

UOT 007.5

BEŞ SƏRBƏSTLİK DƏRƏCƏSİNƏ MALİK ROBOT QOLUNUN MODELLEŞDİRİLMƏSİ VƏ MATLAB MÜHİTİNDƏ İDARƏ EDİLMƏSİ

Məmmədova K.A., Nəsimzadə Z., Əliyeva A.A.

*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
AZ1010, Bakı şəh., Azadlıq pr. 20*

Xülasə. Bu məqalədə insan qolu anatomiyasına əsaslanan insanabənzər robot qolunun modelləşdirilməsi və simulyasiyası təqdim edilir. Bu işdə beş sərbəstlik dərəcəsi olan insanabənzər robot qolu kinematik və dinamik baxımından araşdırılmışdır. Robot qolunun dinamik tənliklərini yazmaq və hər bir oynağın dinamik davranışını müşahidə etmək üçün Matlab/Simulink proqramından istifadə edilmişdir. Robot idarəetmə qolunun modelləşdirilməsində məqsəd robotun son nöqtəsinin verilmiş trayektoriyanı ən uyğun şəkildə izləməsini təmin etməkdir. Bunun üçün sistemin riyazi modeli qurulmuş və sistemin uyğun idarəedici modeli layihələndirilmişdir. Müasir robot qolunun idarəetmə sistemlərində tətbiq edilən əsas yanaşma hər bir qolun müstəqil servo mexanizmlər kimi nəzərdən keçirməkdir. Robot qollarını idarə etmək üçün sürətə və fırlanma momentinə nəzarət kimi müxtəlif yanaşmalar üzərində araşdırmalar aparılmışdır. PID tənzimləyici ən çox istifadə edilən əks-əlaqəli idarəetmə problemlərinin öhdəsindən çox yaxşı gəldiyi üçün robot qolunu və hər bir birləşmə

nöqtəsini idarə etmək üçün PID idarəetmə sistemindən istifadə edilmişdir. Alınmış riyazi tənliklər və PİD idarəetmələri MatlabSimulink mühitinə köçürülmüş və sınaqdan keçirilmişdir.

Abstract. *This paper presents the modeling and simulation of a humanoid robotic arm based on human arm anatomy. In this study, a humanoid robot arm with five degrees of freedom was investigated in terms of kinematics and dynamics. Matlab/Simulink software was used to write the dynamic equations of the robot arm and observe the dynamic behavior of each joint. The goal of modeling a robot control arm is to ensure that the end point of the robot follows a given trajectory in the most appropriate way. For this, a mathematical model of the system was built and a suitable control model of the system was designed. The main approach used in modern robotic arm control systems is to consider each arm as an independent servo mechanism. Various approaches, such as velocity and torque control, have been investigated to control robotic arms. A PID control system was used to control the robot arm and each joint point, as the PID controller copes very well with the most commonly used feedback control problems. Obtained mathematical equations and PID controls were transferred to MatlabSimulink environment and tested.*

Аннотация. *В этой статье представлено моделирование гуманоидной роботизированной руки на основе анатомии человеческой руки. В этом исследовании рука гуманоидного робота с пятью степенями свободы была исследована с точки зрения кинематики и динамики. Программное обеспечение Matlab/Simulink использовалось для написания динамических уравнений руки робота и наблюдения за динамическим поведением каждого сустава. Целью моделирования рычага управления роботом является обеспечение того, чтобы конечная точка робота следовала заданной траектории наиболее подходящим образом. Для этого была построена математическая модель системы и спроектирована подходящая модель управления системой. Основной подход, используемый в современных системах управления роботизированной рукой, заключается в рассмотрении каждой руки как независимого сервомеханизма. Для управления роботизированными руками были исследованы различные подходы, такие как управление скоростью и крутящим моментом. Для управления манипулятором робота и каждой точкой соединения использовалась система ПИД-управления, поскольку ПИД-регулятор очень хорошо справляется с наиболее часто используемыми задачами управления с обратной связью. Полученные математические уравнения и ПИД-управления были перенесены в среду MatlabSimulink и протестированы.*

