T_s)(\theta \frac{\pi}{180})}{R_{boy}} \quad (17)$$

$$\alpha_0 = \theta_{02/03} \frac{\pi}{180}$$

4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

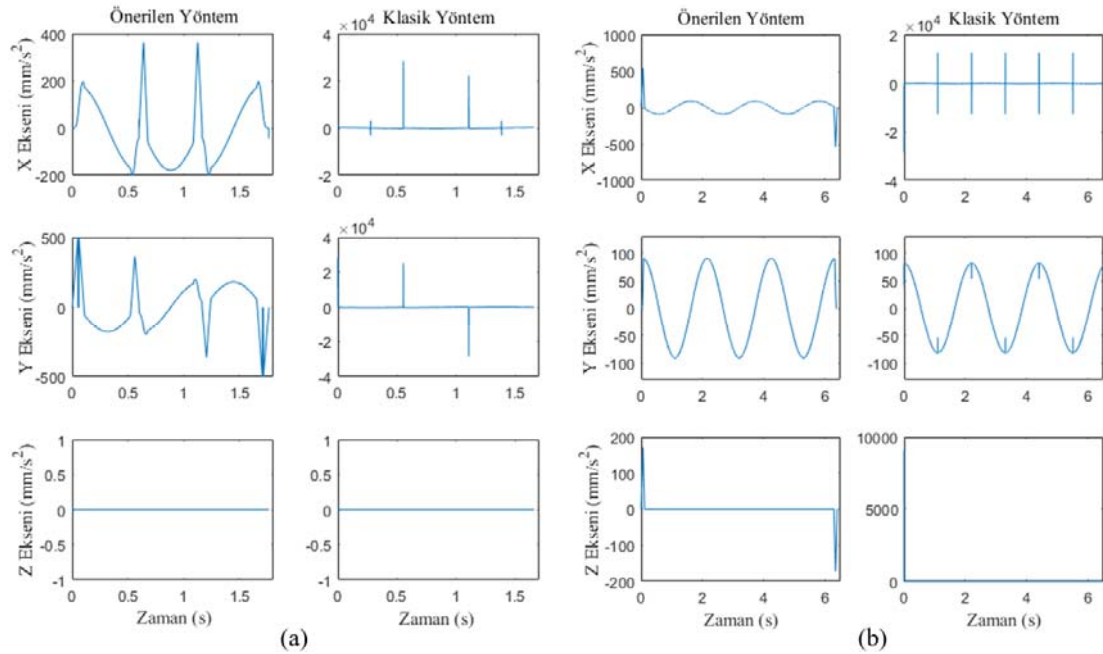
Bu çalışmada önerilen yöntemler endüstriyel CNC tezgâhlarına yönelik olduğu için, yapılan çalışmaların doğrulanması ve performans analiz işlemleri de endüstriyel bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda kullanılan CNC tezgâhı lastik kalıbı işleme özelinde geliştirilmiş (LKM), iki eksen doğrusal (Y-Z), iki eksen de döner (C-A) olmak üzere Şekil 12'de görüldüğü üzere toplamda dört eksen bulunmaktadır [20].

Endüstriyel bir tezgâh üzerinde kontrol uygulamaları yapabilmek için öncelikle eksen motorları ile haberleşecek bir alt yapının kurulması gereklidir. Haberleşme işlemi, Şekil 12'de görülen EtherCat master özelliği bulunan endüstriyel bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel bilgisayar üzerinde koşturulması için Şekil 12'de yer alan

