

Nagypontosságú helymeghatározás terepi mérések automatizálásához

High-precision positioning for automating outdoor measurements

MAKÁR Péter Ákos ¹, KOCSIS Gergely ²

^{1,2} Debreceni Egyetem, Informatikai Kar,
Informatikai Rendszerek és Hálózatok Tanszék,
4028 Debrecen, Kassai út 26,
makar.peter98@gmail.com, kocsis.gergely@inf.unideb.hu

Abstract

This paper presents a GPS measurement system using a u-blox GNSS receiver connected to a Raspberry Pi 5. A custom algorithm based on repeated measurements achieved 2–3 cm accuracy under optimal conditions. The system provides real-time tracking, data visualization, and measurement data storage. Application of the improved high-precision positioning system is presented with an autonomous rover, built to ease on-site measurements.

Keywords: GPS, RTK, High precision positioning, Centipede, autonomous rover

Kivonat

A dolgozat egy Raspberry Pi 5-re épülő GPS mérési és vizualizációs rendszert mutat be. A u-blox GNSS vevő és egy saját mérési algoritmus optimális körülmények között 2–3 cm-es pontosságot ért el. A rendszer valós idejű követést, adatmentést és vizualizációt biztosít. A kifejlesztett nagypontosságú helymeghatározó rendszer alkalmazásaként egy autonóm rover kerül bemutatásra, mely célja a terepi mérések elvégzésének megkönnyítése.

Kulcsszavak: GPS, RTK, Nagypontosságú helymeghatározás, Centipede, autonóm rover

1. BEVEZETÉS

Jelenlegi formájában az RTK technológia, bár technikailag kiforrottnak tekinthető, még nem alkalmas alacsony költségű otthoni felhasználásra, ezért elsősorban a precíziós mezőgazdaságban terjedt el [1]. A korrekciós adatok szélesebb körű hozzáférhetőségével azonban a nagy pontosságú helymeghatározás mindennapi alkalmazása is reálissá válik. Az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kapnak az olyan együttműködésen alapuló, alacsony költségű RTK hálózatok, mint a Centipede-RTK [2], amelyek nyílt korrekciós adatokat biztosítanak, és bizonyítottan alkalmasak földmérési és tudományos célokra is.

A többfrekvenciás, alacsony költségű GNSS vevők gyors fejlődése tovább erősíti az RTK technológia terjedését. A modern eszközök több műholdrendszer jeleit követik (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou [3,4]), ami növeli a rendelkezésre állást és a megbízhatóságot. Így az olcsó RTK megoldások már nemcsak mezőgazdasági, hanem robotikai, autonóm járműves, környezetmonitorozási és tudományos alkalmazásokban is életképesek.

A rendszer egyik fő korlátja az RTK korrekciós bázisállomások elérhetősége, ugyanis a legtöbb kezdeti korrekciós adatszolgáltató rendszer csak előfizetéses rendszerben volt elérhető. Az elmúlt években útjára indult Centipede RTK hálózat ugyanakkor egy közösségi alapon működő, alacsony költségű GNSS korrekciós infrastruktúra, amely 2019 körül debütált Franciaországban, és ma elosztott, magánkézben lévő bázisállomásokból áll. Ezek az állomások az interneten keresztül szolgáltatnak nyílt RTK korrekciós adatokat, így alternatívát kínálnak a kereskedelmi szolgáltatásokkal szemben olyan területeken, mint a precíziós mezőgazdaság, földmérés, vagy robotika [5]. Magyarország lefedettsége kiemelkedően jó, közel 100%-os rendelkezésre állással (lásd 2. ábra). Méréseink során jellemzően a Debreceni Egyetem Agrár- és Élelmiszer tudományi Kar által üzemeltetett bázisállomást használtuk, amely 2025 márciusában kezdte meg működését.