Açar sözlər: *insanabənzər robot qolu, PID tənzimləyici, PID idarəetmə sistemi, robot qolunun dinamik və kinematik modeli, Robot qolunun Matlab/Simulink blok diagramı*

Key words: *humanoid robot arm, PID controller, PID control system, dynamic and kinematic model of robot arm, Matlab/Simulink block diagram of robot arm*

Ключевые слова: *рука гуманоидного робота, ПИД-регулятор, система ПИД-управления, динамическая и кинематическая модель руки робота, блок-схема руки робота Matlab/Simulink*

Giriş. İnsanabənzər robotlar və onların üzvlərinin dizaynı, istehsalı və idarə edilməsi son illərdə mühüm tədqiqat mövzuları olmuşdur. İnsanlar üçün təhlükə yaradan yerlərdə, çətin şəraitdə və ağır işlərdə, buna nail olmaq üçün insan qolları və ayaqları ilə oxşar quruluşa malik olan insanabənzər qol və ayaqlar üzərində araşdırmalar sürətlənmişdir. Əvvəllər sənayedə sabit aşağı platformalı manipulyatorlar istifadə olunurdu. Halbuki insanlar ayaqları sayəsində hərəkət edə bilən və oynaq quruluşu sayəsində bir çox hərəkəti asanlıqla yerinə yetirə bilən canlılardır. Sabit platforma manipulyatorlarında bu məhdudiyyətləri aradan qaldırmaq üçün insanabənzər robot dizaynlarına ehtiyac var idi. Bu işdə alt platforması sürünən və yuxarı hissəsi insanın üst bədənində bənzəyən bir robot platformasına aid qolun dinamikası üzərində dayanılmış və idarəetmə alqoritmi hazırlanmışdır. Ədəbiyyata baxdığımızda çoxlu uğurlu insanabənzər robot dizaynları var. Xüsusilə, insan qolunun hərəkətililiyinə yaxın olduğu üçün 5 və 7 sərbəstlik dərəcəsi ilə insanabənzər robot qolunun dizaynına

xüsusi diqqət yetirilib. Vaseda Universiteti (Yaponiya) tərəfindən Wabian insanabənzər robot və Wendy mobil robotu dizayn işləri aparılmışdır.

Arnold adlı tək qollu mobil insanabənzər robot 1997-ci ildə Ruhr Universiteti tərəfindən hazırlanmışdır. Hermes 1999-cu ildə mobil robot platforması hazırlanmışdır. "DAV" adlı mobil insanabənzər robot 2002-ci ildə Miçigan Universiteti (ABŞ) tərəfindən hazırlanmışdır. Bu robot dizayn və dəyəri nəzərə alınmaqla hazırlanmışdır [1]. Bu istehsal edilmiş robotun əsas ölçüləri 750(l) x 750 (w) x 1700(h) (mm) təşkil edir. Robot ümumilikdə 43 sərbəstlik dərəcəsinə malikdir. Bunlardan 4-ü bədənin hərəkətini təmin edən təkərlərə, 2-si bədənə, 7-si qollara, 8-i əllərə, 8-i isə başa aiddir. Bundan əlavə, robot bir-birindən müstəqil işləyən iki kameraya malikdir [1]. "Robovie" adlı mobil insanabənzər robot 2002-ci ildə Vakayama Universiteti (Yaponiya) tərəfindən hazırlanmışdır. Üst bədəni insana bənzəyən bu robot insanlarla ünsiyyət qurmaq üçün nəzərdə tutulub. O, eşitmə, görmə və toxunma kimi insan hissələrinin funksiyalarını yerinə yetirmək üçün müxtəlif sensorlara malikdir [2]. "YİREN" adlı mobil insanabənzər robot 2005-ci ildə Şenyan Universiteti (Çin) tərəfindən hazırlanmışdır [3]. Mobil humanoid robotun təkərləri qarışıq məkanda hərtərəfli hərəkəti təmin etmək üçün nəzərdə tutulub. Robot ümumilikdə 23 sərbəstlik dərəcəsinə malikdir. Bunlardan 3-ü bədənin hərəkətini təmin edən təkərlərə malikdir (onlardan 2-si sürücü təkər, 1 səyahət təkər), 7 qollara, 1 əl, 2 bel və 2 boyun nahiyəsinə aiddir [3].

