

UDC 582.259.3

DOI 10.52171/2076-0515_2024_16_03_94_104

Modeling the THBIP-1 Humanoid Robot Control System

K.A. Mammadova, Z.S. Nasibzade

Azerbaijan State Oil and Industry University (Azadlıq ave. 20, Baku, AZ1010, Azerbaijan)

For correspondence: Mammadova Kifayat / e-mail: ka.mamedova@yandex.ru

Abstract

The paper presents a gait planning method and control strategy for THBIP-1 (Tsinghua Biped Humanoid Robot) to realize stable gait. Our research was carried out in three directions: the study of human walking properties by energy analysis, the development of an experimental humanoid robot apparatus, and the study of a natural dynamic gait and balance control scheme. The main goal of creating a humanoid robot is to replace humans in jobs that are dangerous or repetitive for humans. This robot includes a head, torso, two arms, two legs, totaling 32 DOFs (degrees of freedom). This project aims to realize stable walking in different environments for an autonomous humanoid robot. First, design issues including the robot's mechanical structure and control architecture are defined. Second, a gait generation method based on the optimization of the main support leg is presented, and a control strategy consisting of a local joint controller and a sensor feedback controller is also described. As a result of the analysis of the robot's walking experiments, it was determined that the robot has the ability to walk stably on the ground, rotate in any direction, and climb up/down the stairs.

Keywords: humanoid robot, control system, regulator, THBIP-1 robot, Humanoid Walker Training model.

Received 09.11.2023

Revised 19.09.2024

Accepted 23.09.2024

For citation:

K.A. Mammadova, Z.S. Nasibzade

[Modeling the THBIP -1 Humanoid Robot Control System]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2024, vol. 16, № 3, pp. 94-104 (in Azerbaijani)

THBIP-1 insanabənzər robotunun idarəetmə sisteminin modelləşdirilməsi

K.A. Məmmədova, Z.S. Nəсібzadə

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 20, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə sabit yürüşün həyata keçirilməsi üçün THBIP-1 (Tsinghua Biped Humanoid Robot) üçün yerləş planlaşdırma metodu və nəzarət strategiyası təqdim edilir. Tədqiqatımız üç istiqamətdə həyata keçirilmişdir: enerji analizi ilə insanın yerimə xassələrinin tədqiqi, eksperimental humanoid robot aparatının hazırlanması və təbii dinamik yerləş və tarazlığa nəzarət sxeminin öyrənilməsi. İnsanabənzər robotun yaradılmasında əsas məqsəd, insan üçün təhlükəli olan, çətin və ya təkrarlanan işlərdə insanları əvəz etmək, işin keyfiyyətini və məhsuldarlığını artırmaq, vaxt itkisini azaltmaqdan ibarətdir. Bu robota baş, gövdə, iki qol, iki ayaq daxildir, ümumilikdə 32 DOF (azadlıq dərəcəsi). Bu layihə müstəqil insanabənzər robot üçün müxtəlif mühitlərdə sabit gəzinti həyata keçirmək məqsədini daşıyır. Əvvəlcə robotun mexaniki quruluşu və idarəetmə arxitekturası da daxil olmaqla layihələndirmə məsələləri təyin edilir. İkincisi, əsas dayaq ayağının optimallaşdırılmasına əsaslanan yerləş yaratmaq metodu təqdim olunur və yerli birgə idarəedicisi və sensor əks-əlaqə tənzimləyicisindən ibarət idarəetmə strategiyası da təsvir edilmişdir. Robotun gəzinti təcrübələrinin analizi nəticəsində robotun torpaq yerdə sabit yerimə, istənilən istiqamətə fırlanma, pilləkənlərlə yuxarı/aşağı qalxma qabiliyyətinə malik olduğu müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: insanabənzər robot, idarəetmə sistemi, tənzimləyici, THBIP-1 robotu, Humanoid Walker Training modeli.

Моделирование системы управления роботом-гуманоидом THBIP-1

К.А. Мамедова, З.С. Насибзаде

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азатлыг, 20, Баку, AZ1010, Азербайджан)

Аннотация

В статье представлены метод планирования походки и стратегия управления THBIP-1 (двуногим роботом-гуманоидом Цинхуа) для реализации стабильной походки. Исследования проводились по трем направлениям: изучение свойств ходьбы человека методом энергетического анализа, разработка экспериментального аппарата-гуманоидного робота и исследование естественной динамической схемы управления походкой и равновесием. Основная цель создания человекоподобного робота – заменить людей в опасных для человека задачах, сложных или повторяющихся, повысить качество и производительность труда, сократить потери времени. Робот включает в себя голову, туловище, две руки и две ноги, всего 32 степени свободы. Этот проект направлен на обеспечение стабильной ходьбы в различных средах для автономного робота-гуманоида. Сначала определяются вопросы проектирования, включая механическую структуру робота и архитектуру управления. Представлен метод генерации походки, основанный на оптимизации основной опорной ноги, а также описана стратегия управления, состоящая из локального суставного контроллера и контроллера обратной связи датчика. В результате анализа экспериментов по ходьбе робота было установлено, что робот обладает способностью устойчиво ходить по земле, вращаться в любом направлении, подниматься/спускаться по лестнице.

