

CNC Sistem Tasarımı: Beş Eksen Takım Tezgahı İçin Sürekli Takım Yolu Oluşturulması

CNC System Design: Continuous Tool Path Generation for Five Axis Machine Tool

Alican Kahraman¹, Enes Demir², S. Çağlar Başlamışlı³, Onur Tunçer⁴

¹Ar-Ge Departmanı
Versus Mühendislik A.Ş., Ankara
alicankahraman0@gmail.com

²Makine Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi, İstanbul
enesdemir15@marun.edu.tr

³Makine Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
scaglarb@hacettepe.edu.tr

⁴Uçak Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
tuncero@itu.edu.tr

Abstract

Reference trajectory generation has a crucial role in Computer Numeric Control (CNC) machine tools. The most common type of trajectory generation is three axis linear trajectory generation. However in 3 axis machine tools, it may be difficult to machine natural formed surfaces. Therefore, in addition to three linear axes, two rotary axes are used. While the position of the tool tip changes relative to the coordinates of the work-piece, its orientation can also change. Continuity of trajectory must be provided and natural frequencies of the machine tool must not be excited. In this study, C^2 continuity is guaranteed with micro splines on corners between segments in five axes as well. In addition to tool tip position, micro splines are fit to tool orientation as well. These micro splines are generated with jerk limited trapezoidal acceleration profile. Linear and circular motion segments except micro splines are interpolated in servo sampling time. Tool orientation vectors inside a motion segment are calculated with Rodrigues formula. As a result, position, velocity, acceleration and jerk for tool tip that moves on linear and circular segments and changes its orientation, are interpolated in work piece frame with 1ms. Machine tool's status is shown by transforming from work piece frame to machine joints frame with inverse kinematics.

1. Giriş

Günümüzde yaygın şekilde kullanılan CNC takım tezgahlarında talaşlı imalat daha seri ve esnek hale getirilmiştir. Bu makinelerde nümerik işlemler gelişmiş olup üç eksen üzeri de imalat yapabilmektedirler. Beş eksenli CNC takım tezgahları türbin kanadı gibi doğal formlara sahip parçalar ortaya çıkarabilmektedir.

CNC takım tezgahlarında takım ucu yörüngesinin oluştu-

Özetçe

Bilgisayarlı Sayısal Denetimli (CNC) takım tezgahlarında referans takım yolu oluşturulması önemli bir role sahiptir. Takım yolu üretme çeşitlerinden en yaygını üç eksen doğrusal takım yoludur. Fakat üç eksen takım tezgahlarında, iş parçasına doğal formlar vermek zor olabilmektedir. Bu yüzden daha kompleks parçalar işlenmesinde üç eksen doğrusal ve iki eksen dönel eklemler beraber kullanılmaktadır. İşlenen parça koordinatlarına göre takım ucunun pozisyonu değişirken aynı zamanda yönü de değişebilir. Takım tezgahlarında takım yolunun sürekliliği sağlanmalı ve doğal frekanslar tetiklenmemelidir. Bundan yola çıkarak üç eksen de olduğu gibi doğrusal ve dairesel hareket fark etmeksizin beş eksen de yörünge parçası birleşim köşelerinde mikro eğriler ile C^2 süreklilik sağlanmalıdır. Takım ucu pozisyonuna ek olarak takım yönünde de mikro eğri atılmaktadır. Bu mikro eğriler ivme ve sarsıntı limitli beşinci derece polinomlar ile oluşturulmaktadır. Mikro eğrili köşeler harici olan doğrusal ve dairesel yörüngeler sarsıntı ivmeli trapez ivme profili ile enterpole edilmiştir. Ara takım ucu doğrultu vektörleri Rodrigues formülasyonuna göre hesaplanmıştır. Sonuç olarak çeşitli doğrusal ve dairesel yörüngelerden geçen ve yönü de değişebilen takım ucu için iş parçası koordinatlarında pozisyon, hız, ivme ve sarsıntı değerleri 1 ms örnekleme zamanında enterpole edilerek hesaplanmıştır. Ters kinematik ile iş parçası koordinatından, makine eklem koordinatına geçerek makinenin eklem durumları da verilmiştir.

rulması bir çok yönden kritik öneme sahiptir. Titreşimsiz, sürrekli bir hareket istenmektedir. Takım ucunun nihai gideceği hedef konumlar ve hızlar G kodunda verilmektedir. Fakat servo sürücülere hedef pozisyon beslenirken hareketin servo örneklemeye zamanında (ör. 1ms) enterpole edilmesi gerekmektedir. Enterpole edilmiş bu yörünge belirli ivme ve sarsıntı limitleri içerisinde kalmalıdır.