Bu məqalədə robot manipulyatorlarının mexanikasını modelləşdirmək üçün metod təqdim edilmişdir. İki keçidli planar robot qolunun modelləşdirilməsi və idarə edilməsi prosedurunun tam təsviri SimMechanics Toolbox-da mexaniki modelin yaradılmasından Matlab/Simulink istifadə edərək simulyasiya edilmişdir. Robot manipulyatorları üçün ən sadə mövqe idarəediciilərindən biri istənilən çəkisi kompensasiyasına malik PID idarəetmədir. Bu metodun tətbiqi bu modeldə yoxlanıldı. Simulyasiyanın nəticələri göstərir ki, SimMechanics robotun mexanikasını modelləşdirmək üçün istifadə edilə bilər və sabit cazibə kompensasiyası üsulu ilə müqayisədə onlayn cazibə kompensasiyası üsulu ilə daha yaxşı performans əldə edilə bilər.

2. Robot qolunun kinematikası. Robot manipulyatorlarının mövqeyinə nəzarət robot idarəetməsində ən sadə məqsəd olmaqla eyni zamanda praktik manipulyatorlarda ən aktual məsələlərdən biridir. Bu nəzarət problemini müalicə etmək üçün bir çox yanaşma tətbiq edilmişdir. Məlumdur ki, sərt robot qolu, cazibə qüvvəsinin əks əlaqə ilə ləğv edilməsi sərti ilə, birgə xətlər üzrə PD nəzarətçi vasitəsilə verilmiş birgə konfigurasiya ətrafında qlobal miqyasda asimptotik şəkildə sabitləşdirilə bilər. Mütənasib qazanc üzrə mülayim şəraitdə bu sxemi istədiyiniz konfigurasiyada yalnız sabit çəkisi kompensasiyasını yerinə yetirməklə sadələşdirmək olar [1]. Bu yazı Sciavicco və Siciliano [2] tərəfindən hazırlanmış bir nümunə araşdırmasını təqdim edir, burada qeyri-xətti cazibə kompensasiyası termini mövcud konfigurasiyada onlayn olaraq qiymətləndirilir. Amma burada biz SimMechanics Toolbox istifadə edərək robot manipulyatorunun mexanikasını modelləşdiririk. SimMechanics-dən robotun mexanikasını modelləşdirmək üçün bir vasitə kimi istifadə modelə əsaslanan idarəetmə alqoritmini yoxlamaq imkanı verir.

Bu işdə beş sərbəstlik dərəcəsi olan insanabənzər robot qolu kinematik və dinamika baxımından araşdırıldı. Beş sərbəstlik dərəcəsi olan insanabənzər robot qolunun bir çox fərqli dizaynı var. Bunlardan ən çox istifadə olunanlar şəkil 1-də verilmişdir [7].

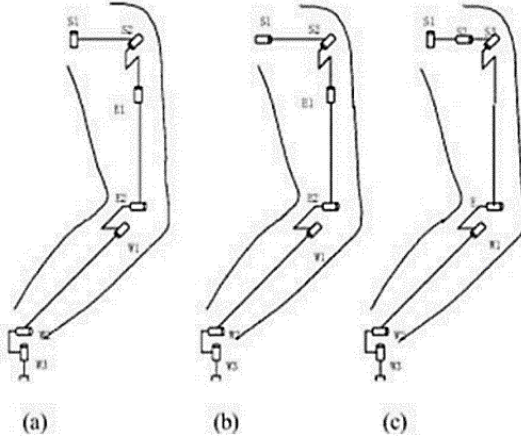
Bu işdə şəkil 1b-dəki qol quruluşu seçilmişdir. Seçilmiş qol quruluşuna uyğun olaraq hər bir üzvün istinad koordinat sistemi və istinad sistemi şəkil 2-də göstərilmişdir.