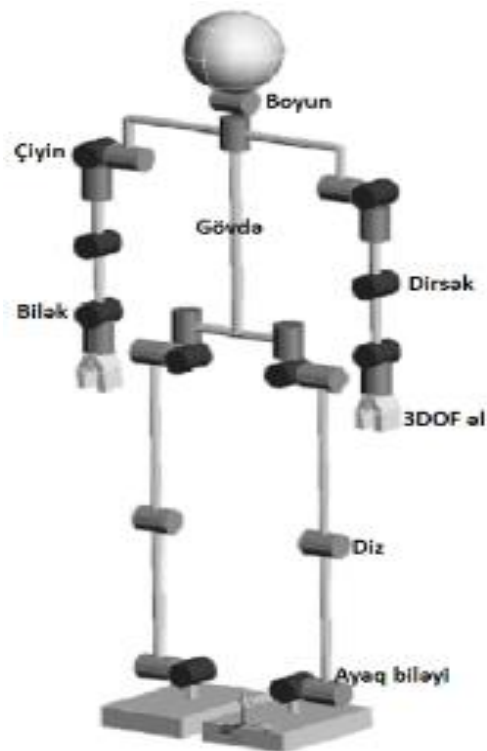
Ключевые слова: робот-гуманоид, система управления, контроллер, робот THBIP-1, модель Humanoid Walker Training.

Giriş

İnsanabənzər robotun yaradılmasında əsas məqsəd, insan üçün təhlükəli olan və ya təkrarlanan işlərdə insanları əvəz etməkdir. Dünyada müxtəlif qurumlar tərəfindən qurulmuş bir sıra güclü ikiayaqlı yeriyən robotlar var [1, 2]. Waseda Universitetinin tədqiqatçıları 1969-cu ildən bəri ikiayaqlı yeriyən robotlar üzərində işləməkdə uzun tarixə malikdirlər və onlar antropomorfik robot-Wabian yaratdılar. Bu robot 35 sərbəstlik dərəcəsinə və əvvəlcədən qeydə alınmış trayektoriyaların təkrar istifadə edə bilmək özəlliyinə malikdir [3, 4]. Honda Corporation şirkətinin 10 illik tədqiqatlarından sonra, insanabənzər P2, P3 və Asimo robotlarını yaratdılar. Bu robotlar üç ölçülü məkanda düz bir yerdə gəzmək, dönmə, pilləkənlərlə yuxarı/aşağı, balans və obyektləri itələmək kimi bir neçə mürəkkəb işi yerinə yetirə bilər. Honda robotunun idarəetmə metodu ZMP-dən istifadə edərək əvvəlcədən qeydə alınmış birgə trayektoriyaları planlaşdırmaq və onları sensor əsaslı uyğun idarəetmə ilə hərəkət etdirməkdir [1, 2]. 2000-ci ildə French qrupu 15 sərbəstlik dərəcəsinə malik olan BIP-2000 robotunu yaratdılar.

Mühəndislik baxımından, kompüter sisteminin integrasiyası, sensor sistemlərin dizaynı və süni intellekt öyrənmə insanabənzər robotun mexaniki dizaynını əhatə edir. Yuxarıdakı robotlardan irəli gələrək, biz tədqiqatımızı aşağıdakı üç hissədə cəmləşdiririk [5, 6]: enerji analizi ilə insanın yerimə xassələrinin tədqiqi, eksperimental humanoid robot aparatının hazırlanması və təbii dinamik yerləş və tarazlığa nəzarət sxeminin öyrənilməsi. 32 sərbəstlik dərəcəsinə malik robotun prototipləri olan THBIP-I insanabənzər robotun [1, 7, 8] 170m hündürlüyü, 140 kq çəkisi, ayaqlarında 6, qollarında 7, əllərində və boynunda 2 sərbəstlik dərəcəsi var. Bu konfigurasiyalar ilə tə-

min olunan robot, düz səthdə yerimə, pilləkənləri düşüb/qalxma və kiçik obyektləri tutmaq qabiliyyətinə malikdir. Belə konfigurasiyalı robot şəkl. 1-də göstərilmişdir [1, 8].



Şəkil 1 – DOF konfigurasiyalı THBIP-I robotu
Figure 1 – THBIP-I robot with DOF configuration

Robotun hər bir oynaqı Maxon Elektron firmasının DC motoru ilə hərəkət edir. Ətraf mühiti proqnozlaşdırmaq üçün robotun başında iki CCD [7, 8] kamera yerləşdirilmişdir. Yerin reaksiya qüvvəsini ölçmək və ZMP mövqeyini hesablamaq üçün ayaqda iki 6 oxlu qüvvə və fırlanma momenti sensoru yerləşdirilib.

Əks-əlaqəli idarəetməni həyata keçirmək məqsədilə robotun duruşunu və bədən mövqeyini ölçmək üçün robotun gövdəsinə bir giro metr və akselerometr quraşdırılmışdır. Robotun qeyri-bərabər torpaq mühitində tənzimlənməsi lazımdır [9, 10].

