

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Általános és Felsőgeodézia Tanszék

TDK dolgozat

**A függőleges irányának szélső pontosságú
meghatározása**

Készítette: Csala Bettina

**Konzulensek: Dr. Tóth Gyula
Dr. Völgyesi Lajos**

Budapest, 2015 november

Összefoglaló

A felsőgeodézia jelenlegi legfontosabb feladata a Föld elméleti alakjának, a geoidnak a szélső pontosságú meghatározása. Az ehhez használható legfontosabb kiinduló adatokat, a függővonal-elhajlásokat korábban a klasszikus csillagászati földrajzi helymeghatározással nyerték, amelyeket Eötvös-inga mérések alapján sűrítettek. A csillagászati földrajzi helymeghatározás rendkívül hosszadalmas és költséges módszer, az Eötvös-inga mérések alapján sűrített értékek pedig kevésbé pontosak.

Az utóbbi évek új műszaki és számítástechnikai lehetőségei forradalmi változást hoztak a csillagászati-geodéziai mérések történetében, a QDaedalus rendszerrel lehetővé vált a függőleges irányának, a függővonal-elhajlásnak minden eddiginél pontosabb és gyorsabb meghatározása.

A tanulmány bemutatja a QDaedalus rendszer működésének alapelvét, majd beszámol a Budapest környékén végzett tesztmérésekről. Leírja a mérések során szerzett tapasztalatokat és az elvégzett mérések eredményei alapján megvizsgálja a módszer pontosságát és megbízhatóságát.

Abstract

Nowadays the most important task of geodesy is the high-precision determination of Earth's theoretical shape, the geoid. To calculate the deflection of the vertical, the necessary data was collected by astronomical position determination. Vertical deflections of these astrogeodetic points have been refined by torsion balance measurements. The method of astronomical position determination is very expensive and it takes lots of time, at the same time refining the astrogeodetic points by interpolation based on the Eötvös torsion balance measurements are less precise.

Last years the new technological opportunities offer a revolutionary change in the methods of astronomical geodesy, using the QDaedalus system the vertical deflections can be determined faster and more accurate than earlier.

This paper reviews the fundamentals of QDaedalus system and reports on the test measurements around Budapest. It describes the experiences about measurements and examines the precision and reliability of this method based on the results of the test measurements.

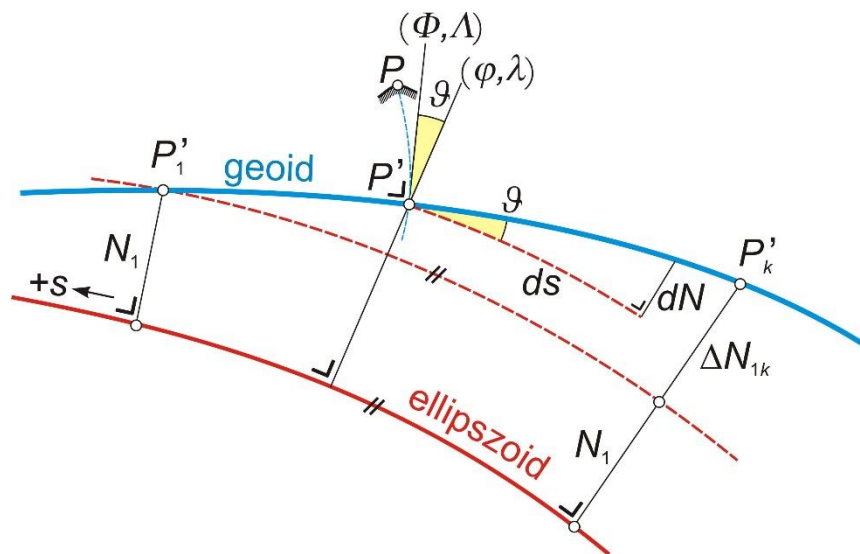
Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. Csillagászati-geodézia	6
1.2. A QDaedalus rendszer	6
2. Budapest környéki tesztmérések	11
2.1. Teszterület kiválasztása	11
2.2. Mérések végrehajtása	13
3. Mérési adatok feldolgozása	16
4. Kiértékelés, észrevételek	20
5. Mellékletek	23
6. Irodalomjegyzék	25

1. Bevezetés

A Föld matematikai alakjának, azaz a geoidnak a meghatározása az elméleti felsőgeodézia mellett ma már a gyakorlat számára is nagyon fontos. A GPS-technika elterjedését követően megnőtt az igény a minél megbízhatóbb geoidkép ismeretére, ami lehetővé teszi a GPS mérésekből nyert ellipszoidi magasságok átszámítását a gyakorlatban alkalmazott tengerszint feletti magasságértékekre.