Şəkil 2-də göstərilən mexanizmdə θ -lar (teta) hər birləşmənin bucaq yerdəyişməsini göstərir. İnsanabənzər robot qolumuz beş sərbəstlik dərəcəsinə malik olduğundan, beş fərqli θ bucağı var. C_m -lər də əzələlərin ağırlıq mərkəzini göstərir. Hər bir üzv kvadrat kəsikli düzbucaqlı prizma kimi seçilmişdir.

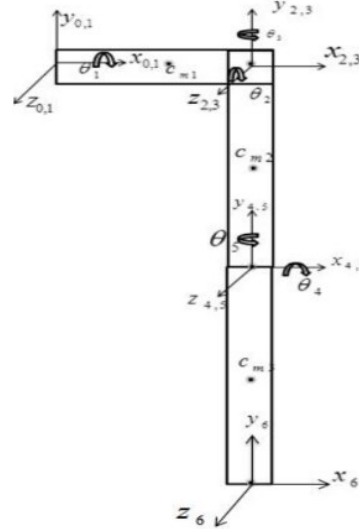
Robot qolunun istinad koordinat sisteminə uyğun olaraq i və $i-1$ birləşmələri arasında koordinat çevrilməsi homojen transformasiya matrisləri ilə təmsil olunur. Homojen çevrilmə matrisi;

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & \alpha_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & \alpha_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

şəklində verilmişdir.



Şəkil 1. Beş sərbəstlik dərəcəsinə malik qolun müxtəlif dizaynları



Şəkil 2. Seçilmiş qol strukturu və istinad oxu dəsti

3. Robot qolunun dinamikası

Robot qolun dinamik modeli robot qolunun dinamik davranışını təyin edən hərəkət tənliklərindən ibarətdir. Bu tənliklərin kompüterlərin köməyi ilə robot idarəetmə dizaynı baxımından böyük rahatlıq təmin edir. Robot qolunun dinamik analizi, sürücü elementləri tərəfindən birləşmələrə tətbiq olunan moment və ya güc böyüklükləri ilə robot qolunun zamana nisbətə mövqeyi, sürəti və sürətlənməsi arasındakı əlaqəni araşdırmaq deməkdir. Belə bir analiz üçün robot qolunun dinamik davranışını təsvir edən qeyri-xətti diferensial tənliklər toplusu alınmalı və həll edilməlidir.

Robot qolunun dinamik tənliklərini əldə etmək üçün bir çox məlum üsullar mövcuddur. Bunlar Laqranj-Eyler (LE), Rekursiv Laqranj (R-L), Nyuton-Euler (N-E), Ümumiləşdirilmiş D'Alambert (G-D) prinsipi və s. yanaşmalardır. Bu üsullardan ən çox istifadə edilən LE və N-E yanaşmalarıdır [8]. Bu işdə yaxşı planlaşdırılmış struktura malik olan və N-E yanaşmasından daha sadə və sisteməlik olan L-E yanaşması ilə robot qolun dinamik modeli əldə edilmişdir və aşağıdakı tənliklərdən istifadə edilmişdir [9].

$$K_i = \frac{1}{2} (m_i v_{c_i}^T + \omega_i^T c_i I_i \omega_i) \quad (2)$$

$$K = \sum_i^n K_i \quad (3)$$

$$U_i = -m_i^0 g^T P_{c_i} + U_{ref} \quad (4)$$

$$U = \sum_i^n U_i \quad (5)$$

$$L = K - P \quad (6)$$

Burada, U =Robot qolunun ümumi potensial enerjisi K = Robot qolunun ümumi kinetik enerjisi L = Langrange funksiyasını təyin edir. Eyler-Laqranj tənlikləri ilə əldə edilən dinamik tənlikləri yoxlamaq üçün hər bir üzvə sərbəst düşmə hərəkəti verilir.