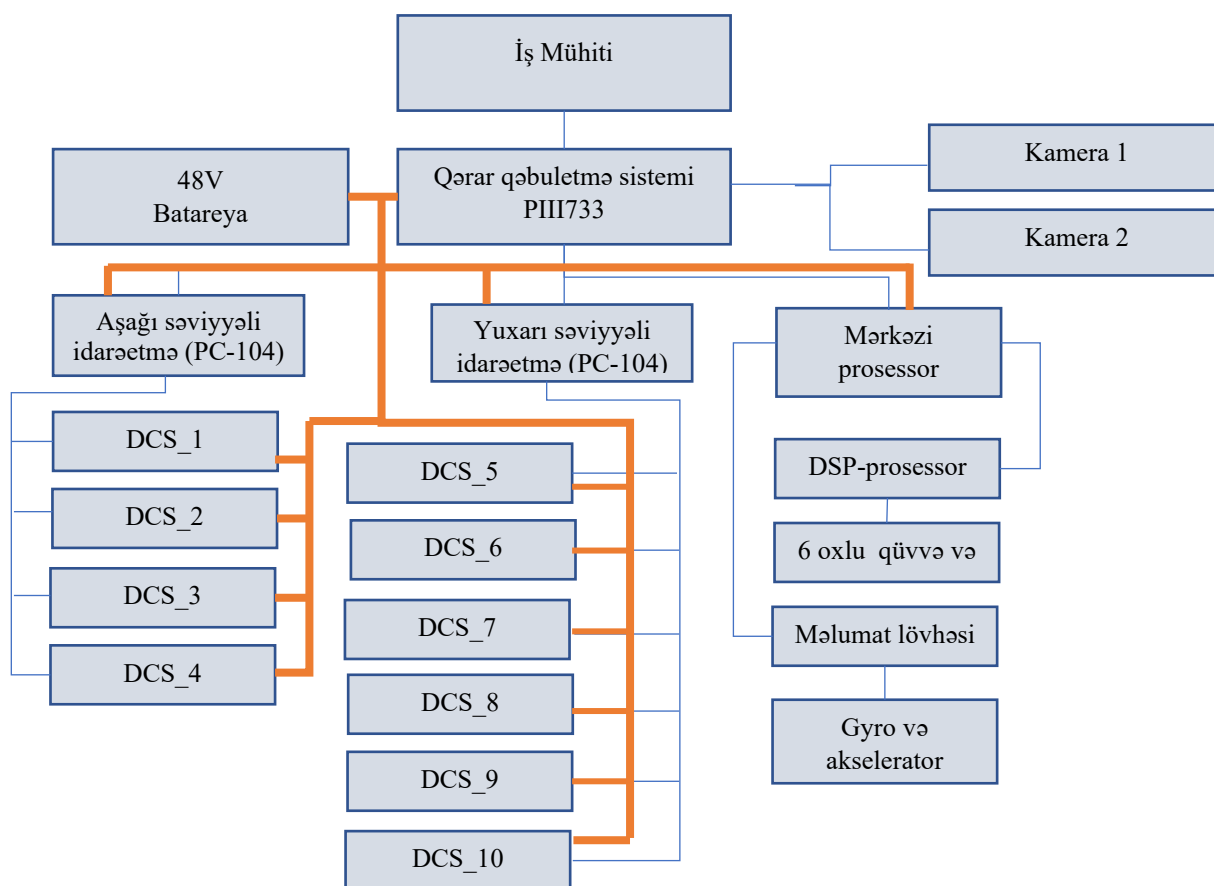
1. İdarəetmə sisteminin texniki arxitekturası

THBIP-I Humanoid robotunun idarəetmə sistemi paralel çoxkompüterli arxitektura-dır və dörd hissəyə bölünür: Remote Brain Work Station (RBW), Mobile Controller (MC), Distributed Control Units (DCU) and Sensor Processing Unit (SPU).

RBW alt sistemi yolun planlaşdırılmasına və bəzi hərəkətlərin teleoperasiyasına cavabdehdir, çünki bəzi tapşırıqlar o qədər mürəkkəbdir ki, onları robot gövdəsində avtonom idarəetmə sxemləri ilə idarə etmək mümkün deyil. Mobil İdarəetmə (MI) robotun qərar qəbuletmə vahidi olan robot üzərindəki noutbuk kompüteridir.

Mİ ətraf mühit haqqında məlumatı sensorlar vasitəsilə toplayır və əvvəlcədən qeydə alınmış birgə trayektoriyalardan kompensasiya trayektoriyalarını yaradır. Şək. 2-də göstərildiyi kimi, RBW və Mİ simsiz Ethernet vasitəsilə, CCD (charged-coupled device) kameraları isə USB kabeli ilə Mİ-yə qoşulur.

Paylanmış İdarəetmə sistemi iki hissəyə bölünür: Yuxarı səviyyəli idarəetmə və aşağı səviyyəli idarəetmə. Yuxarı Səviyyəli İdarəetmə müvafiq olaraq yuxarı və aşağı ətraflara cavabdeh olan iki PC104 quraşdırılmış kompüterdən ibarətdir. Aşağı səviyyəli idarəetmə 11 PID servo idarəetmə sistemindən ibarətdir.