A geoid egyértelmű leírásához meg kell határozni a vonatkoztatási ellipszoid és a geoid felület egymáshoz viszonyított térbeli elhelyezkedését. Ennek egy lehetséges módja, hogy a geometriai felületként kezelt ellipszoid és geoid térbeli helyzetét a felületi normálisuk irányával jellemezzük. A geoid esetén a felületi normális irányát a csillagászati-geodéziai módszerrel mért és a geoidra átszámított Φ , Λ szintfelületi földrajzi koordinátákkal, míg az ellipszoid esetén a φ , λ ellipszoidi földrajzi koordinátákkal adjuk meg a földi térbeli koordináta-rendszerben. A koordináták ismeretében számítható a csillagászati-geodéziai pontok geoidi függővonal-elhajlás értéke, vagyis a felületi normálisok közbezárt szöge, amit 1. ábra a szemléltet. A függővonal-elhajlás értékét a ξ észak-dél és η kelet-nyugat irányú összetevőkkel adhatjuk meg, ami egyértelműen meghatározza a két felület egymáshoz viszonyított helyzetét.



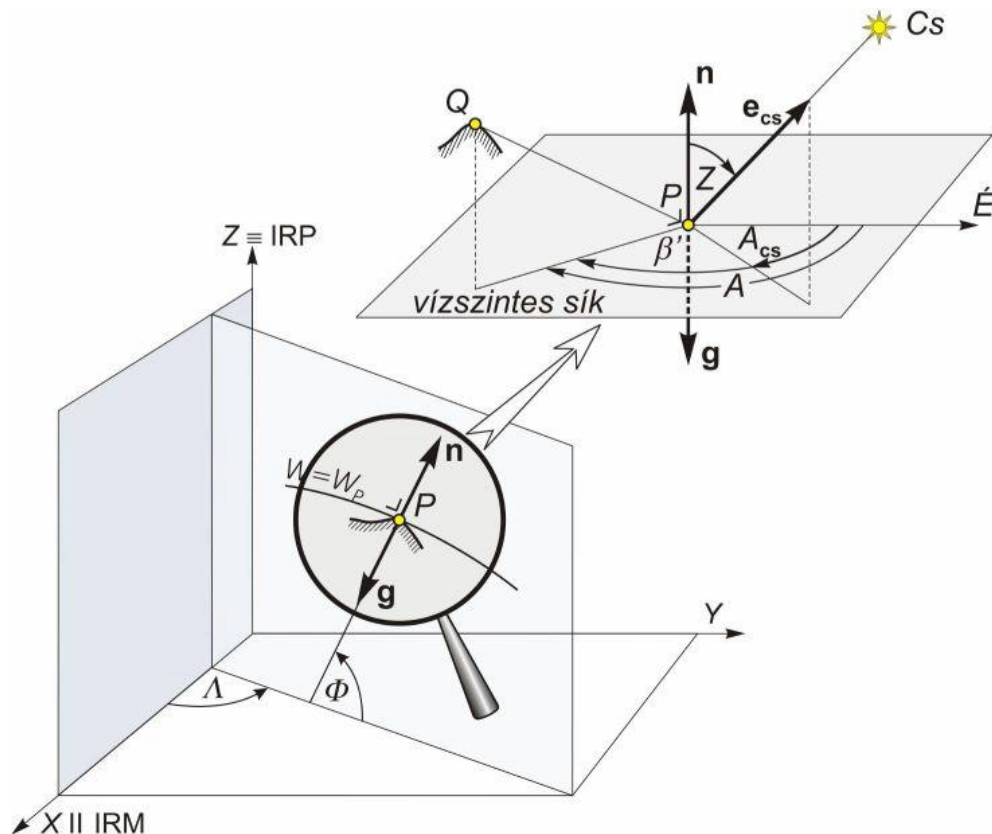
1. ábra: Függővonal-elhajlás (θ)

A függővonal-elhajlás, vagyis a helyi függőleges iránya ismeretének a mérnökgeodéziai gyakorlatban is nagy jelentősége van például alagútépítés során létesített, precíz mérnökgeodéziai hálózatok esetén.