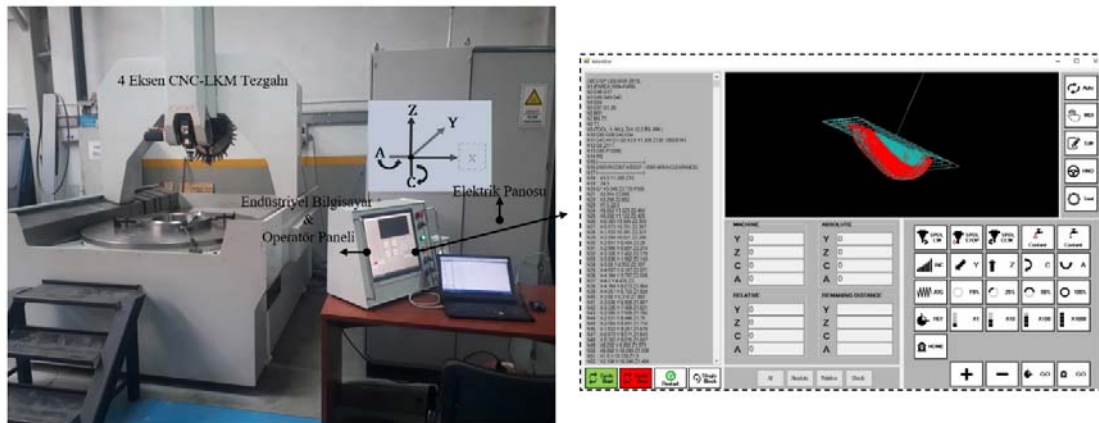
operatör panel görevi de olan kontrol ünitesi yazılımı geliştirilmiştir. Yazarlar tarafından geliştirilen yazılım üzerinden G-kod dosyası okunarak hareket planlama ve CNC tezgâhının kontrol işlemleri sağlanmaktadır. Ayrıca dokunmatik ekran ve diğer kontrol donanımlarından oluşan arayüz üzerinden, makine sıfır, parça sıfır, eksen tanımlama, parametre girme gibi tezgâh ayarlarının ve program yazma-değiştirme, spindle aç-kapat gibi tezgâh operatörünün manuel kullanımına yönelik tüm işlemler yapılmaktadır.

4.1. Kütük Parçaya Küresel Form Verme Uygulaması (The Application of Spherical Milling)

Endüstriyel bir CNC tezgâhının ürün işleme kabiliyetlerini görmek için genellikle dikdörtgen prizma formundaki kütük bir parça küresel bir forma dönüştürülmektedir. Bu



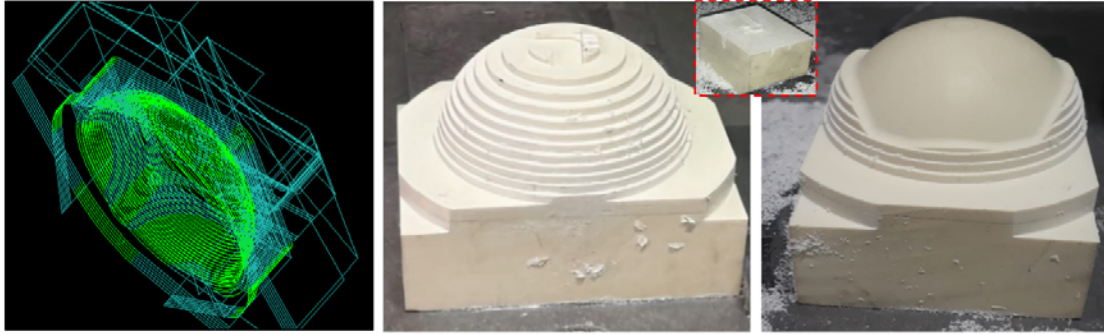
Şekil 11. Önerilen interpolasyon yönteminin klasik yöntemle karşılaştırması a) dairesel yörünge b) helisel yörünge
(Comparison of the proposed interpolation method with the classical method for a) circular trajectory b) helical trajectory)