Şəkil 2 – İdarəetmə sisteminin diaqramı
Figure 2 – Control system diagram

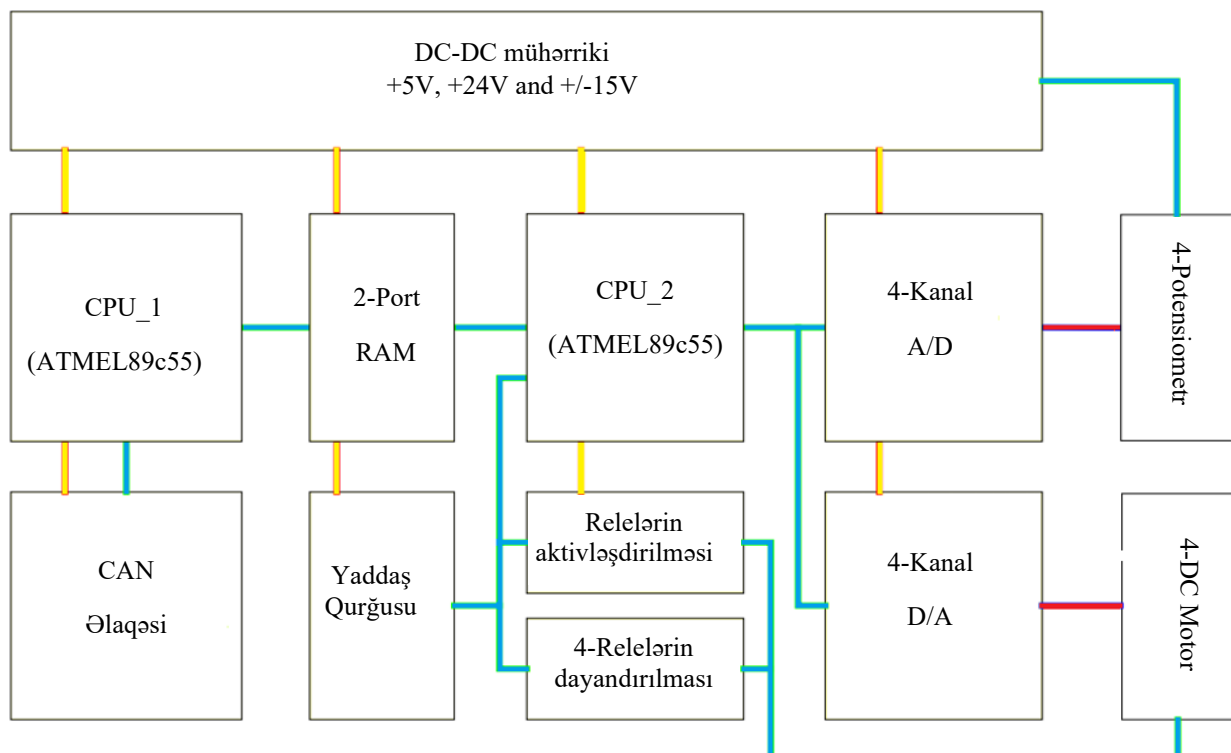
Hər bir servo idarəetmə sistemi iki CPU əsaslı kompüter sistemidir və təxminən üç və ya dörd oynaqı idarə etmək üçün oynaqlara quraşdırılmışdır. PC104 və servo idarəetmə sistemi CAN (Controller area network) kabeli ilə birləşdirilir və iki PC104 isə 10M Ethernet kabeli ilə Mİ-yə qoşulur. Bu dörd alt sistemdən başqa, enerji idarəetməsi batareyadan idarəetmə sisteminə və elektron mühərriklərə qədər enerji təchizatını tənzimləyir.

Fləş yaddaş PID sxemlərini saxlamaq üçün istifadə olunur, CPU1 və CPU2-də işləyən rezident proqramlar RBW-də idarəetmə parametrlərini dəyişdirməyə və heç bir aparatı hərəkət etdirmədən servo idarəetmə sistemini yüklənməyə məcbur edə bilər. Hazırda Servo İdarəetmə Bölməsindəki CPU-lar ATMEL 89c55-dir və digər DSP (Digital signal proces-

sor) əsaslı servo idarəetmə sistemi və mürəkkəb idarəetmə sxemləri üçün BIOS Proqramı hazırlanır.

Şək. 2-də gücü təmsil etmək üçün qırmızı xəttədən və siqnalları təmsil etmək üçün göy xəttədən istifadə edilir. Rabitə zolağı geniş olduğundan, yüksək səviyyəli idarəetmə 50 Hs-də bir qrup trayektoriya məlumatı yaradır, aşağı səviyyəli PID idarəetmə tezliyi CPU2 tərəfindən 500 Hs-dir, buna görə də interpolasiya edilmiş məlumatları saxlamaq üçün CPU1 və CPU2 arasında 2 portlu RAM istifadə olunur.

Servo idarəetmə sisteminin quruluşu şək. 3-də göstərilmişdir. CPU1 PC104 ilə əlaqələndirilib və 4 birgə PID idarəetməsi üçün məlumat siqnalları yaradır.



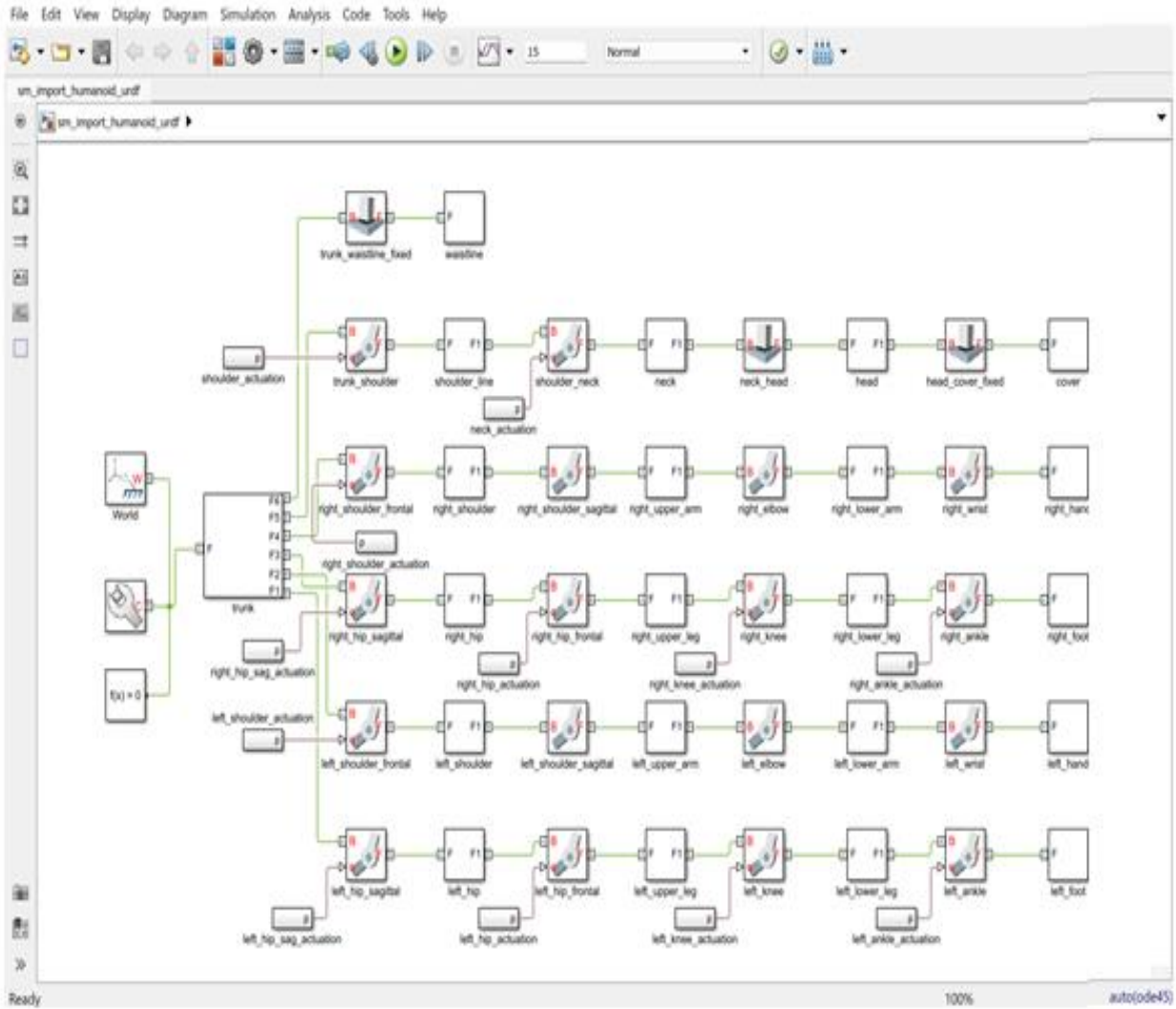
Şəkil 3 – Servo idarəetmə sistemi
Figure 3 – Servo control system