A továbbiakban röviden összefoglaljuk az alkalmazott csillagászati-geodéziai mérési módszer alapelvét [1.] és bemutatjuk az ennek megvalósítását szolgáló QDaedalus rendszer felépítését és működését [2.].

1.1. Csillagászati-geodézia

A csillagászati-geodézia az egyik legrégebben kialakult mérési módszer a globális helymeghatározás céljából. A kozmikus geodéziai méréseknek ez azon részével foglalkozik, mely során természetes égitestekre végzünk méréseket optikai eszközökkel. Az ismert koordinátájú csillagokra végzett mérések alapján meghatározhatók az álláspont Φ , Λ szintfelületi földrajzi koordinátái, ami megadja a helyi függőleges térbeli helyzetét a földi térbeli derékszögű koordináta-rendszerben. A módszer alapját a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: Földrajzi helymeghatározás

A csillagászati-geodézia gyakorlati megvalósulása a szintetikus meghatározás, vagyis pontonként végezzük el a méréseket és a koordinátaszámításokat. A módszerhez ismernünk kell a csillagkoordinátákat, melyeket a csillagkatalógusokból nyerhetünk. A csillagászati-geodéziai pontok ellipszoidi földrajzi koordinátáinak ismeretében pedig meghatározhatók a már említett geoidi függővonal-elhajlás értékek az egyes pontokban. [1.]

1.2. A QDaedalus rendszer

A QDaedalus rendszer az ETH Zürich által fejlesztett rendszer, melyet csillagászati-geodéziai mérésekhez terveztek. A rendszer alapja egy olyan digitális kiegészítő rendszer, mely mérőállomásokhoz csatolva alkalmas a kozmikus geodéziai mérések automatikus végrehajtására. A rendszer tervezésénél fontos szempont volt, hogy a mérőállomáshoz jelentős szerkezeti módosítás nélkül csatlakoztatható legyen. A zenitkamerákkal szembeni nagy előnye a választható zenittávolság. Ugyanis lehetőségünk van olyan

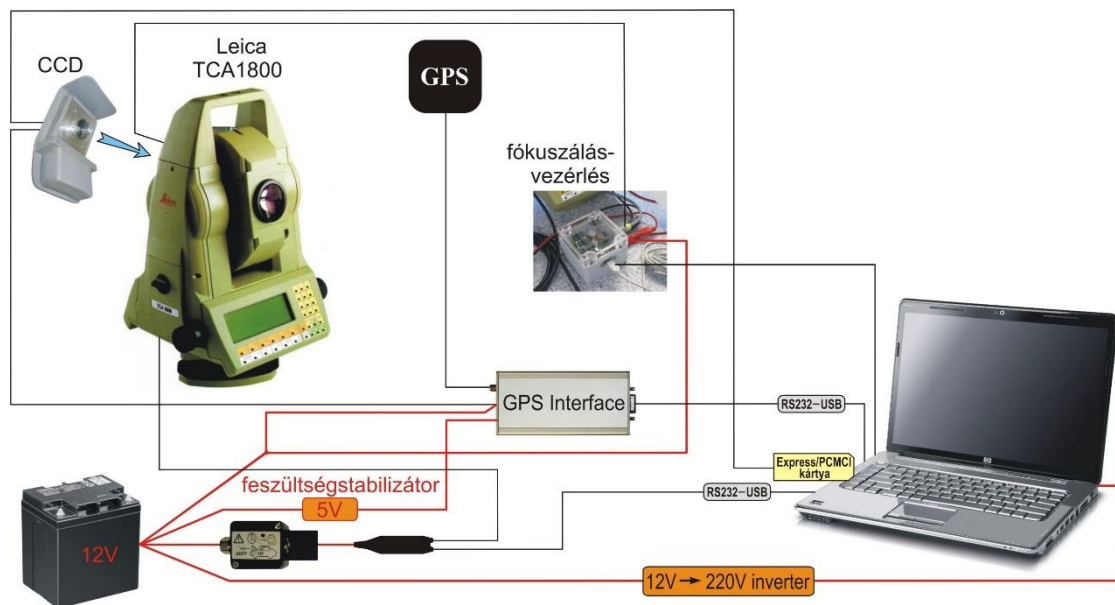
zenitszögben mérni, ahol jóval több, kisebb magnitúdójú, fényesebb csillag található, mint a zenitpont közeli környezetében, így kisebb érzékenységű CCD érzékelővel is megfelelő pontosságú mérést végezhetünk. A QDaedalus rendszer jóval költséghatékonyabb megoldást jelent, mint a korábbi zenitkamerák.