Kahraman ve diğerleri [2] tarafından gerçekleştirilen önceki çalışmada üç eksen doğrusal CNC takım tezgahları takım yolu oluşturulmuştur. Bu çalışmada Erkorkmaz ve Altıntaş'ın çalışması [1] referans alınarak sarsıntı (jerk) limitli ve yörünge parçası geçişlerinde mikro eğrilere sahip sürekli bir takım yolu üretilmiştir. Karmaşık şekilli parçaların üretiminde beş eksen takım tezgahları için takım yolu hesabında farklı bir yol izlenmesi gerekmektedir. Beudaert ve diğerleri [4] çalışmasında beş eksen makineler için kübik B-spline kullanarak geçiş bölgelerinde yumuşatma sağlamıştır. Ara yön vektörleri için Rodrigues formülü kullanmıştır. Beudaert, mikro eğri bölgelerinde yönün sürekliliğinin sağlanması için geçiş bölgesinde eksenleri kontrol etmektedir. Zhang'ın[5] çalışmasında farklı eksenel sınırları dikkate alarak değişken ivme ve sarsıntı optimizasyon yöntemiyle ilerleme hızı planlaması yaparak her doğrusal yörünge parçasının dinamik performansını düzenlemektedir. Ardından, S-düzleminde ivme ve yavaşlama algoritması temelinde ilerleme hızı planlayarak daha yumuşak kinematik profiller oluşturur. Ayrıca, belirtilen köşe hatası dahilinde köşe süresini analitik olarak hesaplar ve böylece ardışık doğrusal yörünge parçalarının birleşiminde ilerleme hızını ayarlayarak köşe yumuşatmaktadır. Sunulan köşe yumuşatma yöntemiyle, daha hızlı işleme süresiyle daha düzgün ve sürekli bir takım yolu oluşturur. Zhang'ın[5] çalışmasında iki yörünge parçasının birleşimindeki geçiş bölgesinin süresi, belirtilen takım ucu hatası ve takım yön hatasına dayalı olarak hesaplanır ve ilerleme hızı profilleri, eksenel kinematik kısıtlamalar altında düzgün yörüngeler oluşturmak için harmanlanır. Önerilen yöntem, ilerleme hızı profillerini doğrudan harmanlayarak köşe noktayı doğrudan yumuşatabildiğinden, iki adımlı köşe yumuşatma algoritmalarında parametrik eğrilerin oluşturulmasını ve enterpolasyon sürecini ortadan kaldırır. Sencer [6] çalışmasında, beş eksenli takım tezgahları için gerçek zamanlı bir yörünge oluşturma algoritması ortaya koymuştur. Sonlu Darbe Tepkisi (FIR) filtreleri, gerçek zamanlı olarak sarsıntı sınırlı hareket yörüngeleri oluşturmak için kullanılır. Takım merkez noktasının (TCP) doğrusal öteleme hareketi, G01 bloklarındaki Kartezyen hız darbelerinin FIR filtrelemesi ile enterpole edilir. Sabit hızlı takım eksen dönüşü oluşturmak için küresel koordinatta doğrusal enterpolasyon kullanılır ve birim takım yönlendirme vektörleri (ORI) doğrudan küresel koordinatlarda filtrelenir. Hassas takım hareketi senkronizasyonu, öteleme ve dönüş enterpolasyonu için kullanılan FIR filtrelerinin zaman sabitlerinin eşleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Kesintisiz yol enterpolasyonu, ardışık doğrusal G01 komutlarının yerel olarak harmanlanmasıyla elde edilir. Geometrik harmanlama eğrilerini uydurmak ve ilerleme hızını düzenleme problemi yerine, FIR filtrelemenin yumuşatma işlevi kullanılmış ve gerçek zamanlı uygulama için doğrudan tek adımlı yol yumuşatma algoritması önermiştir. Sun ve Altıntaş [7] çalışmasında, eğri yüzeylerin beş eksenli işlenmesi için kesişme noktalarında birinci, ikinci ve üçüncü geometrik türevlerinin sürekliliği olan eğri yol parçaları (micro-spline) ekleyerek bir ge-

ometrik yumuşatma algoritması sunar. Doğrusal takım yolu yörüngeleri, yol hatalarını belirlenen bir tolerans dahilinde sınırlandırırken, önce Bezier eğrileri tarafından yumuşatılır. Takım ucu konumu ve takım yönü yer değiştirmeleri, takım eksenini boyunca süreksiz yer değiştirmeleri önlemek için senkronize edilir. Tulsyan ve Altıntaş [8] çalışmasında takım yolu konumu ve yönlendirmesi için bitişik doğrusal yörüngeler arasına sırasıyla senkronize beşinci derece (quintic) ve normalleştirilmiş septik mikro eğri eklemektedir. Kullanıcı tanımlı köşe pozisyon toleransı limitlerine uyulurken, eğriler ve doğrusal yörünge parçaları arasındaki bağlantı noktalarında C^2 sürekliliği elde etmek için optimum kontrol noktaları hesaplar.

