

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

YERÜSTÜ MONİTORİNQİ İCRA EDƏN KVADROKOPTERLƏRİN HİBRİD İDARƏETMƏ SİSTEMLƏRİNİN LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİ ÜSULLARININ İŞLƏNMƏSİ

İxtisas: 3338.01 – Sistemli analiz, idarəetmə və
informasiyanın işlənməsi (informasiya
texnologiyaları)

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Tuncay Həbib oğlu Həbibbəyli**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

Bakı – 2024

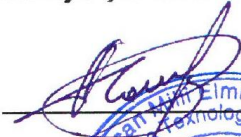
Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin
İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: texnika elmləri doktoru, professor
Ramin Rza oğlu Rzayev

Rəsmi opponetlər: texnika elmləri doktoru, dosent
Yadigar Nəsim oğlu İmamverdiyev
texnika elmləri doktoru, dosent
Lalə Mehdi qızı Zeynalova
texnika üzrə fəlsəfə doktoru
Xanmurad Xanbala oğlu Abdullayev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya
Komissiyasının Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin
İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən
ED 1.35 Dissertasiya Şurası


Dissertasiya Şurasının sədri:


AMEA-nın həqiqi üzvü,
texnika elmləri doktoru, professor
Rasim Məhəmməd oğlu Əliquliyev

Dissertasiya Şurasının elmi katibi:


texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Fərqanə Cabbar qızı Abdullayeva

Elmi seminarın sədri:


texnika elmləri doktoru
Mütəllim Mirzəəhməd oğlu Mütəllimov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Kvadrokopter təkan yaradan pərli dörd mühərrikə malik pilotsuz uçuş aparatıdır (PUA). Hal-hazırda, bu cür aparatlar olduqca geniş və müxtəlif şəkildə istifadə olunur, lakin bu istifadə əsasən operatorun pultundan əl ilə uzaqdan idarəetmə rejimləri və sadə bir marşrut üzrə uçuşla məhdudlaşır. Məhdudiyyətlərin səbəbi mürəkkəb mühitdə müxtəlif maneələr arasında avtomatik uçuşun çətinliyi və peyk naviqasiya sisteminin (PNS) siqnalı olmadıqda avtonom naviqasiyanın çətinliyi səbəbindən kvadrokopterin zəif sərbəstliyidir. Kvadrokopterə maneələrin ətrafında uçmaq və avtonom naviqasiya ilə planlaşdırılmış marşrut üzrə uçuşa imkan verən avtonom uçuş idarəetmə sisteminin yaradılması aktual məsələlərdəndir.

Bu uçuş aparatlarının tətbiqləri genişləndikcə kvadrokopterlərin də işləmə mühiti getdikcə mürəkkəbləşir. O, müxtəlif maneələrlə (hərəkətli və stasionar) zəngin ola bilər. Burada PNS-nin siqnalı mövcud olmaya da bilər. Elmi-tədqiqat işlərində təsvir edilən əksər marşrut planlaşdırma alqoritmləri və idarəetmə sistemləri deterministik statik məlum mühitdə istifadə üçün geniş tədqiq edilmişdir, lakin bu alqoritmlər müxtəlif maneələr və atmosfer təsirləri ilə mürəkkəb naməlum mühitdə kifayət qədər idarəetmə qabiliyyətini təmin etmir.

Kvadrokopterlər üçün mövcud olan inteqrasiya olunmuş naviqasiya sistemləri (İNS) PNS siqnalı olmadığı hallarda naviqasiya məlumatının etibarlılığını təmin edə bilməz. Bütün dünyada eyni zamanda lokalizasiya və xəritəçəkmə (SLAM Simultaneous Localization and Mapping) əsasında vizual naviqasiya sistemindən (VNS), kompüter görmə, oriyentirlər, relyef xəritələri və s., istifadə etməklə kvadrokopter naviqasiya texnologiyaları üzərində intensiv tədqiqatlar aparılır. Naməlum dinamik mühitdə VNS-dən istifadə yüksək nəticələrə nail olmağa imkan verir və kvadrokopter üçün naviqasiya dəqiqliyini təmin edir, lakin təsvirin işlənməsi və SLAM alqoritmlərinin aşağı hesablama sürətinə görə bu istifadə kvadrokopter üçün məhduddur.

Müxtəlif ölkələrdən çoxlu sayda alimlər bu bilik sahəsinin inkişafına töhfə vermiş, onların nəticələrindən bu dissertasiya işinin həyata keçirilməsində istifadə edilmişdir: D.P. Inozemtsev, D.S. Michael, A. Sharma və A. Barve, A. Rodic və G. Mester, H. Khebbache və M. Tadjine, V. Lopez və F. Morata, S.A. Raza və W. Gueaieb, B. Kadmiry, F. Jurado və B. Castillo-Toledo, C. Nicoli, C.J.B. Macnab və A. Ramirez-Serrano, A. Burka və S. Foster, J.F. Shepherd və K. Tumer, S. Suresha və N. Sundararajan, C.T. Lee və C.C. Tsai, M. Mohammadi və A.M. Shahri, P. Nirut, R. Masuda və H. Hirata, A. Kırılı, V.E. Ömürlü, U. Büyükşahin və R. Artar, A.E. Kulchenko, A.V. Bozhenyuk və E.M. Gerasimenko, V.H. Pshihopov və V.A. Kruhmalev, M. Fatan, B.L. Sefidgari, A.V. Barenji, E. Ortak və s.

Beləliklə, bu problemlərin həlli və tədqiqi çox aktualdır və kvadrokopterlərin avtomatik uçuş idarəetmə sisteminin inkişafı kontekstində mühüm praktiki əhəmiyyətə malikdir. Bu cür həllər mürəkkəb mühitdə və avtonom naviqasiyada maneələrin ətrafında uçmaq imkanı ilə yer səthinin monitorinqi şəraitində planlaşdırılmış marşrut üzrə avtonom uçuşu təmin etməyə imkan verir.

Tədqiqatın əsas məqsədi və vəzifələri. Dissertasiyanın tədqiqatının məqsədi kvadrokopterlərlə yer səthinin monitorinqi üçün hibrid idarəetmə sistemlərinin layihələndirilməsi üsullarının işlənilib hazırlanmasıdır.

Qarşıya qoyulmuş məqsədə nail olmaq üçün dissertasiya işi çərçivəsində aşağıdakı məsələlər müəyyən edilmişdir:

- kvadrokopterlərin avtomatik idarəetmə sistemlərinin requlyatorlarından (tənzimləyicilərindən) praktiki istifadə xüsusiyyətlərinin təhlili;
- propellerlərin və mühərriklərin girokopik təsirlərini, küləyin təsirini və yerin qravitasiya effektini nəzərə alaraq kvadrokopterin dinamik üçölçülü modelinin tədqiqi;
- MATLAB proqram paketi əsasında sistem modelləşdirməsindən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin yaradılmasının mərhələli prosedurunun işlənilib hazırlanması;

- hərəkətsiz maneələrin olduğu məlum mühitdə Yer səthinin monitorinqi şəraitində kvadrokopterin 3D uçuş trayektoriyasının yaradılması üçün sürətli alqoritmin işlənməsi;
- qeyri-səlis çıxarış sistemindən istifadə etməklə kvadrokopter üçün mürəkkəb mühitdə maneələrlə toqquşmadan yayınmaq üçün sürətli alqoritmin işlənməsi;
- neyroşəbəkəli modelləşdirmədən istifadə etməklə real zaman rejimində planlaşdırılmış marşrutun izlənməsi alqoritminin işlənməsi;
- intellektual hibrid adaptiv kontrollerlərin tətbiqi əsasında kvadrokopter idarəetmə konsepsiyasının işlənməsi.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektı yerüstü monitorinq şəraitində mürəkkəb mühitdə maneələrin ətrafında uçmaq imkanına malik olan və planlaşdırılmış marşrut üzrə avtonom uçuş həyata keçirən “X” konfigurasiyalı kvadrokopter tipli PUA-dır (iki propeller uçuş yolu boyunca istiqamətləndirilir). Tədqiqatın predmeti uçuş zonasında olan müxtəlif maneələri dəf etmək üçün maneələri təmin edən intellektual hibrid adaptiv kontrollerlərdən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin hərəkəti üçün trayektoriyaya nəzarət alqoritmlərinin işlənilməsi hazırlanmasıdır.

Tətbiq olunan tədqiqat metodikası. Dissertasiya işində nəzərdən keçirilən məsələlərin həlli zamanı riyazi analiz və sistem modelləşdirməsi üsullarından, qeyri-səlis məntiqin riyazi aparatı və neyron şəbəkə modelləşdirməsindən, həmçinin xətti PID-kontrollerlərin və sürət vektorunun fırlanma idarə edilməsi sintezindən istifadə olunmuşdur. Riyazi modelləşdirmə prosesində hesablama sistemlərindən istifadə olunmuşdur: Excel proqram cədvəli, MATLAB modelləşdirmə mühiti, o cümlədən MATLAB\Simulink, MATLAB\FIS, MATLAB\Neural Network Toolbox və MATLAB\ANFIS alətləri.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar. Elmi yeniliyə malik olan və şəxsən müəllif tərəfindən əldə edilmiş dissertasiya işinin mühüm nəticələri aşağıdakılardır:

1. MATLAB proqram mühitində obyekt yönümlü sistem modelləşdirmə vasitələrindən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin yaradılması üçün çoxmərhləli prosedur konsepsiyası.
2. Qeyri-səlis çıxarış sisteminin istifadəsi əsasında stasionar maneələrlə yerüstü monitorinq şəraitində məkan qlobal marşrutun işlənməsi üçün sürətli alqoritm.
3. Mürəkkəb mühitdə maneələri dəf etmək üçün sürətli manevr alqoritmı və üçlaylı feedforward neyron şəbəkəsinin istifadəsinə əsaslanan kvadrokopter üçün marşrut izləmə alqoritmı.
4. “Ağıllı” və “instinktiv” neyron altşəbəkələrindən ibarət konneksionist iyerarxik strukturlaşdırılmış neyron şəbəkəsi modelinin istifadəsini nəzərdə tutan çoxrejimli sabitləşdirmə alqoritmına əsaslanan kvadrokopterin hərəkəti ilə idarəetmə sistemi.
5. Mürəkkəb mühitdə maneələri dəf etmək üçün sürətli manevr alqoritmı və intellektual hibrid neyro-qeyri-səlis (neuro-fuzzy) adaptiv kontrollerlərin istifadəsinə əsaslanan Yerin monitorinqi şəraitində marşrut izləmə alqoritmı.