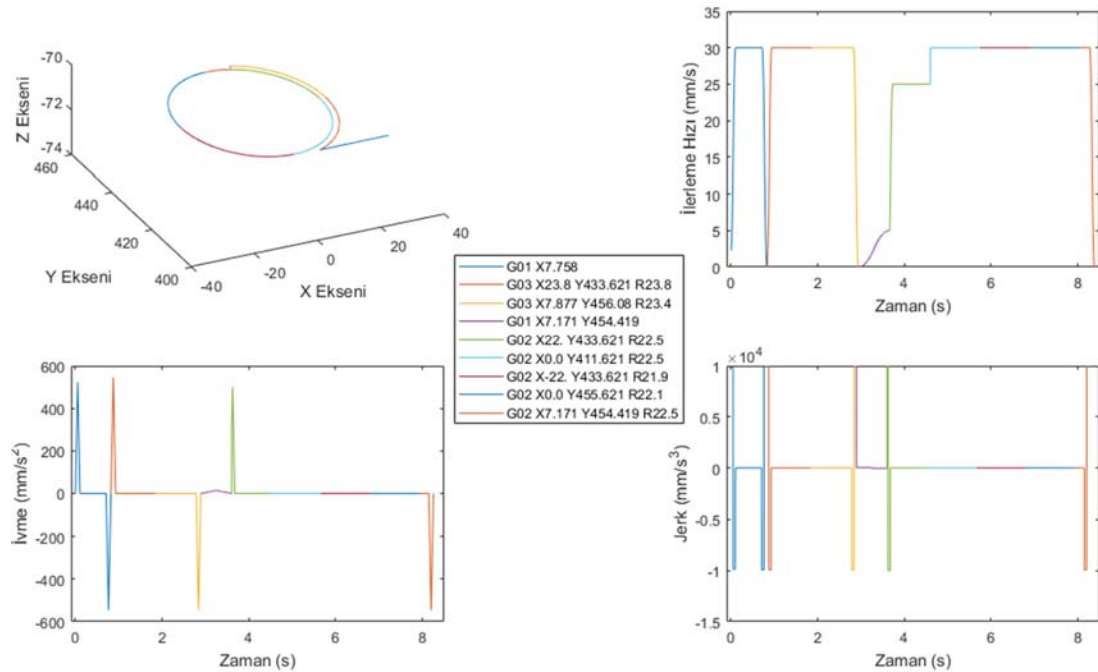
Şekil 12. CNC-LKM tezgâhı ve CNC kontrol ünitesi (CNC-LKM machining and CNC control unit)

çalışmada da önerilen matematiksel yöntemlerin deneysel performansını, içinde çok sayıda dairesel hareket bulunduran kapsamlı bir uygulamada görmek için kütük parçanın küresel forma dönüştürülmesi işlemi yapılmıştır. Bu uygulama kaba (1500 satır G-kodu) ve finiş (35.000 satır G-kodu) işleme olmak üzere iki farklı G-kod dosyası ile yapılmıştır. Şekil 13 (a)'da kontrol ünitesi arayüzü üzerinde kaba işleme program çıktısı görülmektedir. Şekilde turkuaz çizgiler ise dairesel hareketleri, yeşil çizgiler ise dairesel hareketleri göstermektedir. Şekil 13'te çerçeve içerisinde yer alan kütük parçanın, kaba ve finiş programlarının CNC tezgâhında çalıştırılmasından sonra küresel forma dönüşüm süreci Şekil 13 (b) ve (c)'de görülmektedir. 1500 satırlık kaba işleme programının yaklaşık 500 satırı G02/G03 komutlarına ilişkin dairesel hareket olduğu için, yapılan uygulamada önerilen yöntemlerin doğruluğu çok farklı G02/G03 komutları üzerinden test edilebilmiştir. Çünkü bu şekilde kapsamlı bir G-kod dosyasının tek bir satırında yapılacak hata tüm sürece tesir edeceği için, ürün çıktısı üzerinde yapılan hataların