Bu çalışmada Kahraman ve diğerlerinin çalışması [2] beş eksene uyarlanmıştır. Kahraman, Demir ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışmaların [2], [10] devamı niteliğindedir. Bu çalışmada doğrusal hareketin başlangıç ve bitiş takım ucu yönleri bilindiği takdirde takım ucu pozisyonun ilerlemesine oranla Rodrigues formülasyonuna [4] göre ara yön vektörleri hesaplanmıştır. Üç eksende köşelere uydurulan mikro eğriye ek olarak takım yönü için de mikro eğri uydurulmaktadır. Bu yeni yaklaşımda alt (takım ucu pozisyonu) ve üst (takım yönünü belirten) olmak üzere iki mikro eğri bulunmaktadır. Üst eğrinin başlangıç, bitiş ve köşe noktası takımın hesaplanan doğrultusu ile hesaplanmaktadır. Böylece alt ve üst eğriler beraber uydurulduktan sonra trapez ivme profilinde hem takım ucu pozisyonu hem de takım yönü hareket profili elde edilmektedir. Ardından Jacobian matrisi ile geliştirilen ters kinematik algoritması ile gerçek makine eklem uzayında beş eksen hareketler gözlemlenmiştir.

2. Referans Takım Yolunun Oluşturulması

Beş eksen takım tezgahında eklem pozisyonlarının bulunması için takım ucunun uzaydaki koordinatı ve yön bilgisi bilinmelidir. Bu bölümde, takım ucunun koordinatı ve yönü her bir enterpolasyon adımında pozisyon, hız ve ivmede sürekliliği olacak şekilde hesaplanmaktadır. Ardışık yörünge parçalarının harmanlandığı geçiş bölgeleri dışında Erkorkmaz ve Altıntaş'ın [1] çalışmasındaki sarsıntı limitli trapez ivme profili kullanılmıştır. Geçiş bölgeleri dışında ara yön vektörleri bulunurken Rodrigues rotasyon formülünden faydalanılmıştır. Geçiş bölgelerinde ise beşinci derece polinom eğriler kullanılarak süreklilik sağlanmaktadır. Geçiş bölgelerindeki koordinatlar hesaplanırken Kahraman ve diğerleri [2]'nin çalışmasındaki yöntem uygulanmıştır. Yön vektörü hesaplanırken bu yöntem Bölüm 3'deki gibi genişletilmiştir.

2.1. Ara yön vektörlerinin hesaplanması

Bu bölümde bir yörünge parçası için ara yön vektörlerinin hesabı anlatılmaktadır. G-kodundan okunan başlangıç (\mathbf{V}) ve bitiş (\mathbf{U}) yön vektörleri, ile bir düzlem elde edilir ve bu düzlemin normal (\mathbf{k}) dış çarpım (cross product) kullanılarak Eş. 1'de ki gibi hesaplanır.

$$\mathbf{k} = \mathbf{V} \times \mathbf{U} \quad (1)$$

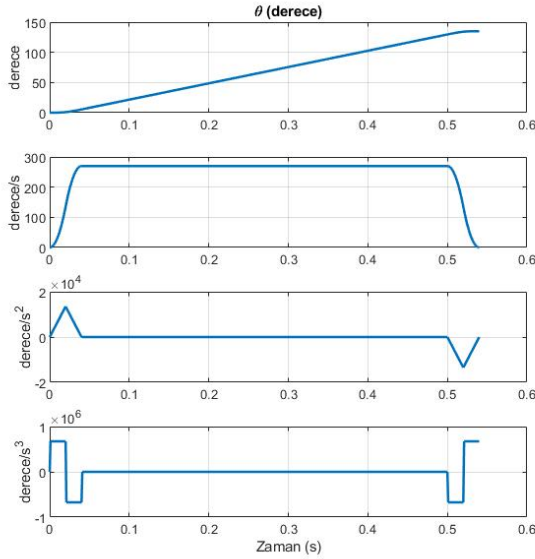
Eş. 2'de gösterilen Rodrigues rotasyon formülü yardımı ile ara oryantasyon vektörleri bulunmaktadır.

$$\mathbf{V}_{\text{rot}} = \mathbf{V} \cos \theta + (\mathbf{k} \times \mathbf{V}) \sin \theta + \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{V})(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

\mathbf{V}_{rot} herhangi bir ara noktanın yön vektörüdür. θ ise 0'dan başlayarak, başlangıç (\mathbf{V}) ve bitiş (\mathbf{U}) yön vektörleri arasındaki açıya kadar (θ_{maks}), giderek artan bir açıdır.