Tədqiqatın elmi yeniliyi. Tədqiqatın elmi yeniliyi yerüstü monitorinq şəraitində kvadrokopterin avtopilot uçuşunun 3D-trayektoriyalarının formalaşması üçün əldə edilmiş alqoritmlərdədir, yəni:

1. MATLAB proqram mühitində obyekt yönümlü sistem modelləşdirmə vasitələrindən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin yaradılması konsepsiyası işlənmişdir.

2. Neyro-qeyri-səlis modelləşdirmə metodlarından istifadə etməklə kvadrokopterin trayektoriyasına nəzarət üçün alqoritmlər işlənilib hazırlanmışdır. Məlum olan alqoritmlərdən icra sürəti ilə fərqlənilir, çünki onlar məkan oriyentasiyasının dəqiq saxlanmasını tələb etmir və aralıq problemlərin həllinin olmaması səbəbindən idarəetmə dövrəsini əhəmiyyətli dərəcədə sadələşdirir.

3. “Ağıllı” və “instinktiv” neyron altşəbəkələrindən ibarət iyerarxik strukturlaşdırılmış neyron şəbəkə modelindən istifadə əsasında kvadrokopterin adaptiv idarəetməsi üçün alqoritm işlənilib hazırlanmışdır ki, bu da yerüstü monitorinq şəraitində maneələr

ətrafında manevr edərkən şəbəkənin öyrətmə vaxtını və qərar qəbulunu əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər.

Tədqiqatın praktiki əhəmiyyəti. İşlənmiş idarəetmə alqoritmləri kifayət qədər “sadəliyə” malikdir, bunun nəticəsində dağlıq və meşəlik landşaftlarla xarakterizə olunan regionlarda infrastruktur layihələrinin icrasına nəzarət etmək üçün kvadrokopterlərin idarəetmə sistemlərində səmərəli istifadə oluna bilər. Dissertasiyada təklif olunan yanaşmalar sistemin üçölçülü dinamikasını simulyasiya etməyə və PID-kontrollerlərinin optimal əmsallarını effektiv seçməyə imkan verir. Bundan əlavə, trayektoriya formalaşma alqoritmləri fırlanan qanadlı aparatların idarəetmə sistemlərinin tam miqyaslı sınaqdan keçirilməsi üçün kvadrokopter prototipinin yaradılmasını asanlaşdırır. Ən vacib təbii sahələri olaraq, aşağıdakıları sadalamaq olar:

- Ölçətmə ərazidə çalışan personal üçün optimal yük-nəqliyyat vasitəsidir. Portativ günəş enerjisi panelləri və ya digər kiçik ölçülü alternativ elektrik generatorları ilə təmin edilmiş personalın uzunmüddətli fəaliyyətini təmin etmək üçün ideal nəqliyyatdır.
- Təbii fəlakət və başqa tipli qəza hallarında zərər çəkmiş insanları təhlükəli ərazidən çıxartmaq üçün istifadə oluna bilən nəqliyyat vasitəsidir. Helikopter və digər böyük ölçülü ağır aparatların cəlb oluna bilmədiyi şəraitdə, pilotlar üçün təhlükə yarandığı şəraitdə rahat daşına bilən nəqliyyat PUA-sı böyük əhəmiyyət kəsb etməkdədir.
- Kənd təsərrüfatında kimyəvi maddələrin çilənməsi üçün, xüsusilə yağış sonrası dövrlərdə digər çiləmə üsullarına nisbətən daha ucuz və effektiv alternativdir.

Tədqiqat nəticələrinin aprobasiyası. Dissertasiya işinin əsas müddəaları və nəticələri müvafiq ixtisas mütəxəssislərinin və alimlərinin iştirakı ilə institut miqyasında keçirilən seminarlarda təqdim edilmiş və müzakirə edilmişdir.

Dissertasiyanın materialları və əsas nəticələri müxtəlif səviyyələrdə beynəlxalq və respublika elmi-praktik konfranslarında məruzələrdə təqdim edilmişdir, o cümlədən:

- the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2022) 24-26 August, 2022, Baku, Azerbaijan;
- the 15th International Conference on Application of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools (ICAFS 2022) 26-27 August, 2022, Budva, Montenegro;
- Dokuz Eylül Üniversitesi ile Azərbaycan Milli İlimlər Akademisi Arasındaki İkinci Uluslararası Temel Bilim İkili Çalıştayı, 18 November, 2022, Baku, Azerbaijan;
- the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2023), August 22-24, 2023, Istanbul Technical University and Galatasaray University, Istanbul, Turkey;
- the Intelligent Systems Conference (IntelliSys 2023), September 7-8, 2023, Amsterdam, The Netherlands;
- the 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI 2023) August 28-30, 2023, Baku, Azerbaijan.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilat. Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun 1 sayılı şöbəsində (İnformasiya Cəmiyyəti problemləri) yerinə yetirilmişdir.

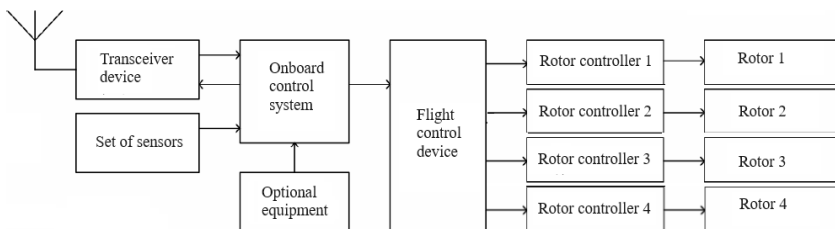
Dərc olunmuş elmi məqalələrin sayı. Dissertasiya işinin materialları əsasında ümumilikdə 8 elmi əsər nəşr olunub, onlardan 3-ü Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının tövsiyə etdiyi aparıcı resenziyalı jurnallarda və nəşrlərdə dərc olunub, 4 əsər Web of Science və Scopus bazalarına daxil edilmiş jurnallarda dərc olunub.

Dissertasiya işinin strukturu və həcmi. Dissertasiya giriş, 4 fəsil, nəticə və istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İşin ümumi həcmi 118 vərəq məşinlə yazılmış mətnədir, 53 şəkil, 10 cədvəldən ibarətdir. Bibliografiyaya 80 ad daxildir.

DİSSERTASIYA İŞİNİN MƏZMUNU

Girişdə işin aktuallığı qeyd olunur, dissertasiya tədqiqatının məqsədinə nail olmaq üçün zəruri olan tapşırıq və yanaşmaların siyahısı verilir, işin strukturu və məzmunu, habelə müdafiəyə təqdim edilən arzu olunan nəticələr şərh edilir.

Birinci fəsil kvadrokopterlər üçün avtomatik idarəetmə sistemlərin kontrollerlərinin praktiki istifadəsinin xüsusiyyətlərinin təhlilinə həsr edilmişdir. Kütləvi istifadəni nəzərə alaraq, bu tədqiqatın mövzusu “X” konfigurasiyasına malik kvadrokopterdir. Şəkil 1-də bu cür kvadrokopterin ümumi funksional sxemi göstərilir.



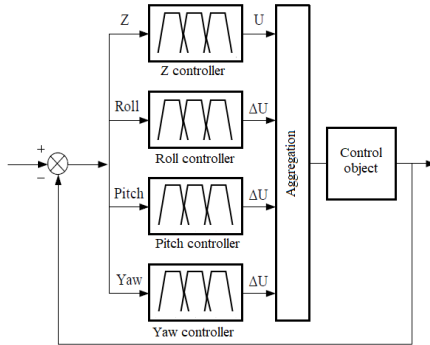
Şəkil 1. Kvadrokopterin ümumi sxemi

Kvadrokopterin idarə edilməsi probleminin həlli elmi və praktiki baxımdan əhəmiyyətlidir ki, bu da mövzuya əhəmiyyətli marağa səbəb olur. Müasir avtomatik idarəetmə nəzəriyyəsi metodlarının inkişafına və onların əsasında kəsilməz P-, PI-, PD-, PID-tənzimləyiciləri şəklində əldə edilən nəticələr təhlil edilir.

Qeyri-səlis, neyron və hibrid adaptiv kontrollerlərdən istifadə etməklə kvadrokopterin avtonom uçuşunun əsas problemlərinin həlli üçün mövcud üsulların nəzərdən keçirilməsi aparılıb, onlardan ən uyğunları müəyyən edilib, məlum üsul və alqoritmlərin birbaşa tətbiqinə mane olan problemlər müəyyən edilib.

İdarəetmə problemlərinin həllində qeyri-səlis məntiq elementlərinin tətbiqi hal-hazırda iki yanaşma üzrə mümkündür. Birincisi, obyektin fəaliyyətinin məqsədlərini müəyyən edən vəziyyət təsnifatını tərtib etməkdir. İkinci üsul daha ənənəvidir və idarəetmə obyektinin dəyişənlərinin birbaşa tənzimlənməsinə əsaslanır. Göstərilən fərqlərə baxmayaraq, bu üsullar bir-birinə bənzəyir. Şəkil 2-də kvadrokopterin

uçuş prosesini idarə etmək üçün müxtəlif müəlliflər tərəfindən təklif olunan tənzimləyicilərin strukturları təqdim edilir¹. Onların hər birinin xüsusiyyətləri tədqiq edilir. Şəkil 2-də təqdim olunan nəzarətçi dəyişənlərin hər biri üçün ümumi idarəetmə (U) və PID-ə oxşar qanuna görə bucaqlar (ΔU) şəklində korreksiya əmsalları yaradan dörd ekvivalent qeyri-səlis tənzimləyicilərdən ibarətdir: qalxma (Pitch), dönmə (Yaw), fırlanma (Roll). Kvadrokopter mühərriklərinin hər biri üçün son idarəetmə hərəkətlərinin hesablanması kontrollerlərin çıxışlarının qiymətlərini cəmləməklə “Aqreqasiya” blokunda aparılır.