A rendszer fő alkotói: [3. ábra]

- robot mérőállomás
- CCD érzékelő
- fókuszáló mechanika
- szoftver

További egységek:

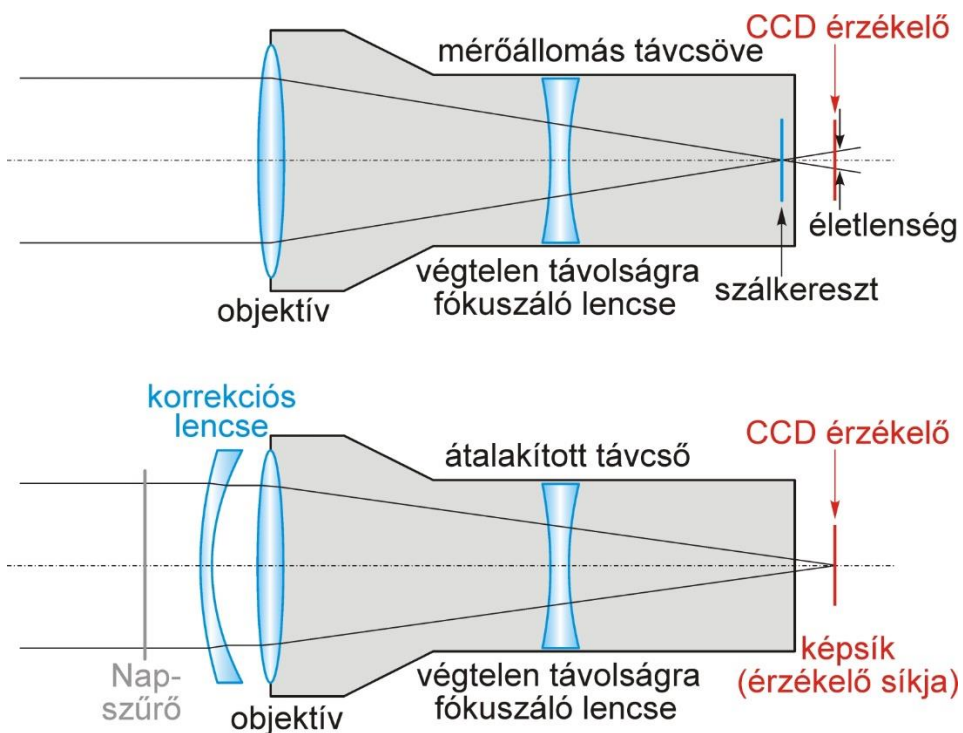
- korrekciós lencse
- interfész egység
- GPS-vevő



3. ábra: QDaedalus rendszer részei és azok kapcsolata

A mérésekhez a különböző egységeket egy Leica TCA 1800 robot mérőállomásra szereltük fel. A műszer beépített kéttengelyű kompenzátorral rendelkezik, aminek a beállási pontossága a gyári adatok szerint 0.1 mgon (0.36"). Ez biztosítja a szabályos hibák kiküszöbölését a vízszintes és magassági szögmérés eredményeiből, ami a csillagászati alkalmazások esetében létfontosságú, hiszen nincs lehetőségünk két távcsőállásban mérni.