$\theta = 0$ iken ara vektör (\mathbf{V}_{rot}), başlangıç vektörüne (\mathbf{V}) eşittir. $\theta = \theta_{maks}$ iken ara vektör (\mathbf{V}_{rot}), bitiş yön vektörüne (\mathbf{U}) eşittir. θ açısının değişimi Eş. 3'deki formüldeki gibi s-düzlemindeki takımın aldığı yol üzerinden hesaplanılarak θ değişiminde trapez ivme profili Şekil 1'deki gibi sağlanmıştır.

$$\theta = \frac{S_{rot}}{S_{toplama}} \theta_s \quad (3)$$

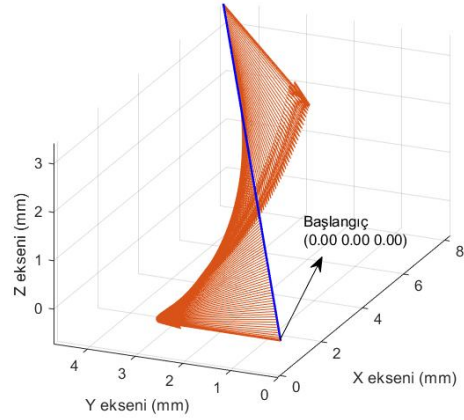


Şekil 1: θ açısının değişimi

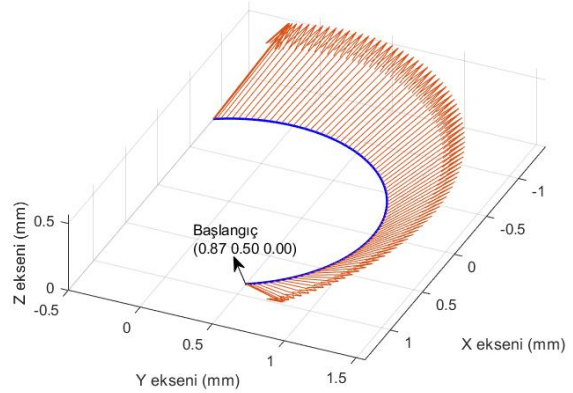
Her bir interpolasyon adımında Rodrigues formülü ile yön vektörleri hesaplanarak takım yolu Şekil 2 ve 3'deki gibi çizdirilmiştir. (yön vektörleri görünüm açısından her yüz adımda bir çizdirilmiştir.)

3. Mikro Eğriler ile Takım Yolu Birleştirme

Bölüm 2.1'de ara yön vektörleri Rodrigues rotasyon formülü ile bulunmuştu. Bu bölümde ardışık yörüngelerin birleşiminde sürekliliği sağlamak ve keskin geçişleri yumuşatmak için Kahraman ve diğerlerinin çalışmasında [2] kullanılan yöntem beş eksene genişletilmiştir. Şekil 4'de iki doğrusal yörünge birleşimi gösterilmektedir. Yörünge parçaları alt ve üst olmak üzere iki adet beşinci derece eğriler kullanılarak birleştirilmektedir. Alttaki eğri, Kahraman'ın çalışmasındaki [2] gibi köşe toleransı kadar uzaklaşarak bulunmaktadır. Alt eğri başlangıç ve bitiş noktaları bulunduktan sonra Eş. 2 ve 3 formülleri kullanılarak mavi renkle gösterilen, eğri başlangıç ve bitiş yön vektörleri bulunmaktadır (bkz. Şekil 4). Alt eğri, başlangıç, bitiş ve köşe noktalarının koordinatı ve bu noktadaki yön vektörleri kullanılarak üst eğrinin başlangıç bitiş ve köşe noktasının koordinatı (turuncu renkli üçgensel alan üzerinde) bulunmaktadır. Üst



Şekil 2: Örnek doğrusal yörünge parçasında ara vektörler



Şekil 3: Örnek dairesel yörünge parçasında ara vektörler

eğrinin başlangıç ve bitiş noktadaki hız ve ivmeleri ise alt eğrinin başlangıç bitiş hızı ivmesi ve yön vektörünün açısal hızları kullanılarak bağıl hız formülleri ile hesaplanmaktadır.