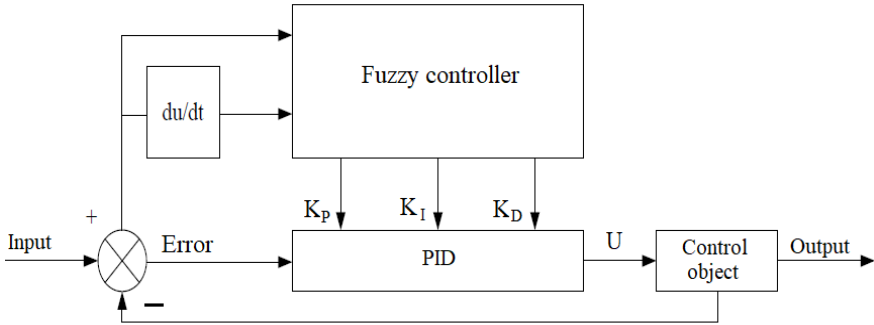
Şəkil 2. Nümunəvi qeyri-səlis kontroller

Süni neyron şəbəkələri intellektual idarəetmə sistemlərinin qurulması üçün qeyri-səlis tənzimləyicilərə bəzi alternativləri təklif edir. İdarəetmə sistemlərinin təşkili üçün əsas kimi neyron şəbəkələrə maraq onların qeyri-səlis, qeyri-dəqiq verilənlərlə işləmək qabiliyyəti ilə müəyyən edilir ki, bu da bir çox texniki idarəetmə obyektləri, o cümlədən kvadrokoptərlər üçün xarakterikdir. Neyron şəbəkələrin xüsusiyyətləri onların əsasında mürəkkəb, qeyri-xətti asılılıqları realizə etmək imkanı verir. Tənzimləyicilərin layihələndirilməsi zamanı bu xüsusiyyət idarəetmə sisteminin sintezini asanlaşdırır, çünki süni neyron şəbəkələri əsasında qarşılıqlı əlaqəli idarəetmə sistemlərinin həyata keçirilməsi tərtibatçıdan daxili kəmiyyətlərin

¹ Lopez V., Morata F. Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor // International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering – ISKE, 2010. – pp. 141-146.

qarşılıqlı təsiri haqqında dəqiq ədədi biliklərə malik olmasını tələb etmir. Nəzarətçi sintezinin müəyyən sayda iterasiyasına ehtiyacı, dizayn prosesinin tərtibatçının intuisiyasından yüksək asılılığını, təlim nümunələrinin ilkin alınması və hazırlanması ehtiyacını çatışmazlıq olaraq qeyd edə bilərik ki, bu da özlüyündə sadə məsələ deyil.

Şəkil 3-də kvadrokopterləri idarə etmək üçün istifadə edilən hibrid tənzimləyicinin strukturları göstərilir². Onun üstünlükləri və mənfi cəhətləri, iş xüsusiyyətləri təhlil edilir.



Şəkil 3. Qeyri-səlis PID-tənzimləyicisi

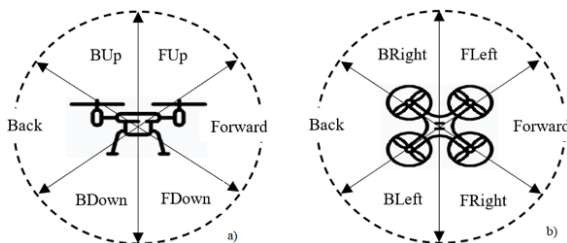
Təklif olunan yanaşmaların təhlili kifayət qədər informasiyanın mövcud olmadığı şəraitdə süni intellekt metodlarından istifadənin üstünlükləri haqqında nəticə çıxarmağa imkan verir: qeyri-səlis məntiq, süni neyron şəbəkələri, neyro-qeyri-səlis hibrid şəbəkələr. Eyni zamanda, aydındır ki, hər hansı bir metoddan istifadə, hətta PI-, PD-, PID-kontrollerlərlə müqayisədə daha effektiv olsa belə, tərtibatçıların qarşılaşdığı problemlərin bütün siyahısını həll etməyə imkan vermir. Belə ki, bir neçə ayrı nəzarət metodunu birləşdirən “daha yüksək” səviyyəli, hibrid tənzimləyicilərin qurulması ehtiyacından danışa bilərik. Məhz bu mülahizələr girişdə ifadə olunmuş dissertasiya tədqiqatının məqsədlərini əvvəlcədən müəyyən etmişdir.

² Nirut P., Masuda R., Hirata H. Control System Design and Simulation for a Quadrotor Helicopter // International Conference on Simulation Technology. - Port Island, Kobe, Japan, 2013. – pp. 593-597.

İkinci fəsildə kvadrokopterin dinamik üçölçülü modelinin³ layihələndirilməsi metodologiyası müzakirə olunur. İstənilən fiziki cisim kimi, kvadrokopter də 6 sərbəstlik dərəcəsinə malikdir ki, bu da kvadrokopterin üçölçülü fəzada həndəsi hərəkətləri yerinə yetirmək qabiliyyətini göstərir, yəni: irəli/geri, yuxarı/aşağı, sola/sağa (Dekart üçölçülü koordinatlar sistemində) hərəkət etmək, eləcə də üç qarşılıqlı perpendikulyar oxun hər biri ətrafında Eylər fırlanmaları (dönmə - yaw, qalxma - pitch, əyilmə - roll) (Şəkil 4).

Kvadrokopterin kinematik modelinin dəyişənlərinin hər biri haqqında məlumat verilmişdir:

- 1) x və y kvadrokopterin fəzanın üfüqi müstəvisində mövqeyini göstərmək üçün istifadə olunur.
- 2) z kvadrokopterin fəzanın şaquli müstəvisində hündürlüyünü müəyyən edir.
- 3) φ , 0_x oxu ətrafında fırlanma bucağı kimi, kvadrokopterin yana əyilməyini göstərir.
- 4) θ , 0_y oxu ətrafında fırlanma bucağı kimi, kvadrokopterin qalxmasını göstərir.
- 5) ψ , 0_z oxu ətrafında fırlanma bucağı kimi, kvadrokopterin dönməsini göstərir.



Şəkil 4. Üçölçülü fəzada kvadrokopterin həndəsi hərəkətləri

³ Гэн К., Чулин Н.А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера. Наука и образование, 2015, № 5.

Kütləsi m olan bir kvadrokopter üçün Nyutonun 2-ci qanunu yerinə yetirilir və kvadrokopterin 6 sərbəstlik dərəcəsini nəzərə alaraq bu qanun aşağıdakı kimi təsvir olunur⁴:

$$m\vec{a} = -m\vec{g}\vec{e}_y + R(\varphi, \theta, \psi)\vec{u}, \quad (1)$$

burada $\vec{a} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^T$ kvadrokopterin toplam təcildir; $\vec{e}_y - 0_y$ oxu boyunca istiqamətlənmiş vahid vektor; $R(\varphi, \theta, \psi)$ – fırlanma matrisi; \vec{u} – kvadrokopterə təsir edən qeyri-konservativ qüvvələrin cəmidir. Kvadrokopter hərəkətinin layihələndirməsi modeli 6 sərbəstlik dərəcəsinin hər biri üçün aşağıdakı kimi təqdim olunan diferensial tənliklər sistemini nəzərə almalıdır:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = [\cos(\varphi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\varphi)\sin(\psi)]\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{y} = [\cos(\varphi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\varphi)\cos(\psi)]\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{z} = -g + [\cos(\varphi)\cos(\theta)]\frac{u_1}{m}, \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{\psi}\frac{I_y - I_z}{I_x} - \dot{\theta}\Omega\frac{J_r}{I_x} + \frac{1}{I_x}u_2, \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\psi}\frac{I_z - I_x}{I_y} - \dot{\varphi}\Omega\frac{J_r}{I_y} + \frac{1}{I_y}u_3, \\ \ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\varphi}\frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{1}{I_z}u_4, \end{array} \right. \quad (2)$$

burada $I_x - 0_x$ oxuna görə cismin ətalət momentidir; $I_y - 0_y$ oxuna görə cismin ətalət momentidir; $I_z - 0_z$ oxuna görə cismin ətalət momentidir; J_r – rotorun ətalət momenti; Ω – rotorların bucaq sürəti; u_i ($i = 1 \div 4$) – giriş verilənləri və ya translyasiya vektoru əmsalları şəklində kvadrokopterin dinamik sisteminə təsir göstərən qüvvələrdir.

Kvadrokopterin dinamik sisteminə təsir göstərən qüvvələrin tənlikləri və propellerlərin sürəti Ω tənliyi aşağıda verilmişdir:

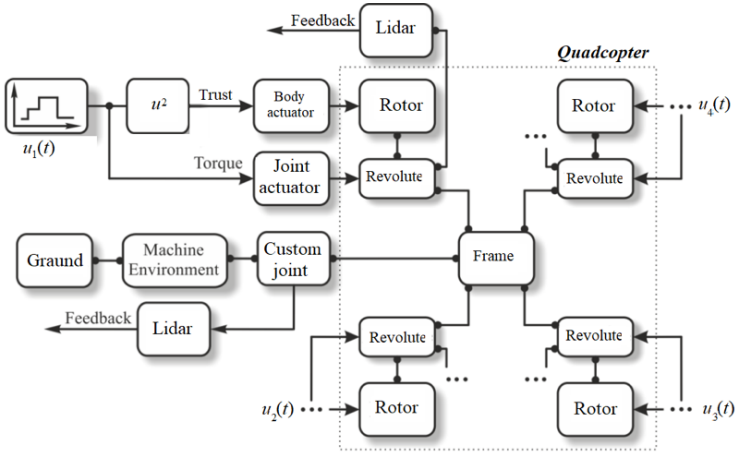
⁴ Гурьянов А.Е. Моделирование управления квадрокоптером. Инженерный вестник, 2014, № 8.

$$\begin{cases} u_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2), \\ u_2 = lb(\Omega_2^2 - \Omega_4^2), \\ u_3 = lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2), \\ u_4 = d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2), \end{cases} \quad (3)$$

$$\Omega = (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2), \quad (4)$$

burada l – propellerin mərkəzi ilə kvadrokopterin mərkəzi arasındakı məsafə; b – kvadrokopterin yüksəlişini əks etdirən parametr; d – müqavimət göstəricisi; $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ və Ω_4 – müvafiq olaraq ön, sağ, arxa və sol propellerlərin bucaq sürətləri.

Fəsilə MATLAB paketində sistem modelləşdirmə alətlərindən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin layihələndirilməsi proseduru təqdim edilir. MATLAB\SimMechanics mühitində kvadrokopterin mexaniki modeli Şəkil 5-də təqdim edilir.



Şəkil 5. MATLAB\SimMechanics-də kvadrokopterin mexaniki modeli

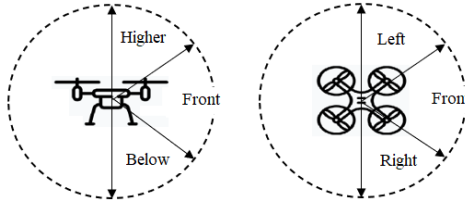
Sistemli modelləşdirmə alətlərinin vasitəsilə kvadrokopter prototipinin layihələndirilməsi aşağıdakı mərhələlər üzrə icra olunur:

- 1) kvadrokopterin dizaynı: əsas fiziki parametrlərin seçilməsi;
- 2) kvadrokopterin sistem modelinin işlənməsi;
- 3) kvadrokopterin mexanika və elektronikasının modelləşdirilməsi;

- 4) kvadrokopterin naviqasiya və idarəetmə sisteminin əsaslı şəkildə modelləşdirilməsi;
- 5) texniki görünüş və əlaqə sisteminin hazırlanması;
- 6) 3D simulyasiyaların aparılması (Simulink 3D Animation);
- 7) proqram təminatının yaradılması və kvadrokopter prototipinin sınaqdan keçirilməsi;
- 8) kvadrokopterin əsas prototipinin yığılması, kalibrlənməsi və sınaqdan keçirilməsi.