A CCD érzékelő a mérőállomás távcsövére rögzíthető, az okulár helyére. A mérőállomás távcsövének elejére rögzített korrekciós lencse felel azért, hogy a képsík egybeessen a CCD érzékelő síkjával, így állítva elő az éles képet. Az előtétlencse szerepét a 4. ábra szemlélteti.



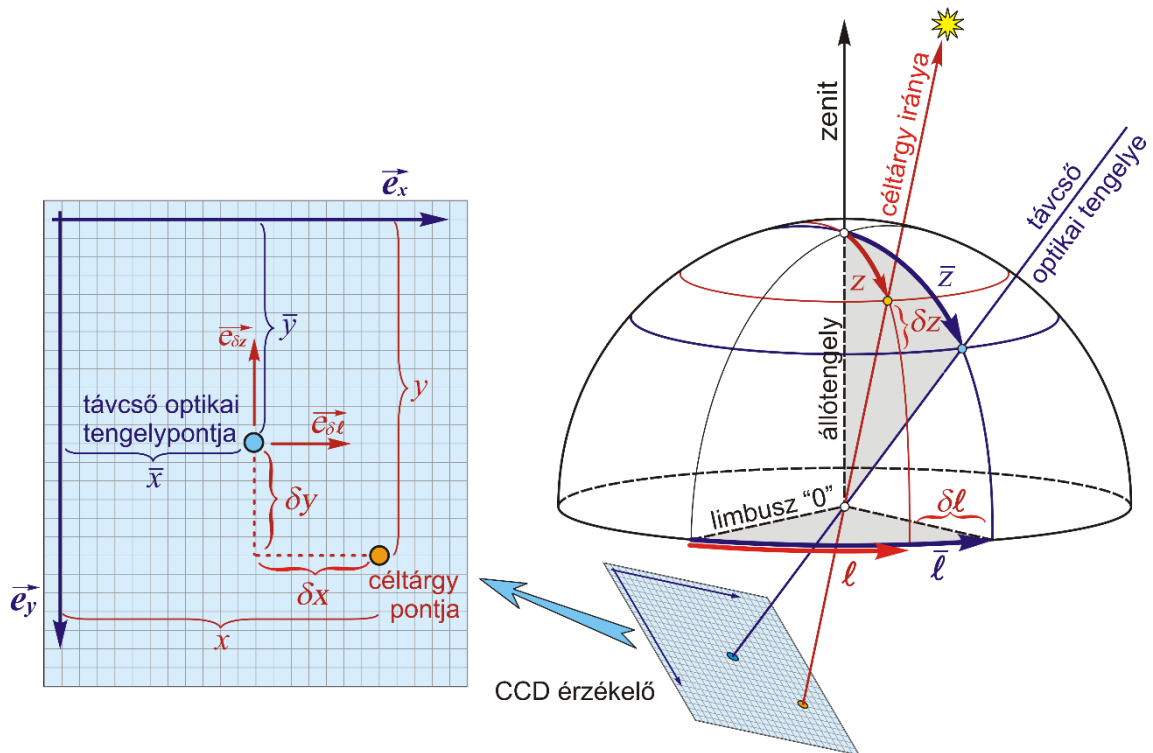
4. ábra: A mérőállomás távcsövére szerelt előtétlencse szerepe

A CCD érzékelő pixelmérete $4.65 \times 4.65 \mu\text{m}$. Az optikai rendszer $4''/\text{pixeles}$ felbontással rendelkezik, így teljesen kihasználható a mérőállomás szögmérési pontossága, mivel $0,1$ pixel körüli pontosság érhető el képfeldolgozással.

A rendszerhez kapcsolt GPS-vevő szolgál a CCD érzékelő képalkotása időpontjának és időtartamának pontos meghatározására.

A fókuszáló mechanika lehetővé teszi az automatikus fókuszbeállítást. A csillagászati-geodéziai mérések esetén nem feltétlenül szükséges, automatikus újrafókuszálásra ugyanis nincs szükség, mivel a vizsgált objektumok nagy távolságra vannak. Elegendő a mérés megkezdése előtt egy végtelenül távoli objektumra fókuszálni.