2. HARDVERFELÉPÍTÉS

The diagram illustrates the RTK system architecture. It shows three GPS satellites at the top. Below them, a 'u-blox ANN-MB-00-00 active antennas' is connected to a 'u-blox ZED-F9P-04B-01 receiver'. The receiver is connected to a 'Raspberry Pi 5'. The Raspberry Pi 5 is connected to an 'Internet' cloud. The 'Internet' cloud is connected to an 'RTK Base station' which is mounted on a tripod. The base station is also connected back to the satellites.

Hálózati RTK korrekció esetén a referenciaállomás a mérési helyszíntől függ: Debrecenben az „fntp”, Mátészalkán a „jrmi” állomás használható, egyéb helyen történő terepi alkalmazás esetén pedig mindig érdemes a Centipede hivatalos oldalán kikeresni a megfelelő állomást. Az eszköz által alapértelmezetten használt „legközelebbi” virtuális referencia mód szintetikus bázisvonalat alkalmaz, ezért nem biztosítja a centiméteres pontosságot, amely a precíz geodéziai mérésekhez szükséges.

2.1. Adatkorrekciós algoritmus

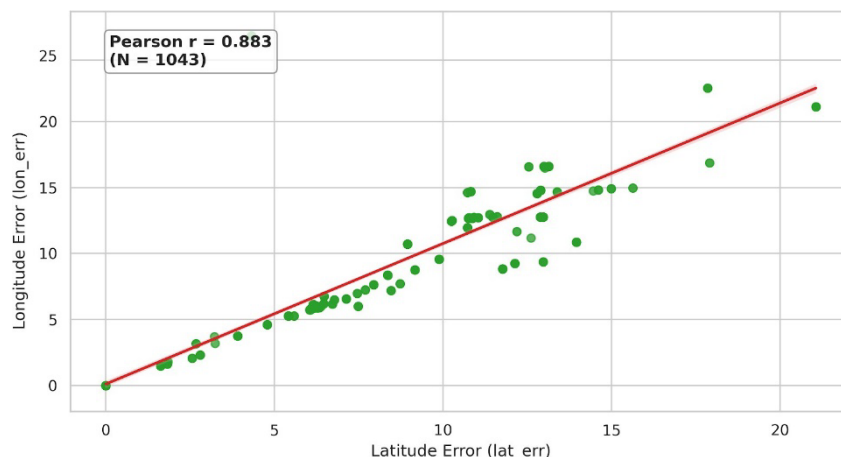
Ahogy azt később bemutatjuk, méréseink alapján a kezdeti eredmények több okból sem érték el a kívánt centiméteres pontosságot [7]. Ezért egy egyszerű korrekciós algoritmust alkalmaztunk a pontosság növelésére. Egyetlen mérés eredményének elfogadása helyett N darab egymás után végzett mérés közül választjuk ki a hiba alapján legjobbat:

$$\begin{aligned} lat_{\text{best}} &= lat + \min_i \sigma_{lat}(i), & lon_{\text{best}} &= lon + \min_i \sigma_{lon}(i), \\ alt_{\text{avg}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N alt(i), & v_{\text{avg}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(i), \\ H_{3D} &= \sqrt{(\sigma_{lat})^2 + (\sigma_{lon})^2 + (\sigma_{alt})^2}, \end{aligned}$$

ahol $\sigma_{lat}(i)$ és $\sigma_{lon}(i)$ az i -edik mérés szélességi és hosszúsági hibája méterben.

Mivel a mérőeszköz a mérési folyamat során mozdulatlan, a referencia pont minden adat esetében azonos. Ezeket az értékeket közvetlenül a mérőeszköz szolgáltatja. Fontos megjegyezni, hogy az egyenlet szerint a szélességi és hosszúsági hibák külön kerülnek optimalizálásra. Ez a módszer jelentősen leegyszerűsíti a korrekciós folyamatot ahhoz képest, mintha egy olyan mérési pontot próbálnánk keresni, amelynek a globális hibája a legkisebb. Másrészt, mivel a hibák legtöbbször erősen korreláltak, jellemzően ugyanaz a mérési pont kerül kiválasztásra mindkét koordináta-hoz. Ennek igazolására egy 1043 pontból álló tesztmérést végeztünk (lásd 3. ábra). Az erős korreláció és annak következtében, hogy a végső σ_{lat} és σ_{lon} értékek 5 független mérésből kerülnek kiválasztásra, annak valószínűsége, hogy mindkét értékhez ugyanaz a mérési pont legyen a legjobb, meghaladja a 99%-ot.