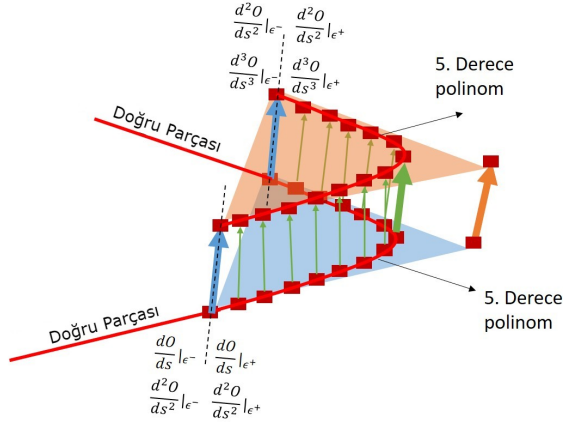
Üst eğrinin başlangıç koordinatı hızı ve ivmesi bulunduktan sonra her bir eksenindeki koordinatları (alt eğrideki enterpolasyon adımlarıyla aynı anda) aşağıda gösterilen beşinci derece polinomlarla bulunmuştur. Alt eğrilerinki bir önceki çalışmada [2] anlatılmaktadır.

$$x = a_x \tau^5 + b_x \tau^4 + c_x \tau^3 + d_x \tau^2 + e_x \tau + f_x \quad (4)$$

$$y = a_y \tau^5 + b_y \tau^4 + c_y \tau^3 + d_y \tau^2 + e_y \tau + f_y \quad (5)$$

$$z = a_z \tau^5 + b_z \tau^4 + c_z \tau^3 + d_z \tau^2 + e_z \tau + f_z \quad (6)$$

Böylece her bir enterpolasyon adımında alt ve üst eğriler oluşmaktadır. Üst eğrilerin koordinatından alt eğrilerin koordinatı



Şekil 4: Geçiş bölgesinde oluşturulan mikro eğri

çıkarılıp normaline bölündüğü zaman her bir interpolasyon adımıdaki yön vektörü bulunmaktadır.

$$O_i = \frac{P_{ust,i} - P_{alt,i}}{\|P_{ust,i} - P_{alt,i}\|} \quad (7)$$

Burada O_i spline bölgesindeki i . enterpolasyon adımındaki yön vektörüdür. $P_{ust,i}$ üst eğrideki i . enterpolasyon adımındaki koordinattır. $P_{alt,i}$ alt eğrideki i . enterpolasyon adımındaki koordinattır.

3.1. Hız optimizasyonu ve maksimum eğri hızı

Yörünge geçişlerinde, açının küçük olması ve hızın yüksek olması durumunda, verilen tolerans dahilinde hız yeterince düşürülememektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için öz-yinelenmeli yöntemle yörünge parçası içi hız, trapez ivme profili ile eğri başlangıç noktasına gelmeden düşürülmektedir. İterasyonda bağlı hız formülleri ile yön vektörü üzerinde bulunan üst eğrideki ara noktaların hızları da makine limiti aşmayacak şekilde sınırlandırılır.

Uygun hız seviyesi bulunduktan sonra, yörünge parçası bitiş hızı (f_{e_i}), maksimum eğri başlangıç hızına (v_0) ve bir sonraki yörünge parçasının başlama hızı ($f_{s_{i+1}}$), eğri bitiş hızına (v_1) eşitlenerek hızda süreklilik sağlanmaktadır.

$$f_{e_i} = v_0 \quad (8)$$

$$f_{s_{i+1}} = v_1 \quad (9)$$

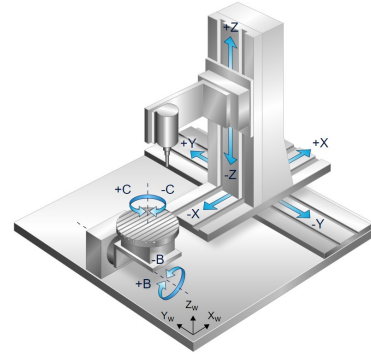
İvmede süreklilik sağlanması için eğri başlangıç ve bitiş ivmelerinin yörünge parçası tipine göre seçilmesi gerekmektedir. Eğri ivme başlangıç koşulları doğrusal yörüngelerde 0 olarak alınmaktadır. Dairesel yörüngelerde ise merkezci ivmenin etkisi eklenmektedir. Tablo 1'de farklı geçiş durumlarında olması gereken ivmeler verilmektedir. Üç boyutlu durumlarda eğrinin oluşturulduğu düzlem ile dairenin düzlemi farklı olduğundan ivme ve hız vektörlerinin izdüşümü kullanılmaktadır. Üst eğri başlangıç ve bitiş ivmeleri bağlı hız formülleri ile hesaplandığı için Tablo 1'deki yörünge tipi özelliklerini taşımaktadır. Üst eğri üzerindeki ara noktaların ivmeleri de makine limitlerini aşmayacak şekilde iterasyonla belirlenmektedir.

