

უპილოტო საფრენი აპარატების ხელოვნური ინტელექტის როლი გარემოსდაცვითი და აგრარული მონაცემების შეგროვებასა და ანალიზში

გიორგი თაყაძე

ალტე უნივერსიტეტი, უნივერსიტეტის ქუჩა N2, თბილისი 0177, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომი ეძღვნება უპილოტო საჰაერო სისტემების დინამიკურ განვითარებას და მათ ტრანსფორმაციას სამხედრო ტექნოლოგიიდან მრავალფუნქციურ სამოქალაქო და სამეცნიერო ინსტრუმენტად. ხაზგასმულია ამ სფეროს ინტერდისციპლინური ფუნქციები, რომელიც მექანიკის, ელექტრონიკისა და პროგრამირების სინთეზს ეფუძნება. განხილულია დრონების გამოყენების ფართო სპექტრი, გარემოს მონიტორინგიდან და ლოგისტიკიდან პრეციზიულ სოფლის მეურნეობამდე. ნაშრომში ასევე აღწერილია დრონის ტექნიკური სტრუქტურა, მათ შორის კონტროლერისა და თანამედროვე სენსორული სისტემების (GPS, კამერები, ინერციული ერთეულები) კოორდინირებული მუშაობა. ნაჩვენებია, რომ ეს კომპონენტები დრონს აქცევს არა უბრალოდ მფრინავ აპარატად, არამედ კომპლექსურ ინტელექტუალურ პლატფორმად, რომელსაც მონაცემების რეალურ დროში შეგროვება, დამუშავება და ანალიზი შეუძლია.

საკვანძო სიტყვები: უპილოტო საჰაერო სისტემა (UAS), გეორეგერენცირებული რუკები (GIS), მულტისპექტრული ანალიზი / NDVI, ხელოვნური ინტელექტი (AI)

შესავალი

ბოლო ათწლეულში უპილოტო საჰაერო სისტემებმა (UAS) მნიშვნელოვანი ტრანსფორმაცია განიცადა. სამხედრო დანიშნულების ტექნოლოგიიდან ისინი ჩამოყალიბდა, როგორც მრავალფუნქციური სამოქალაქო, სამეცნიერო და ინდუსტრიული ინსტრუმენტები. თანამედროვე საინჟინრო და მონაცემთა მეცნიერული პრაქტიკები მათ აქცევს პლატფორმებად, რომლებიც აერთიანებს აეროდინამიკას, სენსორულ სისტემებს, ალგორითმულ მართვასა და ხელოვნურ ინტელექტს (AI). ამ ტექნოლოგიების სინთეზი განაპირობებს დრონების უნარს, მაღალი სიზუსტით შეაგროვონ, დაამუშაონ და გაანალიზონ გარემოსდაცვითი და აგრარული მონაცემები, რაც ამარტივებს რთულ სამეცნიერო და პრაქტიკულ ამოცანებს.

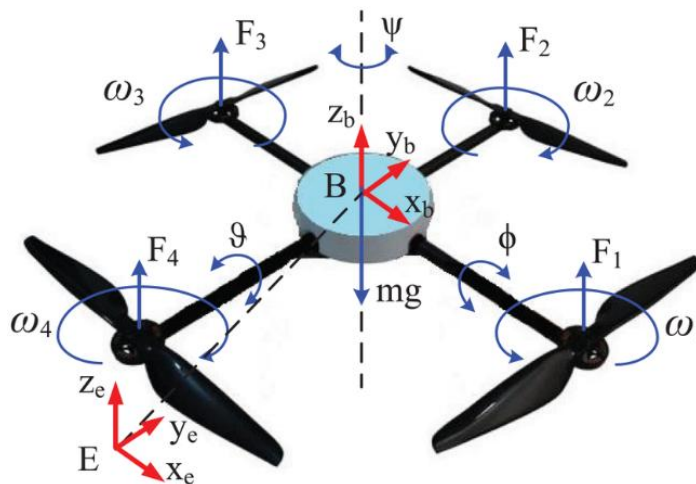
დრონების მექანიკური სტრუქტურა და ფრენის პრინციპები ეფუძნება ფიზიკისა და აეროდინამიკის კანონებს, ხოლო ფრენის კონტროლი ხორციელდება ინტელექტუალური ალგორითმებით, როგორიცაა PID რეგულაცია, რომელიც სისტემას სტაბილურობასა და ზუსტ მანევრირებას უზრუნველყოფს. თანამედროვე სენსორების GNSS, RTK/PPK მოდულების, ოპტიკური და მულტისპექტრული კამერების — გამოყენება საშუალებას იძლევა შეიქმნას