A korrekció javítja a helymeghatározási pontosságot, mivel az ismételt mérések azt mutatják, hogy a tényleges pozíciók egymáshoz nagyon közel esnek, még ha a becsült hibák ezt túl is becsülik (a valós eltérés kb. 5 cm).



3. ábra. σ_{lat} és σ_{lon} korrelációja

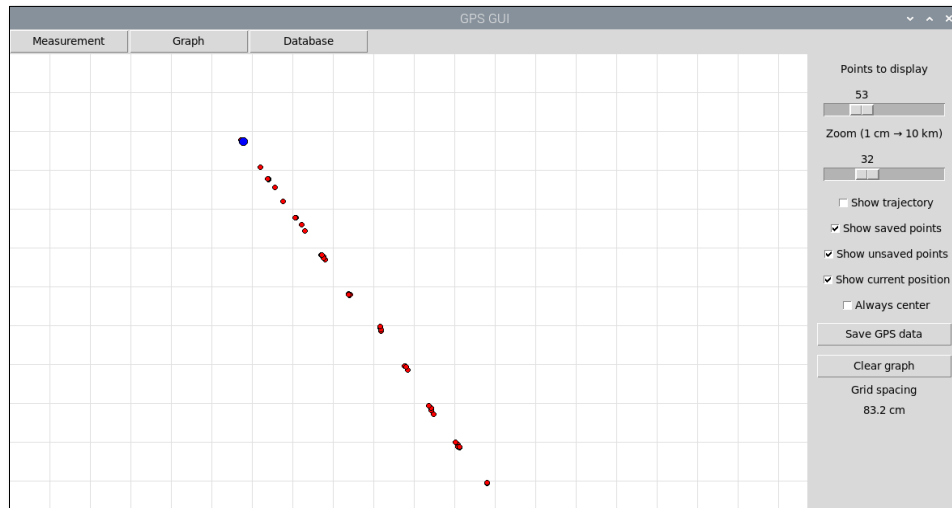
2.2. Próbamérések

Az RTK – a hagyományos GNSS-hez hasonlóan – több műholdrendszer jeleire támaszkodik, ám a környezet jelentősen befolyásolja a pontosságot. Időjárás, jelárnyékolás és többutas terjedés különösen városi vagy erdős területen ronthatja a teljesítményt [8]. Ennek vizsgálatára különböző környezetekben végeztünk méréseket: tíz, egy méterre elhelyezett referencia ponton 50–100 mintát gyűjtöttünk, majd az eredményeket összesítettük.

A tömeges mérésekhez Python-alapú grafikus felületet fejlesztettünk (lásd 4. ábra). A szoftver automatikusan rögzíti az adatokat, adatbázisban tárolja őket, és minden mérési rekordot az alapvető attribútumokkal menti, támogatva a vizualizációt és az elemzést.

A grafikus felület megjeleníti a kísérlet során gyűjtött mérési pontokat: a piros pontok az egy méterre elhelyezett GPS mintákat, a különálló pont pedig a referencia helyét jelöli. A vizualizáció helyesen mutatja a pontok térbeli elrendezését, igazolva, hogy a mérési rácsot pontosan rekonstruáltuk.

Az alábbi szakaszban bemutatott összes adat ezzel a szoftverrel és a korábban ismertetett hardverrel készült.