Tablo 1: Eğri ivme başlangıç koşulları

Yörünge tiplerine göre eğri başlangıç ve bitiş ivmeleri				
	Köşe noktadan önceki yörünge parçası	Köşe noktadan sonraki yörünge	Eğri başlangıç ivmesi a_{0x}	Eğri başlangıç ivmesi a_{1x}
1	Doğru	Doğru	0	0
2	Doğru	Daire	0	v^2/R
3	Daire	Daire	v^2/R	v^2/R
4	Daire	Doğru	v^2/R	0

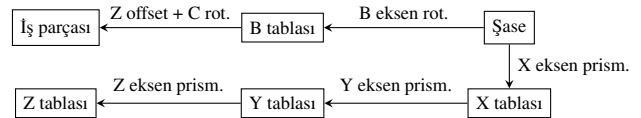
4. Ters Kinematik ile Makine Eklem Uzayına Geçiş

Önceki bölümde iş parçası koordinatlarında enterpolasyon yapıp her örnekleme zamanında takım ucu pozisyonu ve yönü bulunmuştur. Bu bölümde ise takımı, iş parçasına göre istenilen pozisyona ve yöne götüren makine eksen pozisyonlarının nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Böylece iş parçası koordinatlarından makine eksen koordinatlarına geçerek makineye hareket verilmelidir.



Şekil 5: Beş eksenli makinenin kinematik konfigürasyonu [9]

İleri ve ters kinematik hesaplamaları Şekil 5'e göre yapılmıştır. Örnek makine, üç doğrusal ve iki dönel eksenle oluşmaktadır. Kinematik dönüşümler için gerekli olan kinematik zincir (Koordinat sistemleri ve eklemler) aşağıdaki gibidir.



Şekil 6: 5 eksenli makinenin kinematik zinciri

Kinematik dönüşümde 4x4 homojen matrislerden yararlanılmıştır. Dönüşüm, iş parçası ile takım ucu arasında yapılabildiğinden, dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi iş parçasından takıma olacak şekilde temsil edilmektedir.

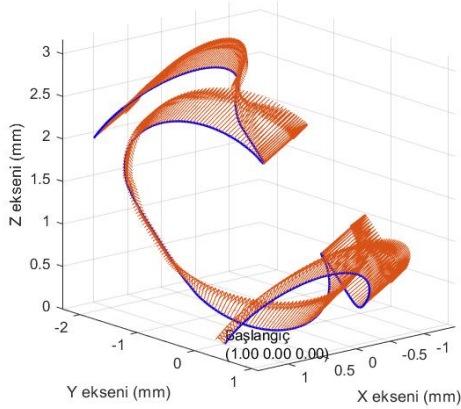
$$T_{isparcası}^{takım} = (T_B^W)^{-1} * (T_G^B)^{-1} * T_G^X * T_X^Y * T_Y^Z = T_W^Z \quad (10)$$

$(T_B^W)^{-1}$: İş parçasından B eksenı tablasına transform matrisi
 $(T_G^B)^{-1}$: B eksenı tablasından şaseye transform matrisi
 T_G^X : Şaseden X eksenı tablasına transform matrisi
 T_X^Y : X eksenı tablasından Y eksenı tablasına transform matrisi
 T_Y^Z : Y eksenı tablasından Z eksenı tablasına transform matrisi
 T_W^Z : İş parçasından Z eksenı tablasına transform matrisi