გეორეფერენცირებული გამოსახულებები და ორთომოზაიკალური რუკები, რაც გარემოს სივრცით ანალიზს ახალ ხარისხობრივ დონეზე აყენებს.

მონაცემთა მოცულობასთან ერთად იზრდება მათი ინტერპრეტაციის სირთულეც, რაც ზრდის AI-მოდელების მნიშვნელობას. ნეირონულ ქსელებზე დაფუძნებული ანალიტიკა უზრუნველყოფს სოფლის მეურნეობაში მცენარეთა ჯანმრთელობის ავტომატურ შეფასებას, სტრესის ზონების გამოვლენას და მოსავლიანობის პროგნოზირებას, ხოლო გარემოს კვლევაში ეკოსისტემური ცვლილებების დროულ მონიტორინგს.

ძირითადი ნაწილი

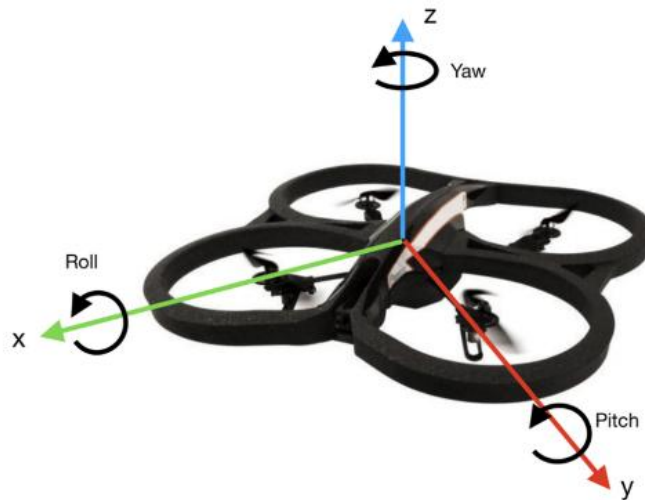
დრონის ფრენა ეფუძნება აეროდინამიკისა და ფიზიკის კანონებს, რომლებიც განსაზღვრავენ, როგორ იქმნება ამწევი ძალა, როგორ მოძრაობს ჰაერი საჰაერო ხრახნის ირგვლივ და როგორ ინარჩუნებს სისტემა სტაბილურობას. მიუხედავად იმისა, რომ დრონი პატარა მოწყობილობაა, ის იმავე პრინციპებით დაფრინავს, რითაც თვითმფრინავი ან ვერტმფრენი. იქნება ამწევი ძალა (Lift), რომელიც გადააჭარბებს სიმძიმის ძალას და შეინარჩუნებს ბალანსს. ბერნულის პრინციპის მიხედვით, რაც უფრო სწრაფად მიედინება ჰაერი, მით უფრო დაბალია წნევა. ხრახნები ისეა ფორმირებული, რომ მის ზემოთ ჰაერი სწრაფად გადის, ხოლო მის ქვემოთ კი ნელა, რის შედეგადაც იქმნება წნევის სხვაობა და ამწევი ძალა რითაც დრონი იწევა ზემოთ.