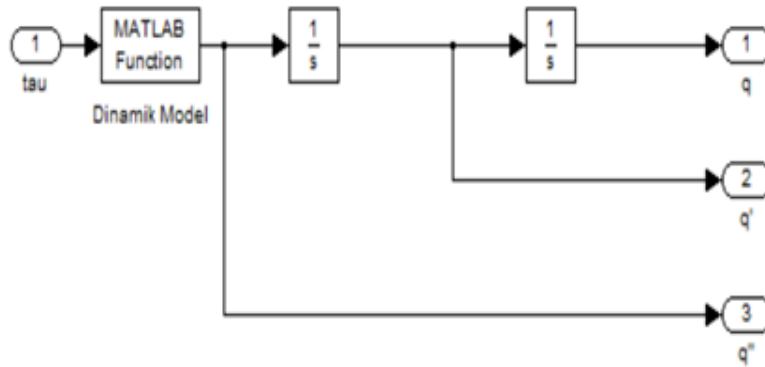
Modelləşdirilmiş robot qolunun texniki xüsusiyyətləri aşağıdakı cədvəldə verilmişdir.

Cədvəl

Ağırlıq (kq)	1.9625	6.86875	6.86875
Uzunluq (m)	0.1	0.35	0.35
Eni (m)	0.05	0.05	0.05
Hündürlük (m)	0.05	0.05	0.05

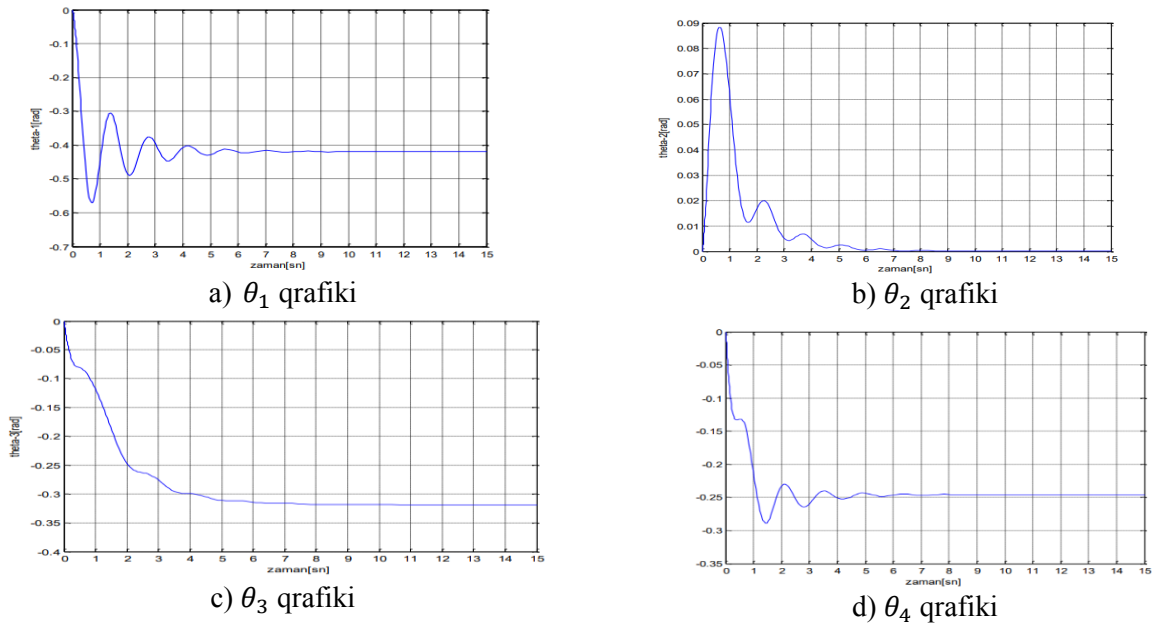
4. MATLAB-dan istifadə etməklə robot qolunun modelləşdirilməsi

Bu bölmədə məqsəd, MATLAB-ın qabaqcıl mühitinə əlavə modulları: SimMechanics və Qrafik İstifadəçi İnterfeysi (GUI) MATLAB-dan istifadə etməklə robot qolunun modelləşdirilməsinin və onun dinamik simulyasiyasının effektiv üsulunun tətbiqini təqdim etməkdir. Robot qolunun dinamik tənliklərini yazmaq və hər bir oynaqın dinamik davranışını müşahidə etmək üçün Matlab/Simulink proqramından istifadə edilmişdir. Robot qolunun Matlab/Simulink blok diaqramı şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 3. Matlab/Simulink blok diaqramı