A mérések megkezdése előtt meg kell határozni a távcső optikai tengelyének metszéspontját a CCD képsíkján, ezzel egymáshoz rendelve a pixel koordinátákat és a mérőállomás koordináta-rendszerét. [5. ábra] Ezt a kalibrációt minden összeszerelést követően el kell végezni. Továbbá célszerű a mérés után megismételni a kalibrálást.



5. ábra: Kalibráció

A QDaedalus rendszer alkalmas függővonal-elhajlás mérésekhez is. Egyik előnye, hogy akár 15 perces éjszakai méréssel már megfelelő pontosság érhető el. A rendszer összeállítását követően elvégezzük a szoftver beállítását.

Következő lépés a fókusz beállítása, ami a Hold megirányzásával és képének élesre állításával is elvégezhető. A kalibrálást egy négy LED-ből álló lámpára végeztük el. A kalibráló pontokat a műszertől minimum 100 méteres távolságra kell elhelyezni a megfelelő kalibráláshoz.

A mérést egy közelítő tájékozással kezdjük valamely természetes égitestre, például a Sarkcsillagra. A Sarkcsillagra való tájékozást egyszerűsíti, hogy a műszer a megfelelő paraméterek beállítása után, a csillagkatalógus alapján képes beállni a Sarkcsillag zenitszögére, így manuálisan csak vízszintes értelemben kell megirányozni a csillagot.

Ezt követően megkezdhetjük a mérést az előre beállított zenittávolságra eső csillagokra. A csillagok zenitszögére célszerű $30^\circ \pm 2^\circ$ -os értéket megadni. Ugyanis ebben a zenittávolságban már elegendő számú, fényesebb csillag mérhető, ami nagymértékben növeli a mérési pontosságot. Azonban fontos megjegyezni, hogy ennél a zenitszögnél a refrakció hiba hatása már jelentős, megközelítősen $34''$, viszont a refrakció változása a megadott 4° -os tartományban már csak $5''$ és jól jellemezhető, így az eredményeket nem rontja el.

Célszerű az első csillagot a csillagkatalógusból külön mérni, hogy meggyőződjünk arról, hogy a mérés megfelelően lezajlott. Amennyiben megfelelő volt, elindítható az automatikus mérés. Lehetőségünk van azt is beállítani, hogy milyen szempontok szerint rendezze, és milyen sorrendben mérje meg a csillagokat. Ilyen szempont lehet például a csillagok magnitúdója vagy az, hogy a végzett mérések a 30° -os

zenitszöghöz tartozó sávban az égbolton közel homogén eloszlásúak legyenek. A mérést célszerű egy ismételt kalibrációval zárni.

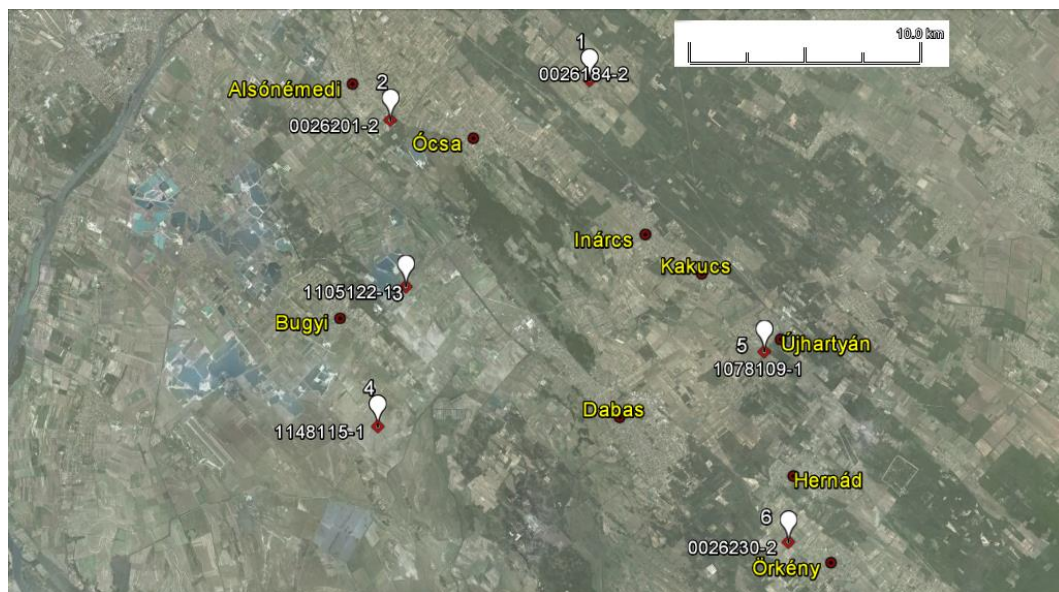
QDaedalus rendszer saját feldolgozó szoftverével a leírás szerint elérhető a $\pm 0.3''$ -es pontosság is a levezetett függővonal-elhajlás összetevőkre vonatkozóan, így a módszer az adott pontosság mellett egyértelműen alkalmas geoidmeghatározásra is.