2. Robotun aşağı hissələrinin planlaşdırılması

Yürüşə və tarazlığa nəzarət insanabənzər robotun ən vacib işidir. Bizim məlumatımız daxilində onlar iki kateqoriyaya bölünür.

Bir çoxları onlayn idarəetmə yanaşmaları üçün əvvəlcədən qeydə alınmış birgə trayektoriyalardan və sensor məlumatlarından istifadə

də edirlər. Digərləri evristik idarəetmə sxeminə istifadə edirlər. Başlanğıcda, biz robotumuzda birinci üsulla eyni şeyi edirik və gələcəkdə təbiətdə dinamik gəzinti üçün idarəetmə sxemi hazırlayacağıq. Şək. 4-də yuxarı hissələrin hərəkətini nəzərə almadan robotumuzun yanal və sagittal müstəvisində modeli göstərilir.



Şəkil 4 – Statik yerləş modelinin Simulinkdə realizasiyası
Figure 4 – Realization of the static walking model in Simulink

Fərz etsək ki, addım üçün zaman dövrü T_c , k -cı addımının vaxtı kT_c -dən $(k+1)T_c$, $k=1,2,\dots$ -ə qədərdir. Təhlili sadələşdirmək üçün müəyyən edirik ki, k -cı yerimə addımı $t=kT_c$ -də sol ayağın dabanının

yerdən qalxması ilə başlayır və $t = (k+1)T_c$ -də sol ayağın dabanının yerə toxunması ilə başa çatır. D_{step} bir addımın uzunluğunu bildirir.

H_a , T_a -da yelləncək ayağının ən yüksək nöqtəsinin Z koordinatını göstərir. X_{hd} ikiqat dəstək dövrünün sonunda bədən mövqeyini bildirir. X_{hs} periodu, θ_{al} ayaq biləyinin bucağını göstərir.

Tarazlığa nəzarət etmək üçün Vukobratovic-in ZMP Critic üsulundan istifadə edirik.

Birincisi, ayağın trayektoriyaları insan yeriyşinin tədqiqi əsasında tərtib edilir. Sonra

ZMP-ni sabit bölgənin mərkəzinə yaxın etmək üçün ayağın parametrlərini tənzimləyin. Nəhayət, birləşmənin sürətlərini kiçik etmək üçün altlıq və yer arasındakı bucaq dəyişdirilə bilər.

Buna görə də fırlanma momenti əhəmiyyətli dərəcədə azalır. Biz sagittal müstəvidə və yanal müstəvidə 3D hamar trayektoriyaları ayrıca planlaşdırırıq.

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=0}^n m_i(\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_{i=0}^n \dot{l}_{iy} \dot{\omega}_{iy}}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g_z)}$$

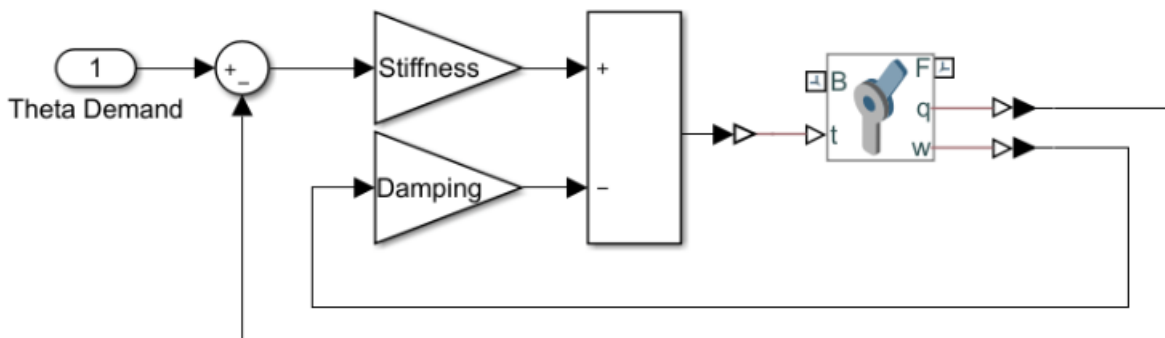
$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=0}^n m_i(\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_{i=0}^n \dot{l}_{iy} \dot{\omega}_{ix}}{\sum_{i=0}^n m_i(\ddot{z}_i + g_z)}$$