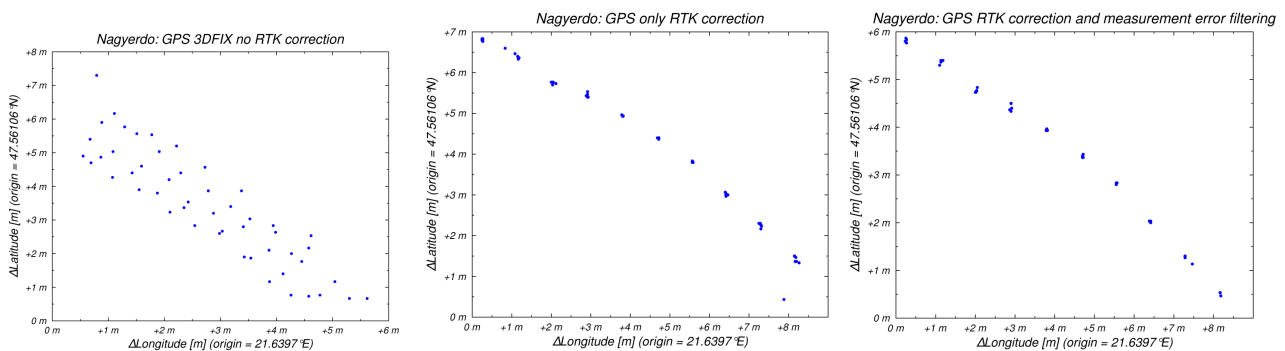


4. ábra. A GUI a mért pontokat, a trajektóriát és a valós idejű követést jeleníti meg.

A rendszer működésének empirikus bemutatásához az alábbi három környezetben végeztünk méréseket:

1. Beltéri mérések egy debreceni lakóövezeti lakás helyiségében.
2. Szuboptimális kültéri környezetben végzett mérések a debreceni Nagyerdőben, amely a város klasszikus rekreációs területe, sok magas fával és egyéb akadályokkal.
3. Optimális kültéri mérések a Debreceni Egyetem Informatikai Karának parkjában. Ez a viszonylag új park nem tartalmaz sok magas fát, ráadásul a mérések késő ősszel történtek, amikor többnyire derült volt az ég.

A méréseket három módszerrel ismételtük meg: egyszerű GNSS-pozicionálással, alap RTK-korrektívával és RTK-korrektívával kiegészített saját algoritmusunkkal. A három különböző környezetben végzett mérési eredményeinket egy korábbi cikkben részletesen ismertettük [9]. Reprezentatív példaként az 5. ábra mutatja be a rendszer működését szuboptimális környezeti viszonyok mellett.



5. ábra. Nagyerdő mérések – szuboptimális környezeti viszonyok

Látható, hogy az RTK jelentősen javítja a kültéri GNSS pontosságát, és egyszerű korrekciós algoritmusunk tovább növeli ezt, minimális számítási költséggel.

2.3. A továbbfejlesztett algoritmus alkalmazása

A továbbfejlesztett algoritmus célja egy olyan autonóm rover megvalósítása, amely előre kijelölt mérési pontokat egymás után, emberi beavatkozás nélkül képes megközelíteni terepi viszonyok között. A rendszer központi vezérlőegysége egy Raspberry Pi 5, amely a GNSS-vevő, az irányérzékelő és a hajtás vezérlését egyaránt kezeli.

A navigáció minden ciklusban meghatározza a rover aktuális helyzetét és irányszögét, majd ellenőrzi, hogy rendelkezésre áll-e még felkeresendő mérési pont. A célpont és az aktuális pozíció alapján kiszámítja a

távolságot, és amennyiben az meghaladja a beállított küszöbértéket – jelenleg 50 cm-t –, a rover folytatja a célpont megközelítését. A küszöbérték elérésekor a pontot elértnek tekinti, és a következő célpontra vált.

A haladás megkezdése előtt az autonóm egység irányító algoritmus meghatározza a célpont irányába mutató irányszöveget, majd összeveti azt a rover aktuális irányszögével. A két érték közötti eltérés alapján a rendszer szükség esetén korrigálja a rover orientációját. A korrekció során a rover váltakozó irányú elfordulásokkal keresi a megfelelő irányszöveget, miközben az irányérzékelő méréseit folyamatosan figyeli. A módszerre azért van szükség, mert a motorok fordulatszáma az akkumulátor pillanatnyi feszültségétől is függ, ezért a motor meghajtási idejéből önmagában nem határozható meg megbízhatóan az elfordulás szöge.