Yekunda qeyd olunur ki, sistemli modelləşdirmə yanaşması nəticəsində kvadrokopterin hazırlanmasında prototiplərin sayını kəskin şəkildə azaltmaq mümkündür.

Üçüncü fəsil bəzi hallarda pilotsuz texnologiyalardan istifadə etməklə yerüstü monitorinqin tələb olunduğu dağlar və meşələrlə xarakterizə olunan ərazilərdə infrastrukturun və kənd təsərrüfatının inkişafı üçün informasiya təminatı problemlərini araşdırır. Bu paradigma dağlıq və meşəlik landsaftda yerüstü uçuş zamanı kvadrokopterin 3D-trayektoriyasını yaradan alqoritm təklif edir⁵.



Şəkil 6. Maneə mövcudluğunun görünüşü sektorları: a) yan tərəfdən görünüş, b) yuxarı tərəfdən görünüş

Şəkil 6-da kvadrokopter və onun fəzada maneələrlə qarşılaşa biləcəyi vizual sektorları göstərilir. Kvadrokopter sensorlarından alınan verilənlər əsasında giriş siqnalları (x_1 =Front, x_2 =Left, x_3 =Right, x_4 =Higher, x_5 =Below) $[0, 1]$ intervalında dəyişir. Hər bir giriş dəyişəni x_k ($k=1\div 5$) kvadrokopterin hərəkət istiqamətində üfüqi və ya şaquli olaraq fəza

⁵ Habibbayli T.H. Regulation of quadcopter autopiloting during overland monitoring using a fuzzy inference system. Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2022) 24-26 August 2022, Baku, Azerbaijan. Vol. 1, pp. 207-209.

sektoruna uyğun gəlir, onun daxilində maneələrin mövcudluğu və onlara olan məsafə təhlil edilir. Çıxış dəyişənlərinə təsirlər üfqi müstəvidə sürəti (v_1 =Velocity), fırlanma bucağını (v_2 = Rotation) və uçuş hündürlüyünü (v_3 =Height) dəyişdirərək kvadrokoptərə maneə ilə toqquşmadan yayınmağa imkan verir.

Kvadrokopterin fəzada göstərilən beş istiqamətdə yerüstü avtopilot rejiminin qaydalarını müəyyən etmək üçün aşağıdakı informasiya fraqmentləri şəkildə məntiqi cəhətdən bir-birinə zidd olmayan qaydaların məhdud toplusu nəzərdən keçirilmişdir⁶:

d_1 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca heç bir maneə aşkar edilmirsə və ya kifayət qədər uzaq məsafədə yerləşirsə, onda istiqaməti, hündürlüyü dəyişdirməyə və sürəti azaltmağa ehtiyac yoxdur”;

d_2 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə və soldakı sektor azaddırsa, onda sürəti orta qiymətə qədər endirmək və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən bir qədər sola dönmək”;

d_3 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə və soldakı sektor azaddırsa, onda sürəti minimuma endirmək və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən kəskin şəkildə sola dönmək”;

d_4 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, o qədər də uzaq olmayan məsafədə sol sektorda da maneə mövcud olarsa və sağdakı sektor azaddırsa, onda sürəti orta qiymətə qədər endirmək və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən bir qədər sağa dönmək”;

d_5 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, sol sektorda da yaxın məsafədə maneə mövcud olarsa və sağdakı sektor azaddırsa, onda sürəti minimuma endirmək və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən kəskin şəkildə sağa dönmək”;

d_6 : “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, uzaq olmayan məsafədə sol və sağ sektorlarda

⁶ Habibbayli T.H., Aliyev M.E. Fuzzy inference-based quadcopter flight regulation under overland monitoring. The Springer Series “Lecture Notes in Networks and Systems”, Vol. 610, pp. 372-381, 2023.

da maneələr mövcud olarsa və yuxarı sektor azaddırsa, onda sürəti orta qiymətə qədər endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü bir qədər artırmaq”;

d₇: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, uzaq olmayan məsafədə sol və sağ sektorlarda da maneələr olarsa və yuxarı sektor azaddırsa, onda sürəti minimuma endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü kəskin artırmaq”;

d₈: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, sol, sağ və yuxarı sektorlarda da uzaq olmayan məsafədə maneələr mövcuddursa və aşağı sektor azaddırsa, onda sürəti orta səviyyəyə endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü bir qədər azaltmaq”;

d₉: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, uzaq olmayan məsafədə sol, sağ və yuxarı sektorlarda da maneələr mövcud olarsa və aşağı sektor azaddırsa, onda sürəti minimuma endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü kəskin şəkildə azaltmaq”;

d₁₀: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə və sol sektorda orta məsafədə maneə aşkar edilərsə və maneələr uzaq olmayan məsafədə sağda, aşağıda və yuxarıda aşkar edilərsə, onda marşrutu və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti orta səviyyəyə endirmək”;

d₁₁: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə və sol sektorda orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, sağ, aşağı və yuxarı sektorlarda uzaq məsafədə olmayan maneələr aşkar edilərsə, onda uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti minimuma endirmək və kəskin şəkildə sola dönmək”;

d₁₂: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, marşrut boyunca solda yaxın məsafədə, sağda orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, maneələr aşağıda və yuxarıda uzaq olmayan məsafələrdə aşkarlanarsa, onda uçuş marşrutunu və hündürlüyünü dəyişmədən sürəti orta səviyyəyə endirmək”;

d₁₃: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, marşrut boyunca solda da yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, sağda orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, aşağıda və

yuxarıda uzaq olmayan məsafələrdə maneələr aşkar edilərsə, onda uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti minimuma endirmək və kəskin şəkildə sağa dönmək”;

*d*₁₄: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, marşrut boyunca solda yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, sağda da yaxın məsafədə maneə aşkar edilərsə, yuxarıda orta məsafədə maneə aşkar edilərsə və aşağıda çox da uzaq olmayan məsafədə maneə aşkar edilərsə, onda marşrutu və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti orta səviyyəyə endirmək”;

*d*₁₅: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca, eləcə də sol və sağ sektorlarda yaxın məsafələrdə maneələr aşkar edilərsə, yuxarıda çox da uzaq olmayan məsafədə maneə aşkar edilərsə, onda sürəti minimuma endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü bir qədər artırmaq”;

*d*₁₆: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, sol, sağ və yuxarı sektorlarda yaxın məsafələrdə maneələr aşkar edilərsə, aşağı sektorda isə orta məsafədə maneə aşkar edilərsə, onda marşrutu və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti orta səviyyəyə endirmək”;

*d*₁₇: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca, eləcə də solda, sağda və yuxarıda yaxın məsafədə maneələr aşkar edilərsə, lakin aşağı sektorda maneə orta məsafədə aşkar edilərsə, onda sürəti minimuma endirmək və əyilmədən uçuş hündürlüyünü kəskin şəkildə azaltmaq”;

*d*₁₈: “Əgər kvadrokopterin uçuş marşrutu boyunca orta məsafədə maneə aşkar edilərsə və marşrutun solunda, sağında, yuxarisında və altında yaxın məsafədə maneələr aşkar edilərsə, onda marşrutu və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən sürəti orta səviyyəyə endirmək”;

*d*₁₉: “Əgər görünüş sahəsinin bütün sektorlarında aşkar edilmiş maneələr yaxın məsafələrdədirsə, onda sürəti minimuma endirmək və uçuş hündürlüyünü dəyişmədən kəskin şəkildə sola dönmək”.

Əsas model olaraq, giriş xüsusiyyətləri ilə fəzanın qeyri-səlis sektorlarını əks etdirən linqvistik dəyişənlər şəklində qeyri-səlis çıxarış sistemindən istifadə olunur, onların daxilində maneələrin və onlara olan məsafələrin mövcudluğu verbal şəkildə, yəni giriş linqvistik dəyişənlərin termləri şəklində şərh olunur. Üfüqi müstəvidə

fırlanma bucağının, uçuş hündürlüyünün və kvadrokopterin sürətinin dəyişməsinə əks etdirən çıxış linqvistik dəyişənlərin termləri şəklində tərtib edilmiş bu sistemin qeyri-səlis nəticələri əsasında maneələrin aradan qaldırılması təklif olunur. Bütün linqvistik dəyişənlər, onlara müvafiq olan termlər və qeyri-səlis çoxluqların qurulması üçün tələb olunan universumlar Cədvəl 1-də təqdim edilir.

Cədvəl 1

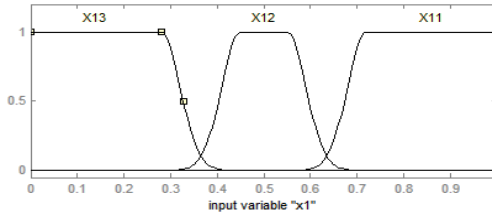
Qeyri-səlis çıxarış sisteminin dəyişənləri