Birgə idarəetmə-Modelin hər bir birləşməsini idarə etmək üçün sərtliyə əsaslanan əks-əlaqəli idarəetmə sistemindən istifadə edilir. Burada sərtliyi (K) və amortizasiyanı (B) ilə işarə edirik. Fırlanma momentinin təyinat nöqtəsi θ_0 cari birləşmə mövqeyindən θ fərqli olduqda tətbiq edilir:

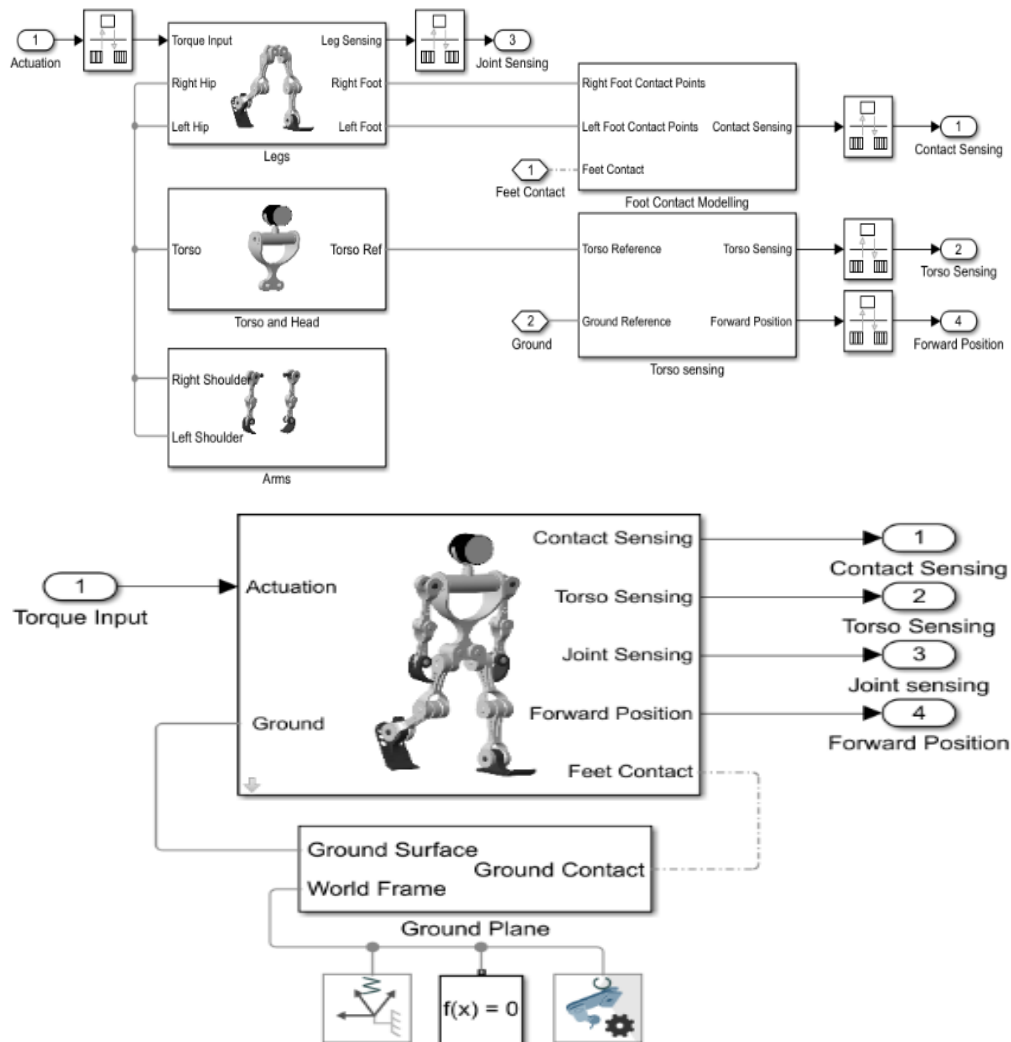
$$T = B\dot{\theta} + K(\theta_0 - \theta).$$

Ayaqların hərəkət etməsi üçün və bir əks-əlaqə cavabı yaratmaq üçün yayın tənzimləmə nöqtəsi θ_0 dəyişdirilə bilər. Şək. 5-də idarəetmənin Simulink modeli göstərilmişdir.

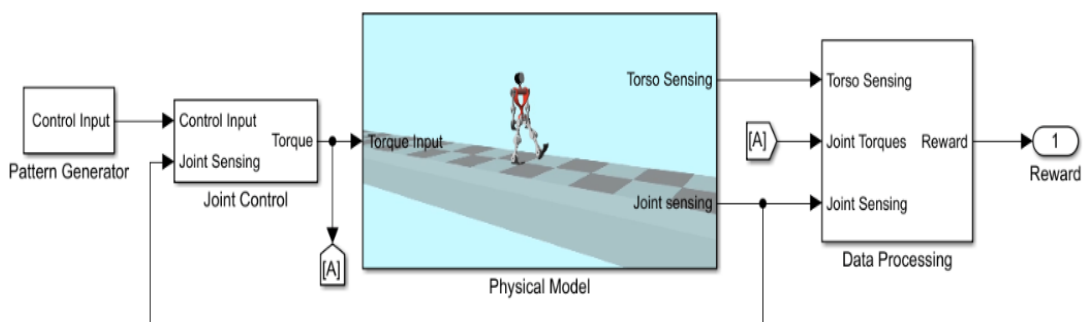
Şəkil 6-da İnsanabənzər robotun Matlab mühitində kompüter modeli təsvir olunur.