სურ. 1 კვადროკოპტერის სქემა

ფრენის სტაბილურობა მიიღწევა კვადროკოპტერის პროპელერის ბალანსით (სურ. 1): ორი ბრუნავს საათის ისრის მიმართულებით, ორი — საწინააღმდეგოდ, რათა ტორკის ეფექტი გაუქმდეს (ტორკის ეფექტი ჩნდება მაშინ, როდესაც ძრავის მბრუნებელი მოქმედება წარმოქმნის მექანიკურ მომენტს, რომელიც აპარატში იწვევს საპირისპირო მიმართულებით თვითბრუნვას და საჭიროებს კომპენსაციას სტაბილური ფრენის უზრუნველსაყოფად). თითოეული ხრახნის სიჩქარის მცირე

ცვლილება განსაზღვრავს მოძრაობის მიმართულებას: წინ, უკან, გვერდით ან ღერძის გარშემო ბრუნვას. მთელი პროცესი იმართება ფრენის კონტროლერის მიერ, რომელიც წამში ასეულობით სიგნალს ამუშავებს გიროსკოპიდან, აქსელერომეტრიდან და ბარომეტრიდან [1]. ის მუდმივად ასწორებს ძრავების ბრუნვას, რათა დრონმა შეინარჩუნოს პოზიცია ქარში ან ტურბულენტურ გარემოში. ამაში ეხმარება PID ალგორითმი (Proportional–Integral–Derivative) — მექანიზმი, რომელიც ადარებს სასურველ პოზიციას რეალურ მონაცემებს და ასწორებს შეცდომას წამიერად. შედეგად, დრონის ფრენა არის ფიზიკის, მექანიკისა და ალგორითმების ერთობლივი მოქმედება. ჰაერის ნაკადის დინამიკა ქმნის ამწევ ძალას, სინქრონიზებული ძრავები უზრუნველყოფენ ბალანსს, ხოლო PID კონტროლი არის ალგორითმი, რომელიც მექანიკური ან ელექტრონული სისტემის სტაბილურობისა და სიზუსტის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. ის მუდმივად ადარებს სასურველ მდგომარეობას რეალურ მონაცემებს და ასწორებს გადახრას სამი მდგენელის მეშვეობით - PID კონტროლი ინარჩუნებს სტაბილურობას. სწორედ ამ ელემენტების სინთეზი აქცევს დრონს ზუსტ, მოქნილ და ინტელექტუალურად მართულ მფრინავ სისტემად.



სურ. 2 ბალანსის და კორექციის მექანიზმები PID სისტემაში

დრონების ფრენის მექანიკა, რომელიც ბერნულის პრინციპზე, ჰაერის ნაკადზე და PID კონტროლზეა დაფუძნებული, მხოლოდ საწყისი საფეხურია იმ კომპლექსური სისტემისა, რაც მათ ზუსტ სამეცნიერო ინსტრუმენტებად აქცევს (სურ. 2) [2]. თანამედროვე დრონები აღარ გამოიყენება მხოლოდ აერო გადაღებისთვის, ისინი აგროვებენ და ამუშავებენ სივრცულ მონაცემებს, ქმნიან ზუსტ გეოგრაფიულ რუკებს და რეალურ სამყაროს გარდაქმნიან ანალიტიკურ მოდელად. დრონის მიერ გადაღებული თითოეული ფოტო ხდება georeferenced გამოსახულება, (Georeferenced არის მონაცემი ან გამოსახულება, რომელსაც ზუსტად მიეკუთვნება მისი გეოგრაფიული მდებარეობა - სურ. 3) სადაც ყოველი პიქსელი დაკავშირებულია გრძედთან, განედთან და სიმაღლესთან. ამისთვის გამოიყენება GNSS, RTK და PPK პოზიციონირების სისტემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ სანტიმეტრიან სიზუსტესაც კი. შედეგად, ვიზუალური გამოსახულება გარდაიქმნება ზუსტ სივრცულ

მონაცემად. მიღებული მასალა სტრუქტურირდება და ინახება მეტამონაცემებთან ერთად. გადაღების დრო, სენსორის პარამეტრები, სიმაღლე და სხვა დეტალები. ამ მონაცემებზე დაფუძნებით იქმნება ორთომოზაიკალური რუკები, სადაც ასობით ფოტო ზუსტად გადაეფარება ერთმანეთს, რაც შესაძლებელს ხდის გარემოს აღწერას სანტიმეტრიან სიზუსტით [3]. სოფლის მეურნეობაში ეს მეთოდი გამოიყენება მოსავლიანობის შეფასებისთვის, მცენარეთა სტრესის ან დაავადების ამოსაცნობად, ხოლო გარემოს კვლევაში გეომორფოლოგიური ცვლილებების მონიტორინგისთვის.