Girişlər	x ₁	Dəyişən adı	<i>Front</i> – qarşıdakı maneə qədər məsafə
		Term-çoxluq	{X ₁₁ =BÖYÜK, X ₁₂ =ORTA, X ₁₃ =KIÇİK}
		Universum	[0, 1]
	x ₂	Dəyişən adı	<i>Left</i> – soldakı maneə qədər məsafə
		Term-çoxluq	{X ₂₁ =BÖYÜK, X ₂₂ =ORTA, X ₂₃ =KIÇİK}
		Universum	[0, 1]
	x ₃	Dəyişən adı	<i>Right</i> – sağdakı maneə qədər məsafə
		Term-çoxluq	{X ₃₁ =BÖYÜK, X ₃₂ =ORTA, X ₃₃ =KIÇİK}
		Universum	[0, 1]
	x ₄	Dəyişən adı	<i>Higher</i> – yuxarıdakı maneə qədər məsafə
		Term-çoxluq	{X ₄₁ =BÖYÜK, X ₄₂ =ORTA, X ₄₃ =KIÇİK}
		Universum	[0, 1]
	x ₅	Dəyişən adı	<i>Below</i> – aşağıdakı maneə qədər məsafə
		Term-çoxluq	{X ₅₁ =BÖYÜK, X ₅₂ =ORTA, X ₅₃ =KIÇİK}
		Universum	[0, 1]
Çıxışlar	y ₁	Dəyişən adı	<i>Velocity</i> – uçuş sürəti
		Term-çoxluq	{Y ₁₁ =SON HƏDDƏ YUXARI, Y ₁₂ =ORTA, Y ₁₃ =SIFIR}
		Universum	[0, 1]
	y ₂	Dəyişən adı	<i>Rotation</i> – üfüqi müstəvidə fırlanma
		Term-çoxluq	{Y ₂₁ =KƏSKİN ŞƏKİLDƏ SOLA, Y ₂₂ =BİR AZ SOLA, Y ₂₃ =EHTİYAC YOXDUR, Y ₂₄ =BİR AZ SAĞA, Y ₂₅ =KƏSKİN ŞƏKİLDƏ SAĞA}
		Universum	[-0.5, 0.5]
	y ₃	Dəyişən adı	<i>Height</i> – uçuş hündürlüyündə dəyişiklik
		Term-çoxluq	{Y ₃₁ =KƏSKİN ŞƏKİLDƏ YUXARL, Y ₃₂ =BİR AZ YUXARI, Y ₃₃ =EHTİYAC YOXDUR, Y ₃₄ =BİR AZ AŞAĞI, Y ₃₅ =KƏSKİN ŞƏKİLDƏ AŞAĞI}
		Universum	[-0.5, 0.5]

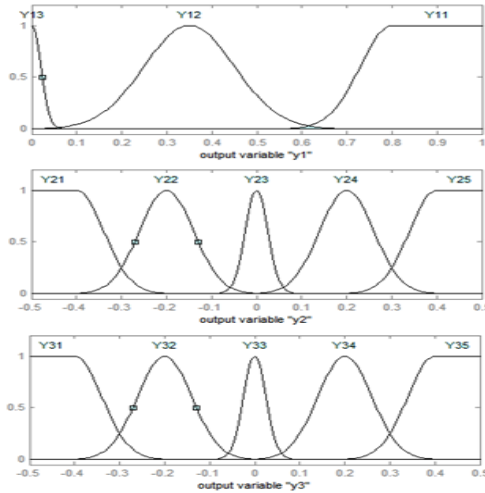
Verilmiş d_1-d_{19} qaydalarına əsaslanan qeyri-səlis çıxarış sistemi (FIS) simvolik formada aşağıdakı kimi təsvir olunur:

- $d_1: (x_1 = X_{11}) \Rightarrow (y_1 = Y_{11}) \& (y_2 = Y_{23}) \& (y_3 = Y_{33});$
 $d_2: (x_1 = X_{12}) \& (x_2 = X_{21}) \Rightarrow (y_1 = Y_{12}) \& (y_2 = Y_{22}) \& (y_3 = Y_{33});$
 $d_3: (x_1 = X_{13}) \& (x_2 = X_{21}) \Rightarrow (y_1 = Y_{13}) \& (y_2 = Y_{21}) \& (y_3 = Y_{33});$

 $d_{17}: (x_1 = X_{13}) \& (x_2 = X_{23}) \& (x_3 = X_{33}) \& (x_4 = X_{43}) \& (x_5 = X_{52}) \Rightarrow$
 $(y_1 = Y_{13}) \& (y_2 = Y_{23}) \& (y_3 = Y_{31});$
 $d_{18}: (x_1 = X_{12}) \& (x_2 = X_{23}) \& (x_3 = X_{33}) \& (x_4 = X_{43}) \& (x_5 = X_{53}) \Rightarrow$
 $(y_1 = Y_{12}) \& (y_2 = Y_{23}) \& (y_3 = Y_{33});$
 $d_{19}: (x_1 = X_{13}) \& (x_2 = X_{23}) \& (x_3 = X_{33}) \& (x_4 = X_{43}) \& (x_5 = X_{53}) \Rightarrow$
 $(y_1 = Y_{13}) \& (y_2 = Y_{21}) \& (y_3 = Y_{33}).$



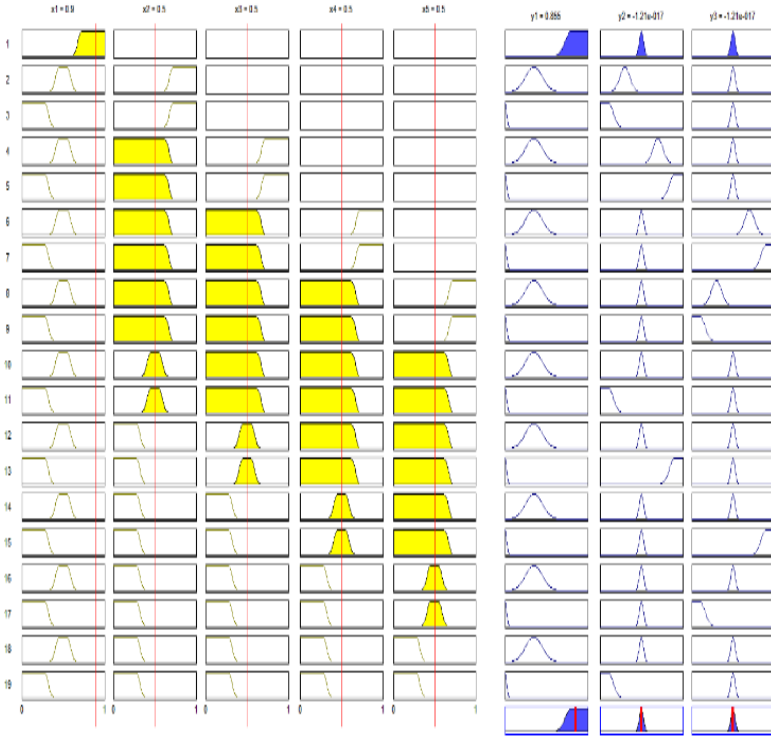
Şəkil 7. “Qarşıdakı maneə qədər məsafə” x_1 giriş linqvistik dəyişənin termləri



Şəkil 8. y_1 (Velocity), y_2 (Rotation) və y_3 (Height) çıxış termləri

FIS-ni realizə etmək üçün “Bell-type” və Qauss tipli mənsubiyyət funksiyaları seçildi. MATLAB\FIS redaktorunda bu funksiyalar empirik qaydada müəyyən edilmişdir (Şəkil 7 və Şəkil 8-ə bax). Bunun üçün Mamdani tipli FIS 5 girişi və 3 çıxışı olan qeyri-səlis modeli aktivasiya edir. Xüsusən də istifadə olunan qeyri-səlis modelin giriş və çıxış xassələri linqvistik dəyişənlərin termləri müvafiq mənsubiyyət funksiyaları səviyyəsində təqdim olunur.

Bütün dəyişənləri təyin etdikdən, mənsubiyyət funksiyalarını təyin etdikdən və qeyri-səlis bilik bazasının qaydalarını qurduqdan sonra kvadrokopterin avtopilot uçuşunun müxtəlif ssenariləri əldə edildi. Bu məqsədlə MATLAB\FIS redaktorunun qrafik interfeysinin interaktiv pəncərəsindən istifadə edilmişdir. Şəkil 9-da FIS çıxış (0.855, 0, 0) şəklində giriş təsirlərinə (0.95, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5) reaksiyasını göstərir.



Şəkil 9. MATLAB\FIS redaktorunun qrafiki interfeysi

MATLAB\FIS redaktorunun qrafik interfeysi vasitəsilə bütün linqvistik qaydaların realizə edilməsi əsasında “giriş-çıxış” şəklində müvafiq işçi produksiyalar əldə olundu (Cədvəl 2-yə bax).

Cədvəl 2

Qeyri-səlis çıxarış sisteminin məhsulları

№	Girişlər					Çıxışlar		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3
1	0.95	0.50	0.50	0.50	0.50	0.855	0	0
2	0.50	0.95	0.50	0.50	0.50	0.350	-0.200	0
3	0.10	0.90	0.50	0.50	0.50	0.013	-0.411	0
4	0.50	0.50	0.90	0.50	0.50	0.350	0.200	0
5	0.10	0.50	0.90	0.50	0.50	0.013	0.411	0
6	0.50	0.50	0.50	0.90	0.50	0.350	0	0.200
7	0.10	0.50	0.50	0.90	0.50	0.013	0	0.411
8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.90	0.350	0	-0.200
9	0.10	0.50	0.50	0.50	0.90	0.013	0	-0.411
10	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.350	0	0
11	0.10	0.50	0.50	0.50	0.50	0.013	-0.411	0
12	0.50	0.10	0.50	0.50	0.50	0.350	0	0
13	0.10	0.10	0.50	0.50	0.50	0.013	0.411	0
14	0.50	0.10	0.10	0.50	0.50	0.350	0	0
15	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50	0.013	0	0.411
16	0.50	0.10	0.10	0.10	0.50	0.350	0	0
17	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	0.013	0	-0.411
18	0.50	0.10	0.10	0.10	0.10	0.350	0	0
19	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.013	-0.411	0

Bu fəsilə neyroşəbəkəli modelləşdirmədən istifadə edərək trayektoriyanın operativ formalaşması üçün seçilmiş müxtəlif uçuş ssenariləri üzrə kvadrokopterin davranışının nəticələri təhlil edilir⁷. Cədvəl 3-də yerüstü monitorinq zamanı kvadrokopterin görünüş sahəsinin beş sektorunda maneələrin mövcudluğu zamanı onun davranışı üçün MATLAB\FIS redaktorunun vasitəsilə müxtəlif ssenarilər təqdim olunur.

⁷ Аббасов А.М., Рзаев Р.Р., Ахмедов И.М., Алмасов А.Ш., Габиббейли Т.Г. Управление квадрокоптером в условиях наземного мониторинга с применением нейро-сетевых и нечётких методов моделирования. Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2023, том 18, выпуск 1, 47-62.

Eyni zamanda, uçuş trayektoriyası özü daxil olan linqvistik dəyişənlərin x_k ($k=1\div 5$) üzvlərinin keyfiyyət qiymətləndirmə meyarı kimi çıxış edən kvadrokopterin bütün baxış sektorlarında maneələrin mövcudluğunun (və ya olmamasının) operativ beş meyarlı qiymətləndirilməsi əsasında formalaşır. Aşağıda göstərilən analitik yanaşmaya əsasən x_k faktorlarının nisbi təsirini əks etdirən kvadrokopterin hər bir arzu olunan vektor (y_1, y_2, y_3) üçün alternativ uçuş marşrutlarını müqayisə etməyə imkan verir. Baxılan məsələdə kvadrokopterin uçuş trayektoriyasının formalaşması üçün 35 mümkün ssenari haqqında “xarici biliklər” informasiya modeli şəklində təqdim olunur (Cədvəl 3-ə bax).