Şəkil 5 – Əks-əlaqəli idarəetmə dövrəsi
Figure 5 – Feedback control circuit



Şəkil 6 – İnsanabənzər robotun kompüter modeli [6]
Figure 6 – Computer model of a humanoid robot



Şəkil 7 – Humanoid Walker Training modeli
Figure 7 – Humanoid Walker Training model

Humanoid Walker Training – bu nümunənin məqsədi insanabənzər bir robotu yeriməyə öyrətməkdir və robotu öyrətmək üçün müxtəlif üsullardan istifadə oluna bilər. Nümunədə genetik alqoritm və öyrətmə üsulları göstərilir (şək. 7).

Hərəkətmənin obyektiv funksiyası – bu nümunədə müxtəlif hərəkətmə üslublarını qiymətləndirmək üçün obyektiv funksiyadan istifadə edilir.

$r_t = w_1 v_y + w_2 t_s - w_3 p - w_4 \Delta z - w_5 \Delta x$
 burada, v_y – irəli sürət; p – enerji istehlakı; Δz – şaquli yerdəyişmə; Δx – üfüqi yerdəyişmə; $w_{1,...,5}$ – r_t funksiyasında iştirak edən hər bir terminin nisbi əhəmiyyətini təmsil edən çəkilər.

Beləliklə, hərəkətmənin ümumi nəticəsi (R) belədir:

$$R = \sum_{t=0}^T r_t$$

Burada, T – simulyasiyanın başa çatdığı vaxtdır.

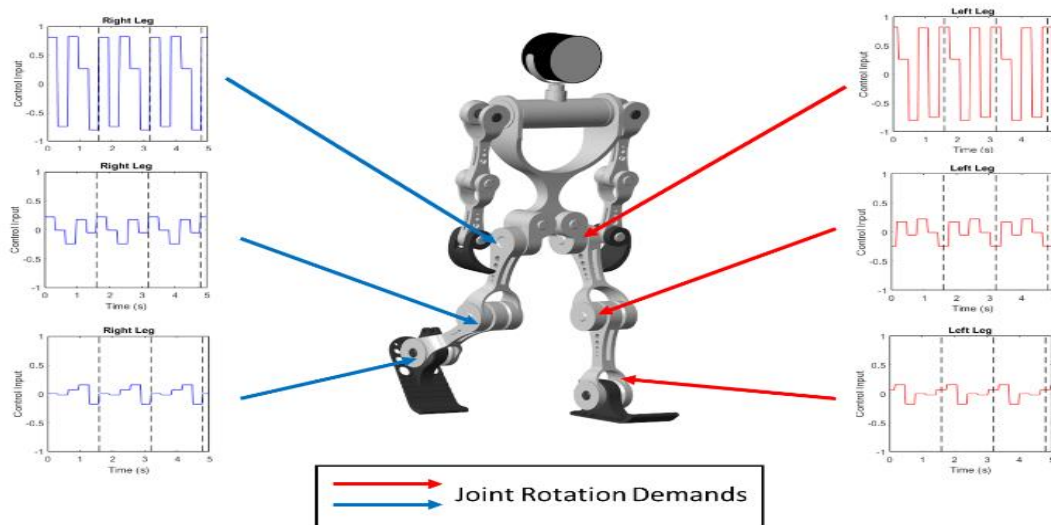
Biz `m_humanoid_walker_rl_parameters` skriptində nəticənin çəkirlərini dəyişə bilərik.

Simulyasiya vaxtı başa çatdıqda və ya robot düşdükdə simulyasiya dayandırılır. Düşmə aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

- Robot 0,5 m-dən aşağı düşür.
- Robot yana doğru 1 m-dən çox hərəkət edir.
- Robot gövdəsi 30 dərəcədən çox fırlanır.