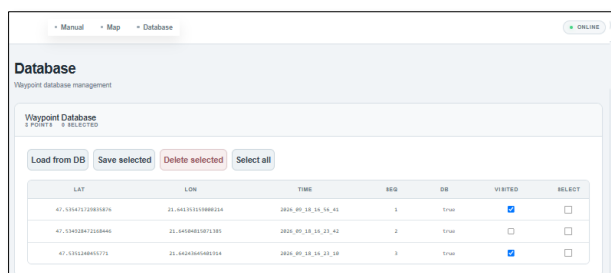
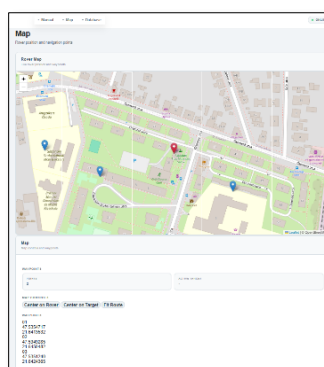
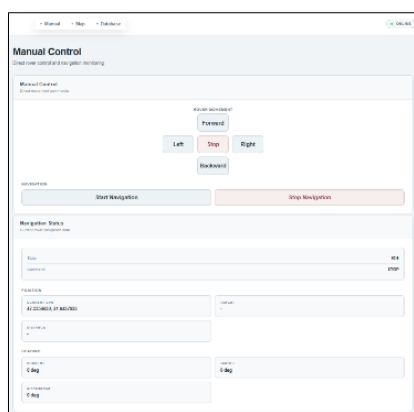
A megfelelő irány elérése után a rover megkezd a célpont felé történő haladást. Mozgás közben folyamatosan ellenőrzi saját GNSS-pozícióját és irányszögét, és az észlelt eltérések alapján szükség esetén ismételt iránykorrekciót hajt végre. A jelenlegi prototípusban az irányérzékelő körülbelül másodpercenként szolgáltat új mérési adatot, ezért a korrekció során a rover a célirányon időnként túllendülhet. Ennek kiküszöbölése a rendszer következő fejlesztési fázisának egyik feladata.

A rendszer terv szerinti elsődleges alkalmazási területe a mezőgazdasági talajszondák automatizált felkeresése. A szondák adatainak rendszeres leolvasása jelenleg ismétlődő, emberi közreműködést igénylő feladat, amely idő- és munkaigényes. A rover célja ennek a folyamatnak az automatizálása, ezáltal az ismétlődő mérési feladatok gépi végrehajtásának lehetővé tétele. A jelenlegi prototípus elsősorban a szükséges technológiák és működési elvek vizsgálatára szolgál. A fejlesztés ezen szakaszának célja annak meghatározása, hogy a későbbi, terepi alkalmazásra szánt rendszer megvalósításához milyen hardver- és szoftverkomponensekre van szükség.

A rover vezérléséhez és a mérési pontok kezeléséhez saját fejlesztésű webalapú felület készült. A felület három fő funkcionális egységből áll: manuális vezérlésből, térképes pontkezelésből és adatbázis-kezelésből (lásd 6. ábra).

A manuális vezérlési felületen indítható az automatikus területbejárás, valamint szükség esetén közvetlen beavatkozásra is lehetőség van. A biztonságos működést egy jól látható vészleállító gomb segíti. A felület valós időben megjeleníti a navigáció szempontjából legfontosabb adatokat, többek között a rover aktuális irányszögét és pozícióját, a célpont irányát és pozícióját, valamint a célponttól mért távolságot. A részletesebb, fejlesztés és hibakeresés szempontjából releváns információk a háttérben futó konzolnaplóban jelennek meg.

A térképes felületen a felhasználó közvetlenül a térképen jelölheti ki a felkeresendő pontokat. A kijelölt pontok a kiválasztás sorrendjében kerülnek a feladatlistába, amely meghatározza a rover bejárési útvonalát. Az adatbázis-kezelő felületen új mérési pontok rögzíthetők, a korábban eltárolt pontok törölhetők, illetve az adatbázisban szereplő pontok ismételtlen hozzáadhatók a felkeresendő pontok listájához. Ez lehetővé teszi a korábban meghatározott mérési helyszínek újra felhasználását és a mérési feladatok egyszerű összeállítását.