2. Budapest környéki tesztmérések

2.1. Teszterület kiválasztása

A QDaedalus rendszer tesztelése és részletes tanulmányozása érdekében tesztméréseket végeztünk. A helyszínt illetően Ócsa környékére esett a választásunk. A legfontosabb szempontok a teszterület kiválasztásakor a jó megközelíthetőség és hogy kellően közel helyezkedjenek el egymáshoz, hogy egy éjszaka alatt minél több ponton lehessen elvégezni a méréseket, de elég nagy területet fedjenek le ahhoz, hogy alkalmasak legyenek a geoid egy felületdarabjának meghatározásához, amely egy későbbi célunk.

A kiválasztott hat mérési ponton már korábban végeztünk GNSS méréseket. A csillagászati-geodéziai mérések elvégzéséhez olyan területet kell választani, ahol 30°-os zenitzőgben biztosított a szabad rálátás az égboltra. Mivel a pontok alkalmasak voltak a korábbi GNSS mérésekre, így biztosan megfelelnek a kisebb rálátást igénylő csillagászati-geodéziai mérésekhez is. A kiválasztott mérési pontok elhelyezkedését az [6. ábra] szemlélteti, a pontszámokat és a koordinátákat az [1. táblázat] tartalmazza.



6. ábra: Kiválasztott mérési pontok elhelyezkedése

1. táblázat: Méréshez kiválasztott magassági alappontok közelítő koordinátái

Pontszám	EOV	WGS84			
		Y (m)	X (m)	Szélesség	Hosszúság
1	0026184-2	668661	217398	47° 19' 5,92"	19° 17' 39,26"
2	0026201-2	660010	217647	47° 18' 9,97"	19° 10' 47,17"
6	0026230-2	677354	199433	47° 8' 17,59"	19° 24' 27,58"
5	1078109-1	676283	207673	47° 12' 45,43"	19° 23' 39,91"
3	1105122-1	660710	210444	47° 14' 16,76"	19° 11' 19,68"
4	1148115-1	659506	204385	47° 11' 0,38"	19° 10' 21,94"

A mérést terepbejárás előzte meg, amely során felkerestük az alappontokat és megvizsgáltuk azok sértetlenségét. Erre azért is volt szükség, mert a FÖMI honlapján található pontlistában a hat mérési alappontból három nem szerepelt. A helyszínen mind a hat pont fellelhető volt, melyet az ott készített fényképek is jól szemléltetnek [7. **ábra**-12. **ábra**].