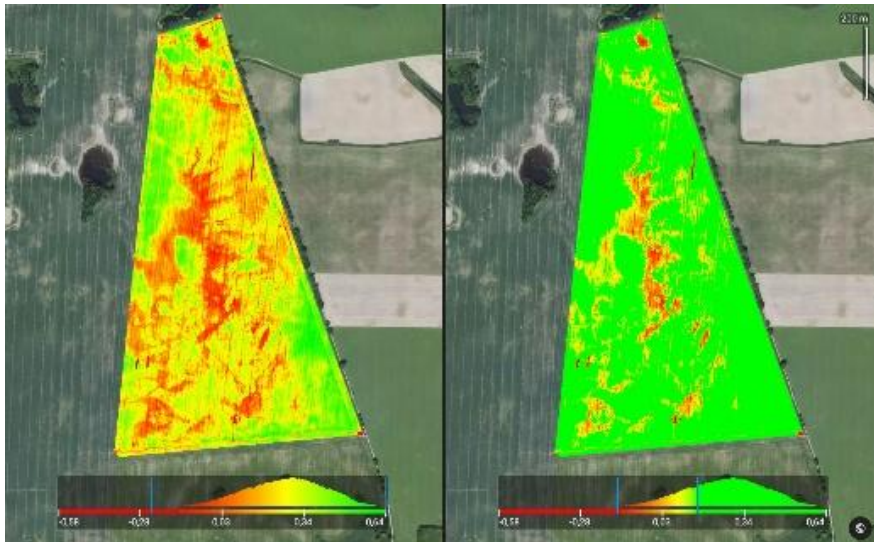


სურ. 3 გეორეფერენცირებული გამოსახულების შექმნის პროცესი

მულტისპექტრული კამერებით მიღებული ინფორმაცია საშუალებას იძლევა გამოითვალოს NDVI ინდექსი (NDVI ინდექსი არის მცენარეების ჯანმრთელობის მაჩვენებელი, რომელიც გამოითვლება წითელი და ახლო ინფრაწითელი სინათლის ანარეკლის შედარებით), რომელიც ასახავს მცენარეთა ჯანმრთელობის მდგომარეობას. მონაცემთა მოცულობის ზრდასთან ერთად, მნიშვნელოვანი ხდება მათი შენახვა და გაზიარება [2]. მცირე პროექტებში გამოიყენება ლოკალური სერვერები, ხოლო მასშტაბურებში — ღრუბლოვანი პლატფორმები, როგორიცაა Google Earth Engine, Pix4D Cloud ან ArcGIS Online. ეს პლატფორმები უზრუნველყოფს უსაფრთხო შენახვას, ავტომატურ დამუშავებას და ერთიან წვდომას მრავალ რეგიონში.

ამრიგად, დრონი არის სისტემათა სინთეზი — მექანიკის, ფიზიკის, პროგრამირების და მონაცემთა მეცნიერების [4]. ის იწყებს ფრენას ფიზიკური პრინციპებით და ასრულებს მონაცემთა გარდაქმნით ცოდნად — ქმნის ერთიან ჯაჭვს, რომელიც აერთიანებს ელექტრონულ კომპონენტებს, ხელოვნურ ინტელექტს (AI) და GIS-ს თანამედროვე მეცნიერების სერვისში. ხელოვნური ინტელექტი (AI) ხშირად აღიქმება როგორც „გონიერი“ ან თვითშემეცნებითი სისტემა, თუმცა სინამდვილეში ის მხოლოდ გამოთვლითი ინსტრუმენტია, ალგორითმების ერთობლიობა, რომელიც ადამიანის ინტელექტის გარკვეულ მახასიათებლებს იმიტირებს, მაგრამ არ ფიქრობს, არ აქვს მიზნები და არ იღებს გადაწყვეტილებებს ემოციების ან ნებელობის საფუძველზე [5]. მისი დანიშნულება არის ინფორმაციის დამუშავება, კავშირის პოვნა მონაცემებს შორის და კონკრეტული ამოცანის შესრულება ისე, როგორც ამას ადამიანი გააკეთებდა, მაგრამ გაცილებით სწრაფად და ობიექტურად. AI-ის