6. ábra. Képek a felhasználói felületről és a rover terepen

3. KÖVETKEZTETÉS

A cikk egy alacsony költségű RTK GNSS rendszert mutat be, amely valós idejű adatgyűjtéssel, vizualizációval és adatbázis-kezeléssel nagy pontosságú helymeghatározást tesz lehetővé. Célunk a gyári RTK pontosságának felmérése és egyszerű utófeldolgozási módszerek kipróbálása.

Az eredmények szerint az RTK jelentősen javítja a GNSS pontosságát, különösen jó kültéri környezetben. A javasolt szűrési módszer tovább növeli a pontosságot minimális számítási költséggel: szuboptimális esetben deciméteres pontosság érhető el. Az összeállított rendszert egy autonóm rover segítségével teszteltük terepi viszonyok között.

A vizsgálatok alapján, a nagy pontosság viszonylag olcsó hardverrel is elérhető megfelelő mérési és feldolgozási stratégiákkal. A jövőbeni munka fejlettebb szűrési technikákra és hosszú távú mérésekre fókuszál.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozunk Makár Ákosnak a projekt hardveres megvalósításához nyújtott segítségével, az alkalmazott elektronikai és elektrotechnikai megoldásokkal kapcsolatos gyakorlati tanácsokért, valamint a fejlesztéshez szükséges hardverelemek felkutatásáért és beszerzéséért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Saka M. H., Kavzoglu T., Ozsamli C., Alkan R. M.: *Sub-Metre Accuracy for Stand Alone GPS Positioning in Hydrographic Surveying*, Journal of Navigation 57(1) (2004), pp. 135–144, doi: [10.1017/S0373463303002571](https://doi.org/10.1017/S0373463303002571).
- [2] Sammuneh M. A., Eslahi M., Meouche R. E., Farazdaghi E.: *Low-Cost GNSS Receivers Reliability Using Centipede RTK Network for Land Surveying*, in: Proceedings of the 11th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management - GISTAM, 2025, pp. 211–218, doi: [10.5220/0013444800003935](https://doi.org/10.5220/0013444800003935).
- [3] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo, and More*, 1st ed., Vienna, Austria: Springer Vienna, 2008, isbn: 978-3-211-73012-6, doi: [10.1007/978-3-211-73017-1](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1).
- [4] Misra P., Enge P.: *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, 2011, isbn: 978-0-970-95442-8.
- [5] Bosser P., Ancelin J., Métois M., Rolland L., Vidal M.: *Evaluation of tropospheric estimates from CentipedeRTK, a collaborative network of low-cost GNSS stations*, GPS Solutions 28(158) (2024), doi: [10.1007/s10291-024-01699-3](https://doi.org/10.1007/s10291-024-01699-3).
- [6] Robustelli U., Cutugno M., Pugliano G.: *Low-Cost GNSS and PPP-RTK: Investigating the Capabilities of the u-blox ZED-F9P Module*, Sensors 23(13): 6074 (2023), doi: [10.3390/s23136074](https://doi.org/10.3390/s23136074).
- [7] Teunissen P. J. G., de Jonge P. J., Tiberius C. C. J. M.: *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans*, Journal of Geodesy 71 (1997), pp. 589–602, doi: [10.1007/s001900050127](https://doi.org/10.1007/s001900050127).
- [8] Hamza V., Stopar B., Sterle O., Pavlovčič-Prešeren P.: *Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review*, GPS Solut. 28: 149 (2024), doi: [10.1007/s10291-024-01686-8](https://doi.org/10.1007/s10291-024-01686-8).
- [9] Makár P. Á., Kocsis G.: *An Improved Measurement and Visualization System for High Precision Positioning with GPS-RTK*, 13th International Conference on Applied Informatics Eszterházy Károly Catholic University Eger, Hungary, February 19–21, 2026.