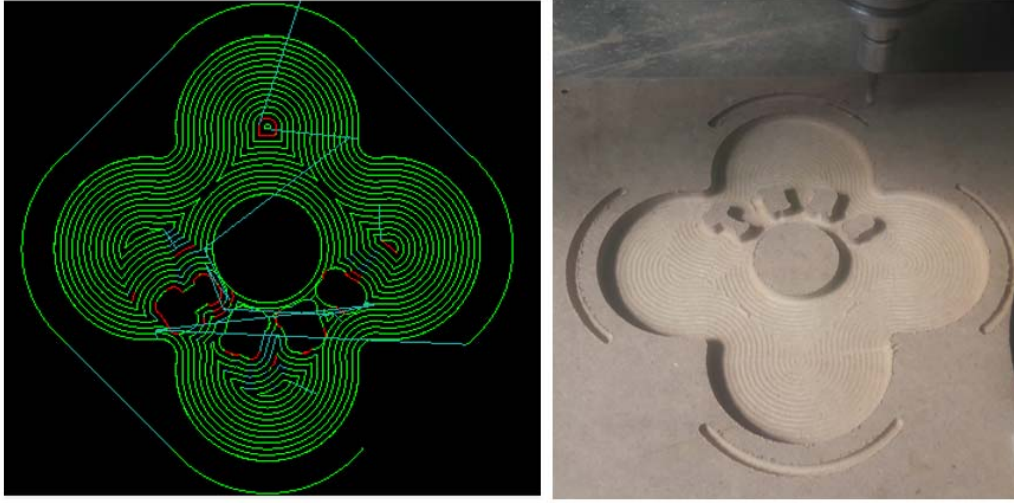
etkisi net olarak görülebilmektedir. Fakat bu uygulamada ürün çıktıının hedeflenen ürün çıktısı ile birebir uyduğu gözlemlenmiştir. Kartezyen uzaydaki kesici takım yörünge interpolasyon işlemlerinde tezgâh motorlarına uygun seçilen maksimum jerk ve ivme değerlerinin aşılmadığını ve tezgâh operasyonlarının titreşime neden olmayacak kararlı ivme ve jerk grafiklerine uygun gerçekleştiğini göstermek için kaba işleme uygulamasına ait G-kod dosyasının bir bölümünün interpolasyon işlem detayları verilmiştir. Şekil 14'te bu bölüme ait kesici takıma ait yörünge, hız, ivme ve jerk grafikleri görülmektedir. Hız grafiğinin hız geçiş kontrolüne uygun optimize edildiği, kartezyen uzaydaki kesici takım yer değiştirme eğrisinin ikinci ve üçüncü dereceden türevlerine karşılık gelen ve tezgâh titreşimlerine doğrudan etki eden ivme ve jerk grafiklerinin ne kadar düzenli olduğu ve ayrıca bu grafiklerde maksimum ivme (1000 mm/s^2) ve maksimum jerk (10.000 mm/s^3) değerlerinin aşılmadığı gözlemlenmiştir. Doğru yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerine ek olarak eksen yörünge takip başarısı da ürün



Şekil 13. a) Kaba işleme program çıktısı b) kaba işleme ürün çıktısı c) finiş işleme ürün çıktısı
(a) Roughing program output on the CNC control unit b) Roughing product output c) finishing product output)



Şekil 14. Kaba işleme uygulamasına ait bir bölümünün interpolasyon işlem detayları
(Interpolation process details of a part of the roughing application)

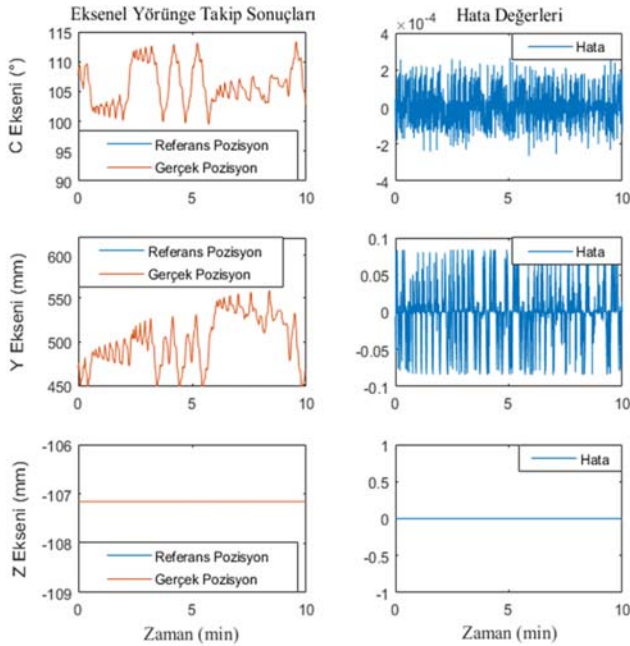


Şekil 16. a) Dairesel cep boşaltma işlemi program çıktısı b) ürün çıktısı
(a) Circular pocket milling program output on the CNC control unit b) product output)

Tablo 4. Eksenel yörünge takibine ilişkin RMSE ve MSE hata değerleri (RMSE and MSE error values for axial trajectory tracking)

	Küre Kaba İşleme Uygulaması		Küre Finiş İşleme Uygulaması		Dairesel Cep Boşaltma Uygulaması	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
C Eksen	5.52e-05	3.05e-09	5.24e-05	2.74e-09	6.95e-05	4.82e-09
Y Eksen	0.0032	1.05e-05	0.0023	5.32e-06	0.0391	0.0015
Z Eksen	8.61 e-04	7.46e-07	0.0014	1.87e-06	0	0

görülmektedir. Şekil 17’de yer alan Z eksen verisi 10 dakikalık süreçte sabit kaldığı için hata değeri de sıfır olarak kalmıştır.