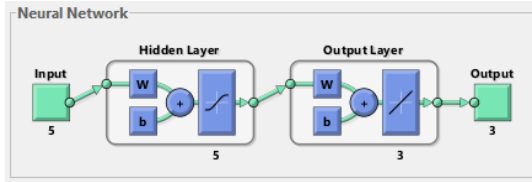
Cədvəl 3

Kvadrokopterin maneələrin ətrafında manevr edilməsi ssenariləri

№	Girişlər					Çıxışlar		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3
1	0.433	0.291	0.628	0.076	0.961	0.350	0.055	-0.190
2	0.611	0.824	0.460	0.862	0.855	0.380	-0.194	0.000
3	0.374	0.622	0.139	0.750	0.702	0.337	-0.154	0.215
4	0.712	0.738	0.568	0.438	0.469	0.854	0.000	0.000
5	0.922	0.535	0.320	0.107	0.102	0.855	0.000	0.000
6	0.396	0.283	0.318	0.925	0.001	0.349	0.000	0.204
7	0.026	0.563	0.311	0.177	0.959	0.013	-0.001	-0.410
.....								
13	0.510	0.253	0.232	0.894	0.429	0.350	0.000	0.200
14	0.333	0.292	0.856	0.275	0.762	0.131	0.386	0.000
15	0.645	0.632	0.452	0.743	0.643	0.658	-0.103	0.103
16	0.524	0.833	0.781	0.985	0.546	0.350	-0.200	0.000
.....								
30	0.605	0.961	0.766	0.756	0.306	0.367	-0.196	0.000
31	0.702	0.644	0.219	0.000	0.740	0.851	-0.001	-0.001
32	0.433	0.629	0.741	0.405	0.838	0.350	0.144	0.000
33	0.465	0.793	0.395	0.745	0.086	0.350	-0.200	0.000
34	0.065	0.004	0.789	0.553	0.318	0.013	0.411	0.000
35	0.026	0.245	0.480	0.651	0.787	0.014	0.000	-0.195

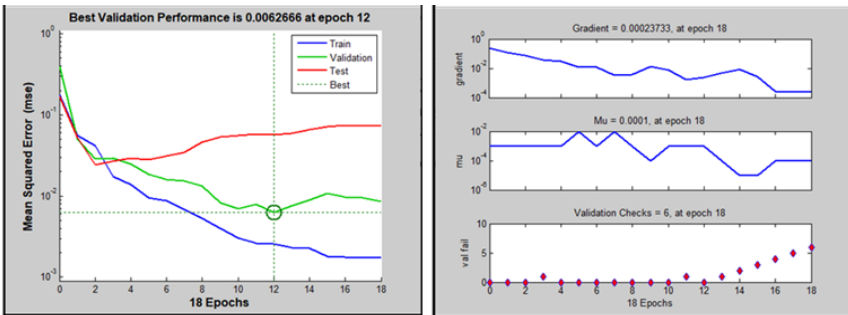
MATLAB paketində neyron şəbəkəsi loqarifmik-siqmoid aktivləşdirmə funksiyalarına malik 5 qeyri-xətti neyrondan ibarət olan bir “gizli” laya malikdir (Şəkil 10-a bax). Onların diapazonu imkan verir ki,

kvadrokopterin uçuş trayektoriyası boyunca üfüqi və şaquli müstəvilərdə fırlanmalar $[-0.5, 0.5]$ intervalında və uçuş sürəti $[0, 1]$ intervalında təmin olunsun.



Şəkil 10. MATLAB paketində üçlaylı feedforward neyron şəbəkəsi

Təlim, sınaq və validasiyadan sonra (Şəkil 11-ə bax) neyron şəbəkə müvafiq produksiyaları yaradır (Cədvəl 4-ə bax). Kvadrokopterin uçuş marşrutu ilə bağlı evristik biliklər yaradan neyron şəbəkəsi $[0, 1]$ seqmentdən ədədlər şəklində təqdim olunan bütün baxış sektorlarında maneələrin “yaxınlığını” qiymətləndirmək üçün meyarların sayına uyğun olaraq komponentlərlə daxil olan vektorları emal edir. Parametrləri tənzimlədikdən sonra neyron şəbəkə cədvəl şəklində təsvir olunan $F: R^5 \rightarrow R^3$ çoxdəyişənli funksiyanı (Cədvəl 3-ə bax) approksimasiya edə bilər. Hər bir hal üçün neyron şəbəkəsi üç komponentli vektor $(y_1, y_2, y_3) = (\text{Velocity}, \text{Rotation}, \text{Height})$ şəklində kvadrokopterin uçuş trayektoriyası ilə idarəetmə əmrini formalaşdırır. Konkret olaraq, neyron şəbəkəsi $(0.510, 0.253, 0.232, 0.894, 0.429)$ giriş təsirinə $(0.350, 0.000, 0.200)$ çıxış ilə cavab verir (Cədvəl 3, ssenari 13).



Şəkil 11. MATLAB paketində üçlaylı feedforward neyron şəbəkəsinin təlimi, sınağı və validasiyası

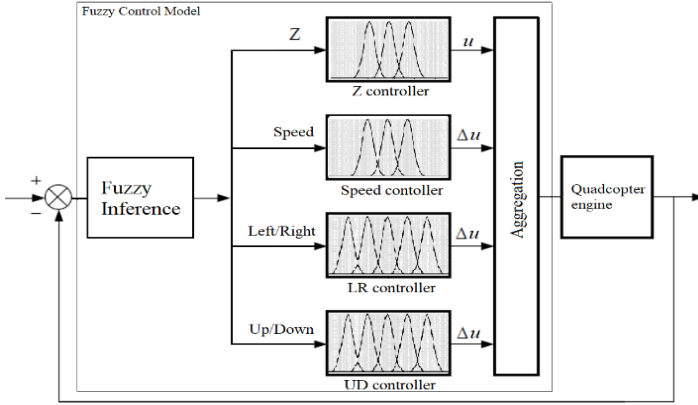
Feedforward neyron şəbəkəsi ilə generasiya olunan siqnallar

Sse-nari	Girişlər					Çıxışlar					
						FIS			Feedforward Neural Network		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3	z_1	z_2	z_3
1	0.433	0.291	0.628	0.076	0.961	0.350	0.055	-0.19	0.381	0.0638	-0.216
2	0.611	0.824	0.460	0.862	0.855	0.380	-0.19	0.000	0.372	-0.209	0.0435
3	0.374	0.622	0.139	0.750	0.702	0.337	-0.15	0.215	0.160	-0.101	0.1908
4	0.712	0.738	0.568	0.438	0.469	0.854	0.000	0.000	0.845	-0.033	0.0307
5	0.922	0.535	0.320	0.107	0.102	0.855	0.000	0.000	0.893	0.0019	-0.034
6	0.396	0.283	0.318	0.925	0.001	0.349	0.000	0.204	0.345	-0.013	0.1790
.....											
13	0.510	0.253	0.232	0.894	0.429	0.350	0.000	0.200	0.3598	-0.015	0.1699
14	0.333	0.292	0.856	0.275	0.762	0.131	0.386	0.000	0.1945	0.3646	-0.011
15	0.645	0.632	0.452	0.743	0.643	0.658	-0.10	0.103	0.6319	-0.092	0.2408
16	0.524	0.833	0.781	0.985	0.546	0.350	-0.20	0.000	0.3832	-0.090	0.1373
.....											
32	0.433	0.629	0.741	0.405	0.838	0.350	0.144	0.000	0.340	0.1108	-0.056
33	0.465	0.793	0.395	0.745	0.086	0.350	-0.20	0.000	0.183	-0.277	0.1751
34	0.065	0.004	0.789	0.553	0.318	0.013	0.411	0.000	0.005	0.4062	-0.085
35	0.026	0.245	0.480	0.651	0.787	0.014	0.000	-0.195	0.016	-0.008	-0.043

Şəkil 6-da göstərilən baxış sektorlarında maneələri dəf etmək üçün avtomatik maneələri təmin edən kvadrokopterin uçuş prosesi üçün qeyri-səlis idarəetmə sisteminin ümumi strukturu Şəkil 12-də təqdim olunur.

Qeyri-səlis idarəetmə sistemi dəyişənlərin hər biri üçün ümumi idarəetmə (u) və korreksiya əmsallarının (Δu) yaradan dörd ekvivalent qeyri-səlis tənzimləyicilərdən ibarətdir: ön üfüqi müstəvidə – Sol/Sağ, şaquli müstəvidə uçuş hündürlüyü boyunca – Yuxarı/Aşağı və PID-ə bənzər qanuna uyğun olaraq kvadrokopterin sürəti. Kvadrokopter mühərriklərinin hər biri üçün son idarəetmə hərəkətlərinin hesablanması nəzarətçinin çıxış siqnallarının qiymətlərini cəmləməklə

“Aqreqasiya” blokunda aparılır⁸.



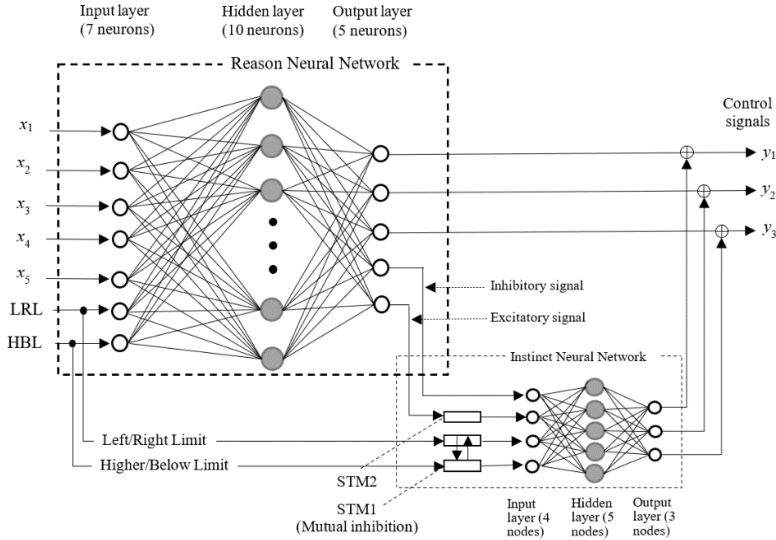
Şəkil 12. Kvadrokopterin uçuş prosesi üçün qeyri-səlis idarəetmə sistemi

Dördüncü fəsildə yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin avtonom manevrini təmin etmək üçün “ağıllı” və “instinktiv” iki alt şəbəkə daxil olmaqla strukturlaşdırılmış iyerarxik neyron şəbəkəli idarəetmə modelindən istifadə etmək təklif olunur⁹.