სტრუქტურა იერარქიულია: ყველაზე ფართო ცნებაა თავად ხელოვნური ინტელექტი, მის ქვედა დონეს წარმოადგენს მანქანური სწავლება (Machine Learning), ხოლო ყველაზე ღრმა დონე — ღრმა ნეირონული ქსელები (Deep Learning). ყველა Deep Learning მოდელი არის Machine Learning-ის ნაწილი, ხოლო ყველა Machine Learning არის AI-ის მაგალითი, მაგრამ არა ყველა AI წარმოადგენს Machine Learning-ს [6]. მაგალითად, თუ დრონი უბრალოდ იღებს ტენიანობის მაჩვენებელს და ალგორითმის მიხედვით ასრულებს მოქმედებას, ეს უკვე AI-ის მაგალითია. თუ დრონი სწავლობს წარსულ მონაცემებზე დაყრდნობით და პროგნოზირებს მოსავალს, ეს Machine Learning-ის შემთხვევაა, ხოლო თუ ის იყენებს ნეირონულ ქსელს სურათების ანალიზისთვის, ეს უკვე Deep Learning-ის დარგია, ხელოვნური ინტელექტის სწავლების პროცესი იწყება მონაცემთა შეგროვებით და მათი სწორად ანოტირებით, ანუ თითოეულ მონაცემზე ხელით მონიშვნით, რა არის გამოსახული და რა მნიშვნელობა აქვს მას. ამის შემდეგ მოდელი გადის ტრენინგის ეტაპს, სადაც ის სწავლობს შაბლონებსა და კანონზომიერებებს ამ მონაცემებში. პროცესის მსვლელობისას მონაცემთა ნაწილი გამოიყენება ვალიდაციისთვის რათა შეფასდეს, რამდენად სწორად სწავლობს მოდელი, ხოლო ბოლოს ტესტირების ნაკრები ამოწმებს მის რეალურ უნარს ახალი, არასდროს ნანახი მონაცემების გაანალიზებისას.



სურ. 4 მულტისპექტრული მონაცემების AI-ანალიზი აგრაარული მონიტორინგისთვის

ამგვარად, AI არ ქმნის ცოდნას თავად, ის მხოლოდ აღმოაჩენს მათემატიკურ კავშირებს და აფორმებს მათ გადაწყვეტილებად. სოფლის მეურნეობაში ხელოვნური ინტელექტი უკვე გახდა შეუცვლელი ინსტრუმენტი. დრონებით მიღებული გამოსახულებები, როდესაც დამუშავებულია AI მოდელებით, საშუალებას იძლევა ავტომატურად ამოიცნოს მცენარეთა დაავადებები, განასხვავოს სარეველა კულტურებისგან და შეაფასოს მოსავლის რაოდენობა ან ხარისხი. ამ სისტემებს შეუძლიათ იპოვონ მცირედი ფერის ან ტექსტურის ცვლილებები, რომლებიც ადამიანის თვალისთვის

შეუმჩნეველია და დროულად გააფრთხილონ ფერმერი პრობლემურ ზონებზე (სურ. 4) [7]. გარემოს კვლევაში AI-ს გამოყენება ფართო მასშტაბს აღწევს, ის ეხმარება მეცნიერებს მიწის ეროზიის პროცესების პროგნოზირებაში, ტენიანობის დინამიკის ანალიზში და ბიომრავალფეროვნების ავტომატურ მონიტორინგში. დროზე დამონტაჟებული კამერები და სენსორები აგროვებენ მონაცემებს, ხოლო ნეირონული მოდელები სწავლობენ გარემოს პათერნებს, რათა დროულად გამოავლინონ ცვლილებები, იქნება ეს ტყის დეგრადაცია, ტბის წყლის დონის ვარდნა თუ მცენარეული საფარის ცვლილება [8]. ამრიგად, ხელოვნური ინტელექტი რეალურად წარმოადგენს ადამიანის ინტელექტის ციფრულ გამეორებას, არა ფიქრს, არამედ გამოთვლით და სტატისტიკურ მოდელირებას. მისი ძალა იმაში მდგომარეობს, რომ შეუძლია მონაცემების დანახვა იმგვარად, როგორც ადამიანი ვერ ხედავს, და სწორედ ამით ცვლის მეცნიერების, სოფლის მეურნეობისა და გარემოს დაცვის ტრადიციულ მიდგომებს უფრო ზუსტ, ოპერატიულ და პროგნოზირებად სისტემებად.