Şekil 17. Dairesel cep boşaltma uygulamasına ilişkin eksenel yörünge takip sonuçları
(Trajectory tracking results of the axis motors for the circular pocket milling)

Eksen yörünge takip sonuçlarının sayısal değerler üzerinden analiz edilebilmesi için, Eş. 18’de yer alan ortalama karesel hata (MSE) ve ortalama karekök hata (RMSE) ölçütleri kullanılarak Tablo 4’teki hata miktarları hesaplanmıştır. $n=600.000$ için, tüm uygulamalar için referans pozisyon ile gerçek pozisyon arasındaki hataların çok küçük değerlerde olduğu Tablo 4’te görülmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_t)^2}, MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_t)^2 \quad (18)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Titreşimsiz, yüksek hız ve yüksek hassasiyetli tezgâh hareketlerinin sağlanması endüstriyel CNC tezgâhlarının temel hedefidir. Bu üç temel hedefe ise doğru yörünge planlaması, doğru kinematik ve dinamik analizlerin yapılması (motor kapasitelerine uygun ivme ve jerk değerlerinin tespit edilmesi), uygun hız ve ivme profillerinin belirlenmesi (optimize edilmiş hız ve ivme profili), bu profillere uygun yörünge interpolasyonunun yapılması ve bu yörüngelerin senkronize olarak eksen motorlarına gönderilmesi işlemlerinin sonucunda ulaşılmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, literatürdeki ilgili çalışmalardan farklı olarak G17, G18 ve G19 komutları temelinde verilen G02/G03 komutunda yer alan X-Y-Z ve R bilgileri üzerinden kontur hatası oluşturmayan yörünge planlama algoritması geliştirilmiştir. Önerilen yöntem ile planlanan yörüngeler, literatürde en başarılı eğri uydurma