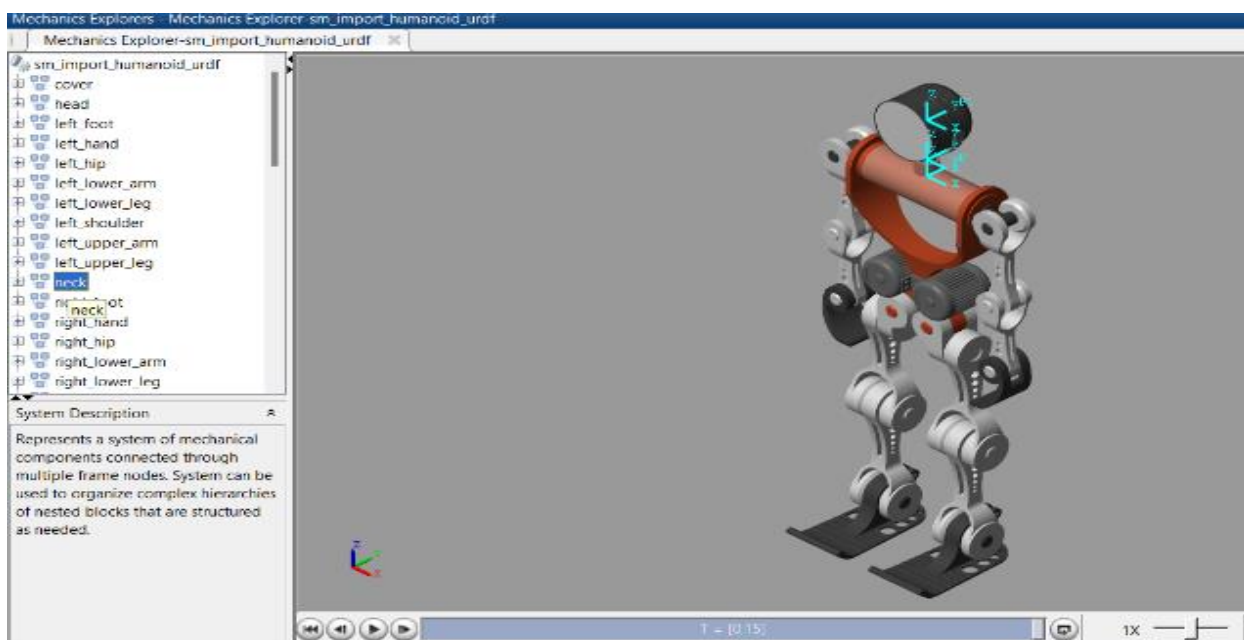
Genetik alqoritmə təlim – robotun gedişini optimallaşdırmaq üçün genetik alqoritm-dən istifadə edilə bilər. Genetik alqoritm bioloji təkamülə təqlid edən təbii seçim prosesinə əsaslanaraq optimallaşdırma problemlərini həll edir. Model, hər hissənin dairəvi tələbatını dövrü olaraq təyin edir [2]. Bu cür təyinat açıq dövrəli idarəetməni ifadə edir. Siqnalların periodluğu addım periodudur və bir tam addımı tamamlamaq üçün lazım olan vaxtı göstərir. Ən yaxşı halda, humanoid robot simmetrik olaraq yeriyir (şək. 8). Sağ ayağın hər bir hissəsinin idarəetmə forması, bir addım periodunun yarısının gecikməsi ilə sol ayağın müvafiq hissəsinə ötürülür.

Robotu genetik alqoritmə təlim etmək üçün, `sm_humanoid_walker_ga_train` skriptini açırıq (şək. 9).



Şəkil 8 – Humanoid robot modeli [11-13]

Figure 8 – Humanoid robot model



Şəkil 9 – sm_humanoid_walker_ga_train skripti [12, 14]

Figure 9 – sm_humanoid_walker_ga_train script

Bu nümunədə, əvvəlcədən təlim edilmiş humanoid walker istifadə olunub. Humanoid walker-i təlim etmək üçün, train_Walker dəyişəninin dəyərini true olaraq təyin edirik.

Nəticə

Məqalədə robotun mexaniki quruluşu və idarəetmə arxitekturası da daxil olmaqla layihələndirmə məsələləri təyin edilir. İkincisi, əsas dayaq ayağının optimallaşdırılmasına əsaslanan yerləşərkə yaratmaq metodu təqdim olunur və yerli birgə idarəedicilərkə sensor əks-əlaqə tənzimləyicisindən ibarət idarəetmə strategiyası təsvir edilmişdir.

Robotun gəzinti təcrübələrinin analizi nəticəsində robotun torpaq yerdə sabit yerimə, istənilən istiqamətə fırlanma, pilləkənlərlə yuxarı/aşağı qalxma qabiliyyətinə malik olduğu müəyyən edilmişdir.

Bu layihə müstəqil insanabənzər robot üçün müxtəlif mühitlərdə sabit gəzinti həyata keçirmək məqsədini daşıyır.

Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

REFERENCES

1. Hirai K., Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2017, pp.500-508 (in English)
2. Hirai K., Hirose HaiKawa M.Y., Takenaka T., The Development of Honda Humanoid Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1998 (in English)
3. Espian B., Sardain P. The Anthropomorphic Biped Robot BIP2000, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3997-4002, 2001 (in English)

4. **Mammadova K.A., Melikova X.Y.** Design of an industrial robot using production technology and 3d modeling software. *Scientific collection «interconf»*: with the proceedings of the 11th international scientific and practical conference «scientific horizon in the context of social crises». Tokyo, Japan: Otsuki Press, № 103, 2022. pp. 250-257. ISBN 978-4-272-00922-0. <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/18919> (in English)
5. **Gardashova L.A., Mammadova K.A.** Optimal Implication Based Fuzzy Control System for a Steam Generator. 15th International conference on applications of fuzzy systems, Soft computing and artificial intelligence tools. ICAFS 2022. August 26 - 27 2022, Budva – Montenegro. (in English)
6. **Mammadova K.A., Hajiyeva L.R.** Control system of two-wheeled robot. Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference «Science and Practice: Implementation to Modern Society» Manchester, United Kingdom. (April 26-28, 2023). pp. 35-41. <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/26-28.04.2023/162> (in Azerbaijani)
7. **Cynthia L. Breazeal.** Sociable Machines: Expressive Social Exchange Between Humans and Robots. <https://groups.csail.mit.edu/lbr/hrg/2000/phd> (in English)
8. **Sardain P., Bessonnet G.** Gait Analysis of a Human Walker wearing Robot Feet as Shoes, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2285-2292, 2001 (in English)
9. **Məmmədova K.A.** Robotik dinamik sistemlərin riyazi modelləşdirilməsi və simulyasiyası/ *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*. Cild 14, № 4. səh. 98-111 (in Azerbaijani)
10. **Yamaguch J., Kinoshita N., Takanishi A., Kato I.** Development of a Dynamic Biped Walking System for Humanoi, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.232-239, 1996
Konno, N. Kato, S. Shirata, T. Furuta, Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1565-1570, 2000 (in English)