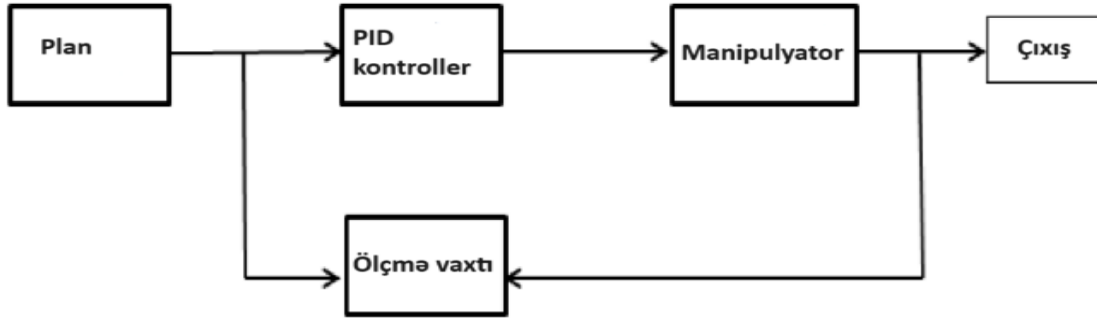
Hər bir oynaqın sərbəst düşmə hərəkəti nəticəsində əldə edilən birgə mövqe qrafikləri şəkil 4-də verilmişdir.



Şəkil 4. Trayektoriyanın planlaşdırılması blok diaqramı

4. Robot qolunun idarə edilməsi

Robot idarəetmə probleminin məqsədi robotun son nöqtəsinin verilmiş trayektoriyanı ən uyğun şəkildə izləməsini təmin etməkdir. Bunun üçün sistemin riyazi ifadəsi alınmalı və sistem üçün uyğun idarəedici layihələndirilməlidir. Müasir robot qolunun idarəetmə sistemlərində ümumi yanaşma hər bir qolu müstəqil servo mexanizmlər kimi nəzərdən keçirməkdir [10]. Robot qollarını idarə etmək üçün sürətə və fırlanma momentinə nəzarət kimi müxtəlif yanaşmalar üzərində araşdırmalar aparılır. Sənaye mühitlərində PID tənzimləyicisi hələ də ən çox istifadə edilən əks-əlaqə tənzimləyicisidir (şəkil 5).



Şəkil 5. PID tənzimləyicili idarəetmə sistemi

Praktiki təcrübə göstərir ki, bu tənzimləyici bir çox prosesə idarəetmə problemlərinin öhdəsindən çox yaxşı gəlir. PID metodunun digər üstünlükləri onun az sayda dizayn parametrlərinə malik olması və performans ölçüləri ilə asanlıqla əlaqələndirilə bilməsidir. Robot qolunu və hər bir birləşmə nöqtəsini idarə etmək üçün PID idarəetmə sistemindən istifadə edilmişdir. Alınmış riyazi tənliklər və PID idarəetmələri MatlabSimulink mühitinə köçürülmüşdür [6-8].

Burada sistemin çıxışları hər bir birləşmənin $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ bucaq yerdəyişməsidir və sistemin girişi bu birləşmələrə tətbiq edilməli olan moment dəyəridir. Robot qolunun hər birləşməsinin mövqeli yerdəyişməsi üçün üçüncü dərəcəli polinomlardan istifadə edilmişdir və hər birləşmənin trayektoriyası aşağıda verilmişdir.