Farklı makine konfigürasyonlarında çözüm istenmesi sebebiyle iteratif yöntemlerle çözülebilmesi için Jacobian yöntemi uygulanmıştır. Bu Jacobian matrisinin tersi kullanılarak takımın istenilen konuma ve yöne götürülen eklem konumları bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta O_i \\ \Delta O_j \\ \Delta O_k \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial T_x} & \frac{\partial x}{\partial T_y} & \frac{\partial x}{\partial T_z} & \frac{\partial x}{\partial \theta_B} & \frac{\partial x}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial y}{\partial T_x} & \frac{\partial y}{\partial T_y} & \frac{\partial y}{\partial T_z} & \frac{\partial y}{\partial \theta_B} & \frac{\partial y}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial z}{\partial T_x} & \frac{\partial z}{\partial T_y} & \frac{\partial z}{\partial T_z} & \frac{\partial z}{\partial \theta_B} & \frac{\partial z}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial O_i}{\partial T_x} & \frac{\partial O_i}{\partial T_y} & \frac{\partial O_i}{\partial T_z} & \frac{\partial O_i}{\partial \theta_B} & \frac{\partial O_i}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial O_j}{\partial T_x} & \frac{\partial O_j}{\partial T_y} & \frac{\partial O_j}{\partial T_z} & \frac{\partial O_j}{\partial \theta_B} & \frac{\partial O_j}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial O_k}{\partial T_x} & \frac{\partial O_k}{\partial T_y} & \frac{\partial O_k}{\partial T_z} & \frac{\partial O_k}{\partial \theta_B} & \frac{\partial O_k}{\partial \theta_C} \end{bmatrix}}_{Jacobian} * \begin{bmatrix} \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \\ \Delta \theta_B \\ \Delta \theta_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ters kinematik algoritmasının detayları ise sonraki çalışmalarda sunulacaktır.



Şekil 7: 5 eksen ardışık doğru ve daire yörünge parçalarından oluşan örnek profil

5. Sonuçlar ve Tartışma

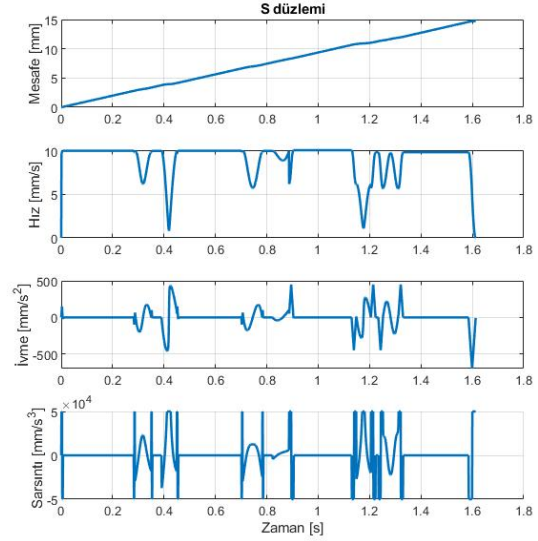
Oluşturulan beş eksen takım yolu oluşturma algoritması, Şekil 7'de gösterilen ardışık dairesel ve doğrusal yörüngelerinin oluşturduğu profile çalıştırılmıştır. Geçiş bölgesinde mikro eğriler ile takım yolu oluşturulmuştur.

Şekil 8'de ise takım yolunun s-düzlemindeki kinematik profili gösterilmektedir. Görüldüğü üzere 0.3 ve 0.4 s'lerdeki gibi köşe dönerken hız düşürülmektedir. 10 mm/s olarak verilen ilerleme hızına ulaşmıştır. Ayrıca sırasıyla 4000 mm/s² ve 50000 mm/s³ olarak verilen ivme ve sarsıntı limitlerini aşmamıştır. Şekil 9 ve 10'de eksenel kinematik profili ve yön vek-

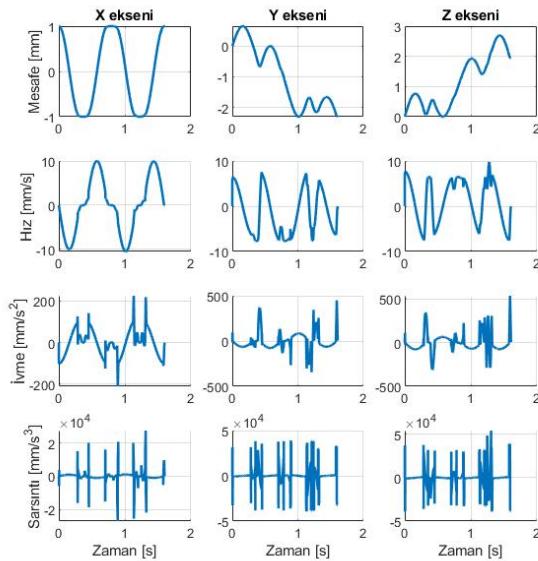
törü gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde verilen limitlerin aşılmadığı görülmektedir.

Şekil 11'de ise ters kinematik algoritması ile üretilen makine eklem pozisyonları ve türevleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere pozisyon, hız ve ivmede istenilen süreklilik sağlanmaktadır.