yöntemlerinden biri olan B-spline eğri uydurma yöntemi ile elde edilen yörüngelerle karşılaştırılmıştır. Eğri uydurma yöntemleri G-kod dosyasında dairesel yörünge üzerinde belirli aralıklarla verilen nokta bulutlarına uygun yörünge planlaması yaptığı için kontur hatası oluşurken, yapılan çalışmada kontur hatası ve ana yörüngede sapma görülmemiştir. Yapılan çalışmaların doğrulanması ve performans analiz işlemleri de endüstriyel CNC-Freze tezgâhı sınıfına giren 4 eksen CNC-LKM tezgâhı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar için yazarlar tarafından geliştirilen CNC kontrol ünitesi yazılımı kullanılmış ve tezgâh üzerinde bulunan AC servo motorlar EtherCat protokolü üzerinden 1ms veri yenileme süresiyle kontrol edilmiştir. Kütük parçanın küresel form olarak işlenmesinde kaba işleme için 1500, finiş işleme için ise 35.000 satırlık G-kod dosyası, dairesel cep boşaltma uygulamasında ise 1200 satırlık G-kod dosyası kullanılmıştır. Ayrıca 1ms eksen veri yenileme zamanı ile çalışarak, kaba işlemede yaklaşık 3.000.000, finiş işlemede 5.400.000 ve cep boşaltma işleminde ise 1.200.000 eksen verisi (her eksen için ayrı) üretilmiş ve sırasıyla 50, 90 ve 20 dakika süren uygulama zamanları ortaya çıkmıştır. Yüksek eksen verisi üzerinden yörünge takip grafiklerinin değerlendirmesinin zor olması nedeniyle tüm uygulamaların yörünge takip sonuçları 10 dakikalık verilerle sınırlandırılmıştır. Yapılan uygulamalarda maksimum jerk değeri 10.000 mm/s^3 , ivme değeri 1000 mm/s^2 ve hız değeri ise 30 mm/s olarak belirlenmiştir. Kaba işleme uygulamasına ait G-kod dosyasının bir bölümünün interpolasyon işlemine ilişkin hız, ivme ve jerk grafiklerinde maksimum parametrelerin aşılmadığı ve tezgâh titreşimlerine doğrudan etki eden ivme ve jerk grafiklerinin sürekli ve kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Uygulamalarda eksen yörünge takip sonuçları RMSE ve MSE ölçütleri ile değerlendirilmiş ve mikron seviyelerinde hatalar ile yörüngelerin takip edildiği görülmüştür. Ayrıca ürün çıktılarında yapılan ölçümler de ürün işlemlerinin hatasız gerçekleştiğini göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gavas M., CNC Tekniği ve Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2019.
- Tulsyan S., Altintas Y., Local toolpath smoothing for five-axis machine tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 96, 15-26, 2015
- Fan W., Lee C., Chen J., A realtime curvature-smooth interpolation scheme and motion planning for CNC machining of short line segments, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 96, 27-46, 2015.
- Yan Y., Zhang L., Zhang K., Corner smoothing transition algorithm for five-axis linear tool path, *Procedia CIRP.*, 56, 604-609, 2016.
- Bharathi A., Dong J., Feedrate optimization for smooth minimum-time trajectory generation with higher order constraints, *Int J Adv Manuf Technol*, 82, 1029-1040, 2016.
- Tajima S, Sencer B., Accurate real-time interpolation of 5-axis tool-paths with local corner smoothing, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 142, 1-15, 2019.
- Lin F., Shen L., Yuan C., Mi Z., Certified space curve fitting and trajectory planning for CNC machining with cubic B-splines, *Comput. Des.*, 106, 13-29, 2019.
- Huang X., Zhao F., Tao T., Mei X., A newly developed corner smoothing methodology based on clothoid splines for high speed machine tools, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 70, 102106, 2021.
- Tajima S., Sencer B., Kinematic corner smoothing for high speed machine tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 108, 27-43, 2016.
- Tajima S., Sencer B., Global tool-path smoothing for CNC machine tools with uninterrupted acceleration, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 121, 81-95, 2017.
- Xiao Q., Wan M., Qin X., Liu Y., Zhang W., Real-time smoothing of G01 commands for five-axis machining by constructing an entire spline with the bounded smoothing error, *Mech. Mach. Theory.*, 161 104307, 2021.
- Giannellia C., Mugnainib D., Sestinia A., C^2 continuous time-dependent feedrate scheduling with configurable kinematic constraints, *Computer Aided Geometric Design*, 63, 78-95, 2018.
- Liu J., Fu H., Qin J., Jin H., Sliding look-ahead window-based real-time feedrate planning for non-uniform rational B-splines curves, *Advances in Mechanical Engineering*, 10 (12), 1-19, 2018.
- Tsai M., Nien H., Yau H., Development of an integrated look-ahead dynamics-based NURBS interpolator for high precision machinery, *Computer-Aided Design*, 40, 554-566, 2008.
- Altintas Y., Sencer B, High speed contouring control strategy for five-axis machine tools, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 59, 417-420, 2010.
- Huang X., Zhao F., Tao T., Mei X., A newly developed corner smoothing methodology based on clothoid splines for high speed machine tools, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 70, 102106, 2021.
- Zhang M., Yan W., Yuan CM., Wang DK., Gao XS., Curve fitting and optimal interpolation on CNC machines based on quadratic B-splines, *Science China Information Sciences*, 54, 1407-1418, 2011.
- Marie J., Duc E., Lartigue C., Bourdet P., A new format for 5-axis tool path computation using Bspline curves, *Computer-Aided Design*, 36, 1219-1229, 2004.
- Ren K, Xu K., Chen W., NURBS toolpath planning for glass sharp corner edge grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2997-3007, 2018.
- Kuncan M., Kaplan K., Ertunç H.M., Küçükateş S., Design, production and novel NC tool path generation of CNC tire mold processing machine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1183-1200, 2018.
- Soufiani B.N., Adlı M.A., Pole placement and LQR control of slosh-free liquid transportation with dual-arm cooperative robot, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 2255-2267, 2020.

22. Budaklı M.T., Yılmaz C., Stewart platform based robot design and control for passive exercises in ankle and knee rehabilitation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (4), 1831-1846, 2021.