$$\theta(t) = a + b t + c t^2 + d t^3$$

$$\theta_1 \quad 0 \text{--} \frac{\pi}{2};$$

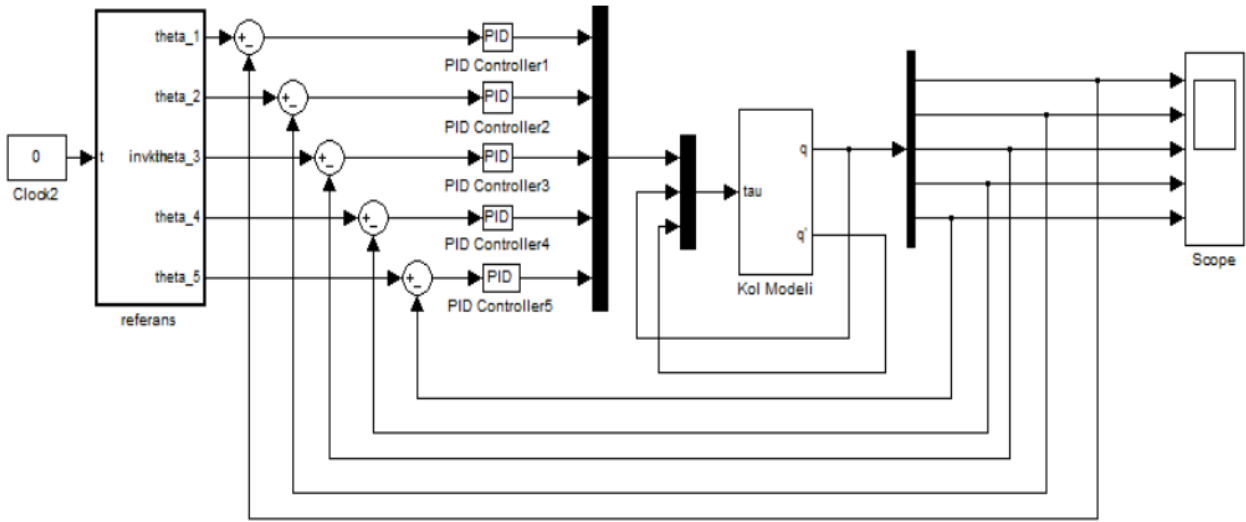
$$\theta_2 \quad 0 \text{--} \frac{\pi}{4};$$

$$\theta_3 \quad 0 \text{--} \frac{\pi}{3};$$

$$\theta_4 \quad 0 \text{--} \frac{\pi}{2};$$

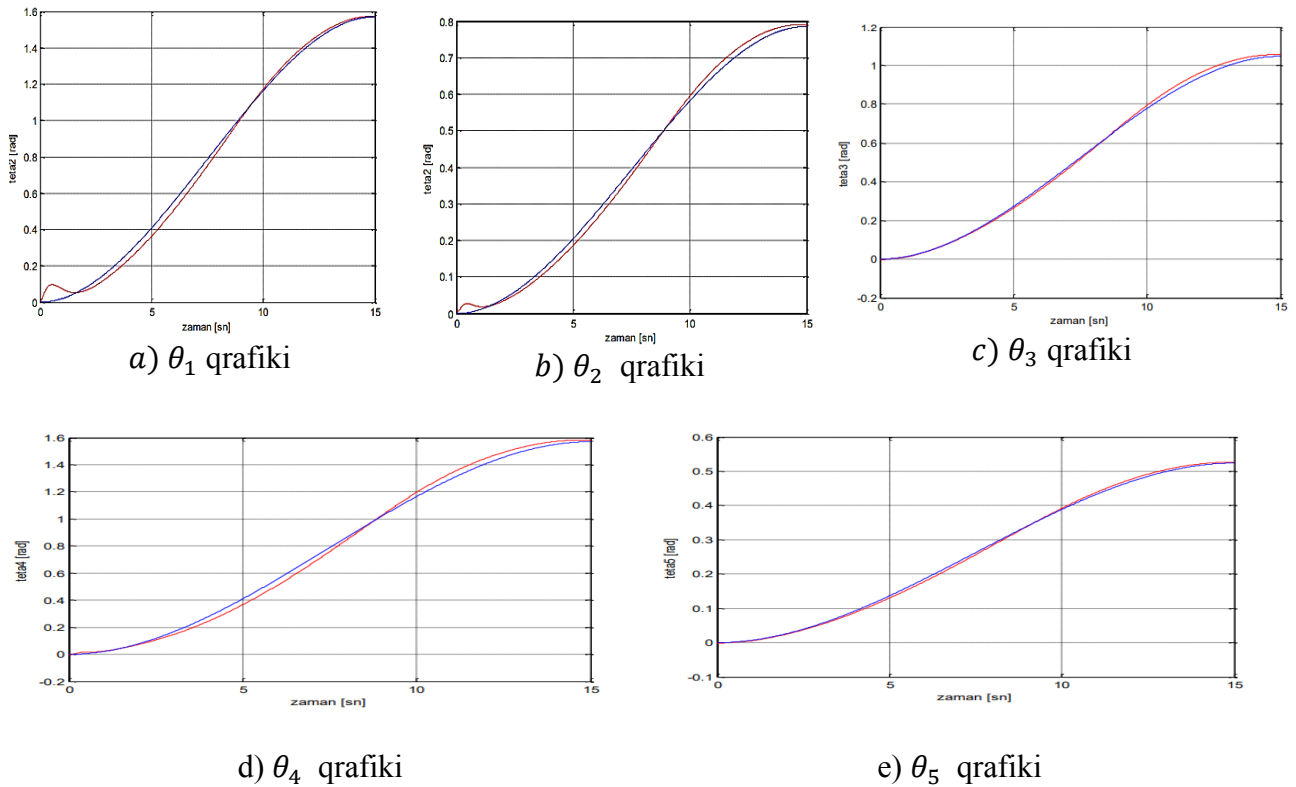
$$\theta_5 \quad 0 \text{--} \frac{\pi}{6}$$