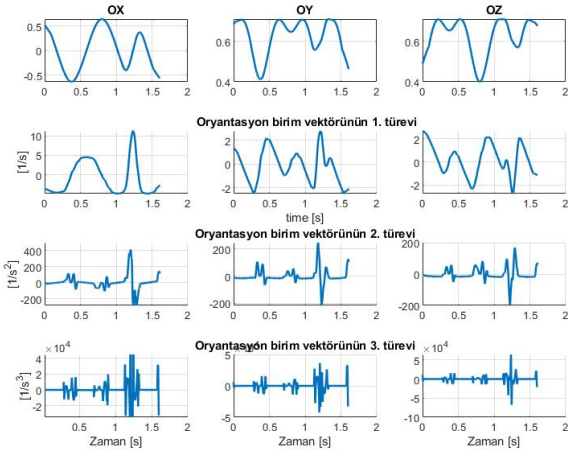
Sonraki çalışmalarda kinematik algoritmasının detayı veriliş gerçek tezgah üzerinde testler yapılacaktır.



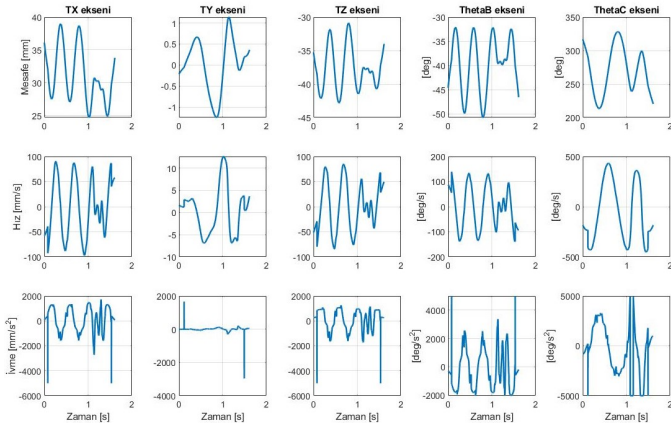
Şekil 8: Örnek profilin kinematik profili



Şekil 9: Örnek profilin eksenel kinematik profili



Şekil 10: Yön vektörünün kinematik profili



Şekil 11: Ters kinematik ile hesaplanan eklemlerin pozisyon ve hızları

6. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 3210224 numaralı "5 Eksen Yeni Nesil CNC Kontrol Sistemi ve Dijital İkiz Platformu Geliştirilmesi" başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürü borç biliriz. Ayrıca teknik desteklerinden ötürü Prof. Dr. Yusuf Altıntaş'a ve Milteksan CNC Teknoloji ve Kontrol Sistemleri San. A.Ş. Firmasına teşekkürlerimizi sunarız.

7. Kaynakça

- [1] K. Erkorkmaz, Y. Altıntaş, "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation", International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt 41, sayı 9, sayfa 1323-1345, 2001.
- [2] Kahraman A., Demir E., Başlamışlı S. Ç., Doğan B., Tun-

çer O., Altıntaş Y., "CNC Sistem Tasarımı Bölüm I: Mikro Eğriler ile Sarsıntı Limitli Takım Yolu Oluşturulması", Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi, 2022, sayfa 219-224

- [4] X. Beudaert, S. Lavernhe, and C. Tournier, "5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities," International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt 73, sayfa 9–16, 2013
- [5] Zhang, Yong-Bin v.d. "A corner smoothing method with feedrate blending for linear segments under geometric and kinematic constraints." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 234.9 (2020): 1227-1245.
- [6] Tajima, Shingo, Burak Sencer. "Accurate real-time interpolation of 5-axis tool-paths with local corner smoothing." International Journal of Machine Tools and Manufacture 142 (2019): 1-15.
- [7] Sun, Shujie, Yusuf Altıntaş. "A G3 continuous tool path smoothing method for 5-axis CNC machining." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (2021): cilt 32, sayfa 529-549.
- [8] Tulsyan, Sneha; Altıntaş, Yusuf. Local toolpath smoothing for five-axis machine tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, cilt 96, sayfa 15-26.
- [9] ISG GmbH (2021) 'Kinematic Transformations'. Stuttgart, Germany
- [10] Demir E., Köse A. İ., Başlamışlı S. Ç., Yüksel, B, Doğan B., Tunçer O., Şimşir U., Altıntaş Y., "CNC Sistem Tasarımı Bölüm II: 3 Eksen Test Donanımı Kurulması ve Sistem Tanımlaması", Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi, 2022, p. 208-213