დასკვნა

დრონები დღეს მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ თანამედროვე მონაცემთა მეცნიერებაში, ისინი აკავშირებენ ფიზიკურ გარემოსა და ციფრულ ანალიტიკას. ყოველი ფრენა იქცევა მონაცემთა შეგროვების პროცესად, სადაც სენსორებით მიღებული ინფორმაცია გადაიქცევა ზუსტ გეოგრაფიულ და ანალიტიკურ მოდელად. დრონების ეფექტიანობა სწორედ ინტეგრირებულ მიდგომაშია, **hardware**, **AI** და **GIS** ერთიან სისტემად მუშაობს. ტექნიკური ნაწილი უზრუნველყოფს სიზუსტეს, ხელოვნური ინტელექტი ამუშავებს მონაცემებს, ხოლო GIS აძლევს მათ სივრცით მნიშვნელობას. ეს აერთიანებს ინჟინერიას, მონაცემთა მეცნიერებასა და გარემოს კვლევას ერთ ტექნოლოგიურ ჩარჩოში. მომავლის ტენდენციებია ავტონომიური და დრონების სისტემები სადაც არის მრავალი დრონის ერთობლივი ქსელი სადაც აპარატები კოორდინირებულად მუშაობენ როგორც ერთი მთლიანობა, რომლებიც დამოუკიდებლად აგროვებენ და ამუშავებენ მონაცემს, რეალურ დროში იღებენ გადაწყვეტილებებს და ერთმანეთთან კოორდინირებულად მოქმედებენ.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Höfer, R. et al. „Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies and Challenges“. *Drones (MDPI)*, 8(11), 686 (2024). [MDPI+1](#)
2. Raihan, A., Tuspekova, M. “A Systematic Review of Geographic Information Systems (GIS) in Agriculture for Evidence-Based Decision Making and Sustainability”. *Global Sustainability Research*, Vol. 3 No. 1, Jan 2024. [ResearchGate](#)
3. “Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis”. *Science of The Total Environment*, 2022. [ScienceDirect](#)
4. Skripka, K. et al. “Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture”. *Drones (MDPI)*, 8(11), 664 (2024). [MDPI+1](#)
5. Giordano, F., Gatto, A. “A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture”. *Information*, 10(11), 349 (2019). [MDPI+1](#)

6. Uzunović, A. et al. “Artificial Intelligence and its Applications in Agriculture: A Review.” *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, (2024) (or similar). [ResearchGate+1](#)
7. “Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture”. *Environmental & Sustainability Journal*, (2025) — covers multispectral/hyperspectral sensors, drones, AI. [link.springer.com](#)
8. Pal, O. K., Hossain Shovon, M. S., Mridha, M. F., Shin, J. “A Comprehensive Review of AI-enabled Unmanned Aerial Vehicle: Trends, Vision, and Challenges.” arXiv pre-print, Oct 2023.

The Role of Artificial Intelligence in Unmanned Aerial Vehicles for the Collection and Analysis of Environmental and Agricultural Data

Giorgi Takadze

Alte University, University Street N2, Tbilisi 0177, Georgia

Abstract: *This paper examines the dynamic development of Unmanned Aerial Systems (UAS) and their transformation from military-oriented technologies into multifunctional civilian and scientific instruments. The study highlights the interdisciplinary nature of the field, which relies on the integration of mechanics, electronics, and software engineering. A broad spectrum of drone applications is discussed—from environmental monitoring and logistics to precision agriculture. The paper also outlines the technical architecture of drones, including the coordinated operation of flight controllers and modern sensor systems such as GPS modules, cameras, and inertial measurement units. It is demonstrated that these components transform a drone from a simple flying device into a complex intelligent platform capable of collecting, processing, and analyzing data in real time.*

Keywords: *Unmanned aerial system (UAS), georeferenced mapping (GIS), multispectral analysis / NDVI, artificial intelligence (AI).*