İstifadə olunan hər birləşmənin orbital əmsalları aşağıdakı başlanğıc və bitmə şərtlərindən istifadə etməklə hesablanmışdır [5,9].



Şəkil 6. PID idarəetmə blok diaqramı [10]

Hər birləşmənin PID idarəetmə sistemləri nəticəsində əldə edilən birgə orbit arayışı və reallaşdırılmış dəyər qrafikləri (şəkil 7) verilmişdir.



Şəkil 7. PID idarəetmə sistemlərinin reallaşdırılmış qiymət qrafikləri

Nəticə. Simmechanics istifadə edərək, insanabənzər robot əlinin modeli uğurla işlənilib hazırlanmışdır. PID tənzimləyicinin tətbiqi ilə robot qolu modelləşdirilmiş və Matlab mühitində simulyasiya edilmişdir. Həyata keçirilən sınaqlar analiz edilmişdir. PID tənzimləyici insan qavrayışından 5%-dən az xəta ilə hərəkəti dəqiq yerinə yetirmiş, robot qolunun irəli kinematikasını təmin etmişdir.

Ədəbiyyat

1. Han J.D., Zeng S.Q., Tham K.Y., Badgero M., Weng J.Y., Dav: A Humanoid Robot Platform for Autonomous Mental Development, ICDL, 2012.
2. Kanda T., Ishiguro H., Ono T., Imai M., Nakatsu R., Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot “Robovie”, IEEE International Conference on Robotics Automation, 2002.
3. Tiejun Z., Dalong T., Mingyang Z., The Development of a Mobile Humanoid Robot with Varying Joint Stiffness Waist, IEEE International Conference on Robotics Automation, 2015.
4. Asfour T., Berns K., Dillmann R., The Humanoid Robot ARMAR Design and Control, IEEE, 2000. Ly D.N., Regenstein K., Asfour T., Dillmann R., A Modular and Distributed Embedded Control Architecture for Humanoid Robots, IEEE International Conference on Robotics Automation, 2014.
5. Albers A., Brudniok S., Ottnad J., Sauter C., Sedchaicharn K., Armar III – Design of the upper body.
6. Zhao T., Yuan J., Zhao M., Tan D., Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot, International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016.
7. Eğrisöğüt A., Kozan R., Scara Robot Dinamiğinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 46, Sayı 550.
8. John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2014
9. Choi, C., Shin, M., Kwon, S., Park, W., & Kim, J. (2008, December). Understanding of hands and task characteristics for development of biomimetic robot hands. In Humanoid Robots, 2018. Humanoids 2018. 8th IEEE-RAS International Conference on (pp. 413-417). IEEE. Cutkosky,
10. M. R., & Wright, P. K. Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands. In Robotics and Automation. Proceedings. IEEE International Conference on (Vol. 3, pp. 1533-1539). IEEE.

Məqalə qəbul olunub: 24.10.23
Təvsiyə edib: prof. Həsənov V.H.