Şəkil 13-də çoxlaylı neyron şəbəkələrin iki növünü birləşdirən strukturlaşdırılmış iyerarxik neyron şəbəkəsi modeli təqdim edilir: “ağıllı” və “instinktiv” neyron şəbəkələr. Kvadrokopterin sensor siqnalları bilavasitə “ağıllı” neyron şəbəkəsinin giriş layına verilir, bu da giriş vektorunun müəyyən davranış modelinə uyğunluğunu yoxlayır və yalnız bundan sonra kvadrokopterin davranış modelini formalaşdırır. Belə bir kvadrokopter davranış modelinə misal olaraq: *“Sensor uçuş yolu boyunca hər hansı maneə aşkarlayana qədər istiqaməti, hündürlüyü və sürəti dəyişmədən irəliləmək”*.

⁸ Rzayev R.R., Habibbayli T.H., Aliyev M.E. The use of fuzzy controllers in automatic control systems for quadcopters. Springer series “Lecture Notes in Networks and Systems”, Vol. 822, pp. 59-74.

⁹ Abbasov A.M., Rzayev R.R., Habibbayli T.H. Structured neural network based quadcopter control under overland monitoring. The Springer Series “Lecture Notes in Networks and Systems”, 758, Vol. 1, pp. 577-585, 2023.



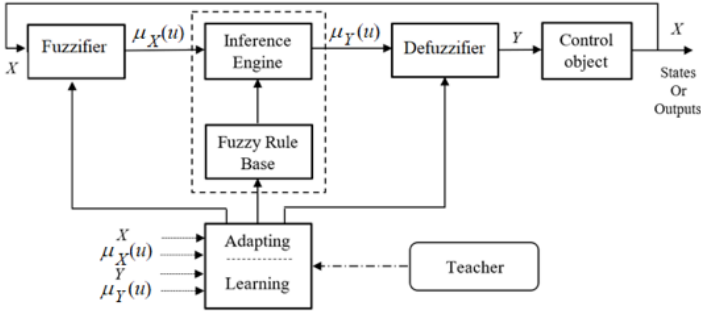
Şəkil 13. Kvadrokopterin neyroşəbəkəli idarəetmə modeli

İnstinktiv neyron şəbəkəsi sensor giriş və kvadrokopterin müəyyən manevr zamanı saxlamalı olduğu bir sıra davranış modellər arasındakı uyğunluğu müəyyən edir. İnstinktiv neyron şəbəkə tərəfindən verilən əmrə misal olaraq: “*Sensor maneələrin mövcudluğunu aşkar edərkən sağa və sola hərəkətlər dövrünü təkrarlamaq*”. Kvadrokopter addımbaşı hərəkətləri ardıcıl olaraq yerinə yetirməlidir, buna görə də dağlıq və meşəlik landşaftların çətin manevr edilən ərazilərində yerüstü monitorinqi şəraitində kvadrokopterin idarə edilməsi üçün neyron şəbəkədən istifadə edərkən instinktiv şəbəkənin funksiyası vacibdir.

Bu fəsilə kvadrokopterlər kimi zəif formalizə olunan texniki obyektlər üçün hibrid idarəetmə sistemlərinin layihələndirilməsi üsulları müzakirə olunur. Şəkil 14-də qeyri-səlis məntiq idarəetməsinin əsas konfigurasiyası təqdim edilir ki, bu da üç əsas komponentdən ibarətdir: fəzafikator, qeyri-səlis qayda bazası və nəticə çıxarma mexanizmi, defəzafikator.

Qeyri-səlis modelin tələb olunan adekvatlıq dərəcəsinə nail olmaq üçün əsas vəzifə uyğun giriş və çıxış mənsubiyyət funksiyalarını identifikasiya etmək və qeyri-səlis linqvistik məntiqi qaydaların

optimal toplusunu seçməkdir. Qeyri-səlis modelə öyrənmə qabiliyyətinin mənimsədilməsi onun elementlərini və funksiyalarını paylanmış öyrənmə imkanlarına malik çoxlaylı konneksionist neyron şəbəkə¹⁰ strukturuna inteqrasiya etməklə əldə edilə bilər. Linqvistik qaydalara və ya qeyri-səlis çıxarış sisteminə əsaslanan çox girişli və



Şəkil 14. Qeyri-səlis kontrollerin ümumi modeli

bir çıxışlı qeyri-səlis modeli realizə edən konneksionist neyron şəbəkəsinin iyerarxik strukturu Şəkil 15-də təqdim edilir.

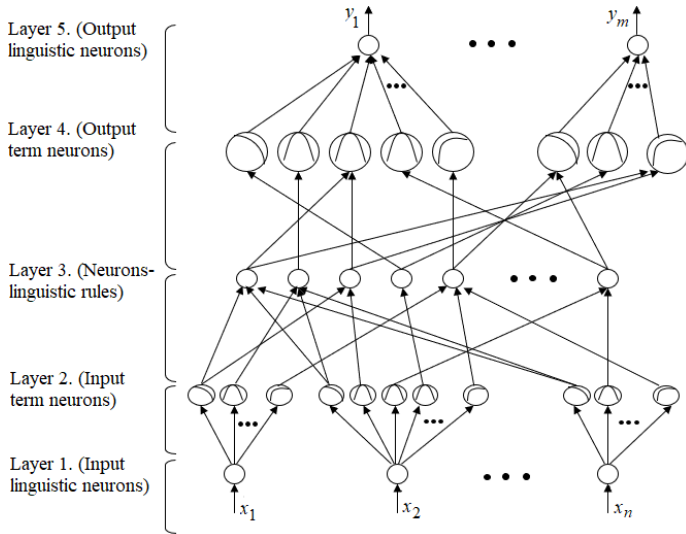
MATLAB\ANFIS redaktorundan istifadə etməklə kvadrokopterin trayektoriya idarə edilməsinin simulyasiyaları nümunəsindən istifadə edərək, hibrid (neuro-qeyri-səlis) kontrollerlərin mövcud strukturları, onların konstruksiyasının xüsusiyyətlərinin başa düşülməsi və praktiki istifadəsi ilə bağlı analitik məlumatlar əldə edilmişdir¹¹.

Baxılan məsələdə kvadrokopterin uçuş trayektoriyasının formalaşması üçün 35 mümkün ssenari haqqında “xarici biliklər” informasiya modeli təqdim olunur (Cədvəl 3-ə bax). Onda F çevirməsi üç ANFIS modelini birləşdirən strukturlaşdırılmış sistem tərəfindən

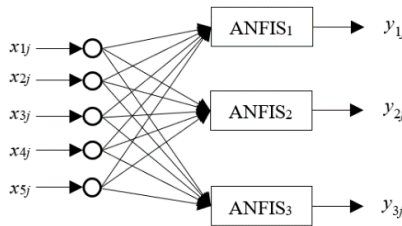
¹⁰ Lin C.T., George Lee C.S. Supervised and unsupervised learning with fuzzy similarity for neural network-based fuzzy logic control systems // Fuzzy sets, Neural Networks, and Soft Computing. Edited by R.R. Yager and L.A. Zadeh. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994, pp. 85-125.

¹¹ Abbasov A.M., Rzayev R.R., Habibbayli T.H. Formation of the flight path of a quadcopter under overland monitoring by the hybrid modeling system. Proceedings of the 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), Baku, Azerbaijan, 2023, pp. 1-4.

təxmin edilə bilər (Şəkil 16-ya bax). Burada bir çox çıxışı olan bir sistem bir çıxışı olan bir neçə müstəqil sistemlər qrupu ilə əvəz olunur.



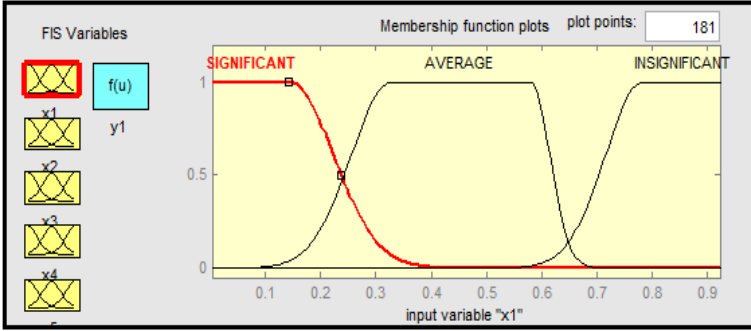
Şəkil 15. Beş laylı neyron şəbəkəsinin məntiqi bazasında qeyri-səlis model



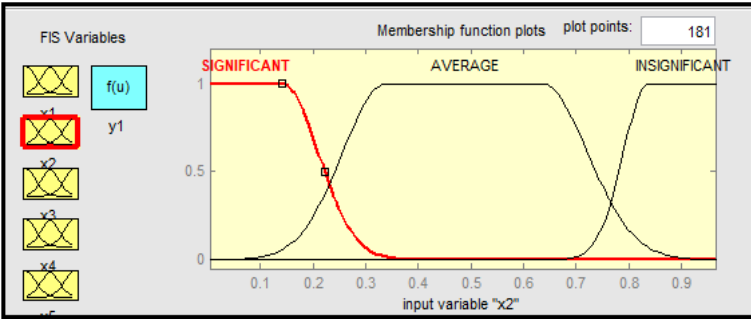
Şəkil 16. ANFIS əsasında strukturlaşdırılmış modelləşdirmə sistemi

35 davranış modelindən ibarət öyrətmə toplusuna əsaslanan struktur və parametrik optimallaşdırma nəticəsində hər bir ANFIS_k (k=1÷3) optimal sayda linqvistik qaydaları generasiya və linqvistik dəyişənlərin termlərini təsvir edən müvafiq qeyri-səlis çoxluqların bərpasını həyata keçirən Qauss tipli “bell-type” mənsubiyyət funksiyalarını identifikasiya edir. Məsələn, ANFIS₁ modeli 243 implikasiya qaydaları və mənsubiyyət funksiyalarını identifikasiya edib (Şəkil 17, Şəkil 18, Şəkil 19, Şəkil 20 və Şəkil 21-ə bax).

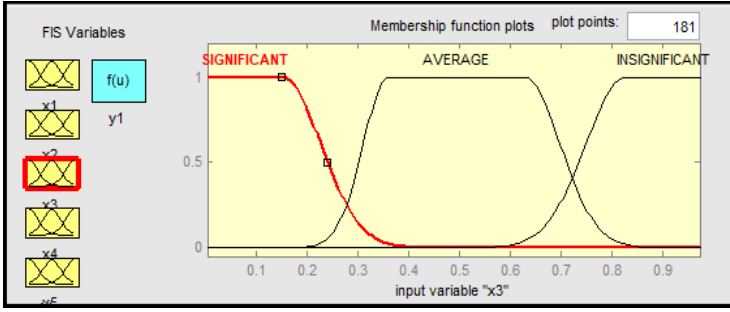
ANFIS₁ tərəfindən generasiya edilmiş qeyri-səlis çıxarış sisteminin qaydalarına baxmaq üçün Şəkil 22-də qrafik funksional interfeys təqdim edilir. Bu şəkildən aydın olur ki, kvadrokopterin ön görünüşünün beş sektorunda maneələrin mövcudluğunu xarakterizə edən (0.524, 0.833, 0.781, 0.985, 0.546) giriş üçün öyrədilmiş ANFIS₁ arzulanan 0.35 çıxış signalını generasiya edir. Proqram simulyasiyasının analogi nəticələri ANFIS₂ və ANFIS₃ interaktiv funksional pəncərələrindən istifadə etməklə əldə edilmişdir.



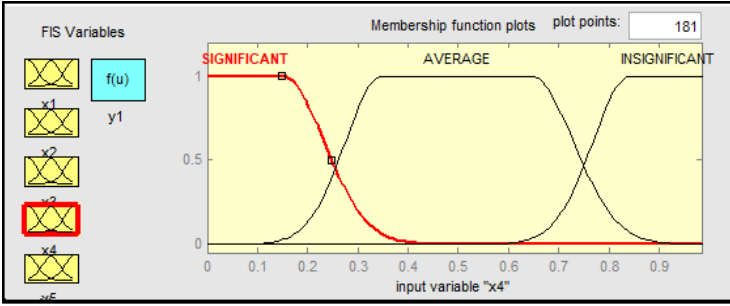
Şəkil 17. “Front” giriş linqvistik dəyişəninin termlərini təsvir edən qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları



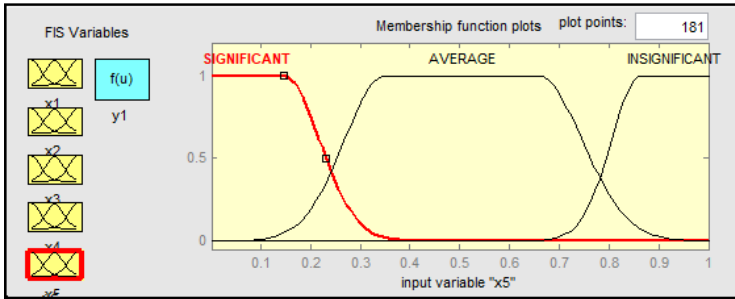
Şəkil 18. “Left” giriş linqvistik dəyişəninin termlərini təsvir edən qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları



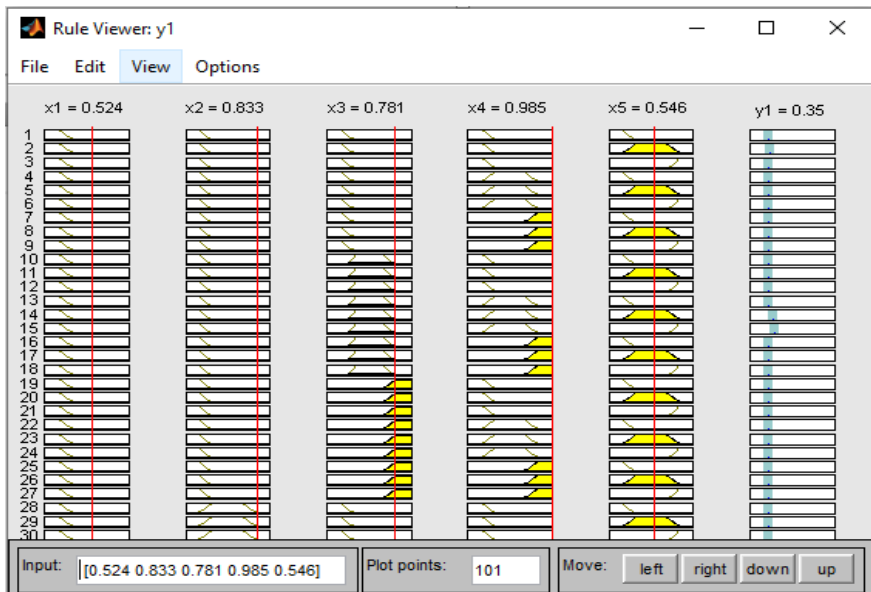
Şəkil 19. “Right” giriş linqvistik dəyişəninin termlərini təsvir edən qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları



Şəkil 20. “Higher” giriş linqvistik dəyişəninin termlərini təsvir edən qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları



Şəkil 21. “Below” giriş linqvistik dəyişəninin termlərini təsvir edən qeyri-səlis çoxluqların mənsubiyyət funksiyaları



Şəkil 22. ANFIS₁-dən istifadə etməklə əldə edilmiş nəticələrə baxmaq üçün interaktiv funksional pəncərə

Nəticədə, ANFIS əsaslı strukturlaşdırılmış model $x^{16} = (0.524, 0.833, 0.781, 0.985, 0.546)$ giriş siqnalı üçün $y^{16} = (0.350, -0.200, 0.000)$ arzu olunan çıxışı əldə edir. Yürüstü monitoring zamanı kvadrokopter davranışının bütün digər ssenariləri üçün də oxşar nəticələr əldə edilmişdir.

DİSSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

Dissertasiya mövzusu üzrə aparılan araşdırmalar əsasında müdafiəyə təqdim edilən əsas elmi nəticələr aşağıdakı müddəalar şəklində tərtib edilib:

- MATLAB proqram mühitində obyekt yönümlü sistem modelləşdirmə vasitələrindən istifadə etməklə kvadrokopter prototipinin yaradılması üçün çoxmərhləli prosedur konsepsiyası.
- Qeyri-səlis çıxarış sisteminin istifadəsi əsasında stasionar maneələrlə yürüstü monitoring şəraitində məkan qlobal marşrutun işlənməsi üçün sürətli alqoritm.

- Mürəkkəb mühitdə maneələri dəf etmək üçün sürətli manevr alqoritmi və üçlaylı feedforward neyron şəbəkəsinin istifadəsinə əsaslanan kvadrokopter üçün marşrut izləmə alqoritmi.
- “Ağıllı” və “instinktiv” neyron altşəbəkələrindən ibarət konneksionist iyerarxik strukturlaşdırılmış neyron şəbəkəsi modelinin istifadəsini nəzərdə tutan çoxrejimli sabitləşdirmə alqoritminə əsaslanan kvadrokopterin hərəkəti ilə idarəetmə sistemi.
- Mürəkkəb mühitdə maneələri dəf etmək üçün sürətli manevr alqoritmi və intellektual hibrid (neyro-qeyri-səlis) adaptiv kontrollerlərin istifadəsinə əsaslanan yerüstü monitoring şəraitində marşrut izləmə alqoritmi.

Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı elmi işlərdə dərc edilmişdir:

1. Habibbayli T.H. Regulation of quadcopter autopiloting during overland monitoring using a fuzzy inference system. Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2022) 24-26 August 2022, Baku, Azerbaijan. Vol. 1, pp. 207-209.
2. Habibbayli T.H. Formation of the quadcopter flight path under overland monitoring using neuro-fuzzy modeling methods. Mathematical Machines and Systems, Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of National Academy of Ukraine, Kyiv, 2022, №3, pp. 97-107.
3. Габиббейли Т.Г. Об одном подходе к вопросу регламентации поведения квадрокоптера при наземном мониторинге. Доклады Национальной Академии Наук Азербайджана, Том LXXVIII, № 3-4, стр. 39-50, 2022.
4. Habibbayli T.H., Aliyev M.E. Fuzzy inference-based quadcopter flight regulation under overland monitoring .The Springer Series “Lecture Notes in Networks and Systems”, Vol. 610, pp. 372-381, 2023. (Web of Science, Scopus)
5. Аббасов А.М., Рзаев Р.Р., Ахмедов И.М., Алмасов А.Ш., Габиббейли Т.Г. Управление квадрокоптером в условиях

наземного мониторинга с применением нейро-сетевых и нечётких методов моделирования. Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2023, том 18, выпуск 1, 47-62.

6. Abbasov A.M., Rzayev R.R., Habibbayli T.H. Structured neural network based quadcopter control under overland monitoring. The Springer Series "Lecture Notes in Networks and Systems", 758, Vol. 1, pp. 577-585, 2023. (Web of Science, Scopus)
7. Rzayev R.R., Habibbayli T.H., Aliyev M.E. The use of fuzzy controllers in automatic control systems for quadcopters. The Springer series "Lecture Notes in Networks and Systems", Vol. 822, pp. 59-74. (Web of Science, Scopus)
8. Abbasov A.M., Rzayev R.R., Habibbayli T.H. Formation of the flight path of a quadcopter under overland monitoring by the hybrid modeling system. Proceedings of the 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), Baku, Azerbaijan, 2023, pp. 1-4. (Web of Science, Scopus)

Həmmüəlliflərlə dərc olunmuş işlərdə iddiaçının şəxsi rolu:

- [4] Yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin uçuş trayektoriyasının formalaşmasına dair alqoritmin qurulması üçün qeyri-səlis çıxarış sisteminin adaptasiyası və işlənməsi.
- [5] Yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin uçuş trayektoriyasının formalaşmasına dair alqoritmin qurulması üçün neyroşəbəkəli modelin işlənməsi.
- [6] Yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin uçuş trayektoriyasının formalaşmasına dair alqoritmin qurulması üçün iki altşəbəkələrdən ibarət olan iyerarxik konneksionist neyron şəbəkəsinin qurulması və əsaslandırılması.
- [7] Yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin uçuşunu təmin edən qeyri-səlis kontrollerin işlənməsi.
- [8] Yerüstü monitoring şəraitində kvadrokopterin uçuşunu təmin edən hibrid (neyro-qeyri-səlis) kontrollerin işlənməsi.

Dissertasiyanın müdafiəsi 3 may 2024-cü il tarixində saat 14⁰⁰-da Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun nəzdindəki ED 1.35 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az1141, Bakı şəhəri, B.Vahabzadə küçəsi, 9A.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin İnformasiya Texnologiyaları İnstitutunun rəsmi internet saytında (www.ict.az) yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 29.03.2024-cü il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 28.03.2024

Kağızın formatı: 60x84 ^{1/16}

Həcm: 37470 (işarə)

Tiraj: 100