7. **ábra**: 1. számú mérési pont Ócsától keletre



8. **ábra**: 2. számú mérési pont Alsónémedi déli szélén



9. **ábra**: 3. számú mérési pont Bugyitól keletre



10. **ábra**: 4. számú mérési pont Bugyitól délre



11. **ábra**: 5. számú mérési pont Újhartyán déli szélén



12. **ábra**: 6. számú mérési pont Örkény északi

2.2. Mérések végrehajtása

A méréseket három éjszaka alatt tudtuk lebonyolítani. Minden alkalommal két ponton mértünk. Az első mérésre 2015 szeptember 21-én került sor. Az 5. számú ponton kezdtük a mérést, amely Újhartyántól délre fekvő kereszteződésben található egy átereszbe építve. Este 7 óra körül értünk a helyszínre, így bőven volt időnk a műszer gondos felállítására. Kezdetben még felhős volt az ég, de szerencsére a mérés megkezdéséig a felhők feloszlottak, így zavartalan körülmények között tudtuk lefolytatni a mérést. A mérés végrehajtásához a QDaedalus rendszer saját szoftverét futtattuk. Első lépésként elvégeztük a mérőállomás kompenzátorának megfelelő beállítását, majd a mérőállomást geocom üzemmódba kapcsoltuk. Ezt követően beállítottuk a GPS-vevőt és a CCD érzékelőt. A fókusz beállítását egy távoli objektum képének élesre állításával végeztük el, ami esetünkben a Hold volt. Első lépés a kalibráció elvégzése, amihez egy négy pontból álló LED sort használtunk fel. Este 8 órára kellően besötétedett, ezért megkezdhetjük a mérést. A tájékozás érdekében elsőként a Polaris (Sarkcsillag) kellett megirányozni. Ezt követően a csillagkatalógus alapján automatikusan választja ki a program a mérendő csillagokat a beállított 30° -os zenitszögön belül és a beállított magnitúdó alatt. Az alapbeállítások mellett minden csillagra négy mérést végez. A csillagok mérése 25-30 percet vett igénybe, ami után egy ismételt kalibrációt végeztünk a későbbi összehasonlítás céljából.

Még ugyanezen az estén elvégeztük a méréseket az 1. számú ponton, ami Ócsától keletre található a főút mentén. 21:45-kor kezdtük el a kalibrálást. A LED sor mellett megpróbáltunk távoli lámpákra is kalibrálni, de ezeknek túl nagy udvara volt és túlságosan elszórtan helyezkedtek el, ezért rosszabb eredményt szolgáltatottak. A mérés menete az előzőhöz hasonló volt, amit szintén kalibráció követett.

Az elkövetkezendő napok esős időjárása miatt a következő mérésekkel egészen októberig várnunk kellett. Október 1-én a 6. számú ponton kezdtük a mérést, ami Örkény északi határán található az 5. számú főút mellett. Ez volt a leghosszabb mérésünk, ugyanis különböző kapcsolódási problémák miatt közel két órát töltöttünk el itt, mire a szükséges méréseket el tudtuk végezni. A technikai nehézségek mellett a kialakuló köd is nehezítette a mérést.

Az este további részében a 2. számú ponton folytattunk méréseket, ami az Alsónémeditől délre fekvő körforgalom közepén található. A műszer gondos felállítását a fókusz beállítása, majd a kalibráció követte. A Polaris megirányozását követően pedig kezdetét vette a mérés. A közel 30 perces mérést ismét kalibráció követte. Ezen a ponton volt a legnagyobb a fényszennyezés, de ez meglepő módon nem befolyásolta a mérést. A mérés során készített fényképek [13. ábra] jól szemléltetik a mérési körülményeket és a mérés lebonyolításához használt eszközöket.



13. ábra: Mérés Alsónémedi mellett

A megmaradt két ponton a rákövetkező napon, október 2-án végeztük el a méréseket. Bugyitól délre eső ponton kezdtünk, mely egy szántófield szélén, egy földút mentén található. A [14. ábra] látható, hogy a szükséges előkészületeket még világosban el tudtuk végezni. A csillagászati szürkület beállta után, a kalibrációt követően megkezdtük a mérést, amit problémamentesen tudtunk végrehajtani.



14. ábra: Mérési előkészületek Bugyi déli szélén

A tesztmérések utolsó állomásaként a Bugyitól keletre eső csatorna partján található 3. számú ponton is elvégeztük a szükséges méréseket. Este 9 óra körül kezdtük meg a kalibrációkat és a csillagokra végzett méréseket. Az előző napok mérései során szerzett rutin következtében egészen rövid idő alatt, még 10 óra előtt szerencsésen be is tudtuk fejezni a mérést. [15. ábra] A mérés lebonyolítása a már fentebb említett módon történt, ami itt is problémamentesen zajlott.

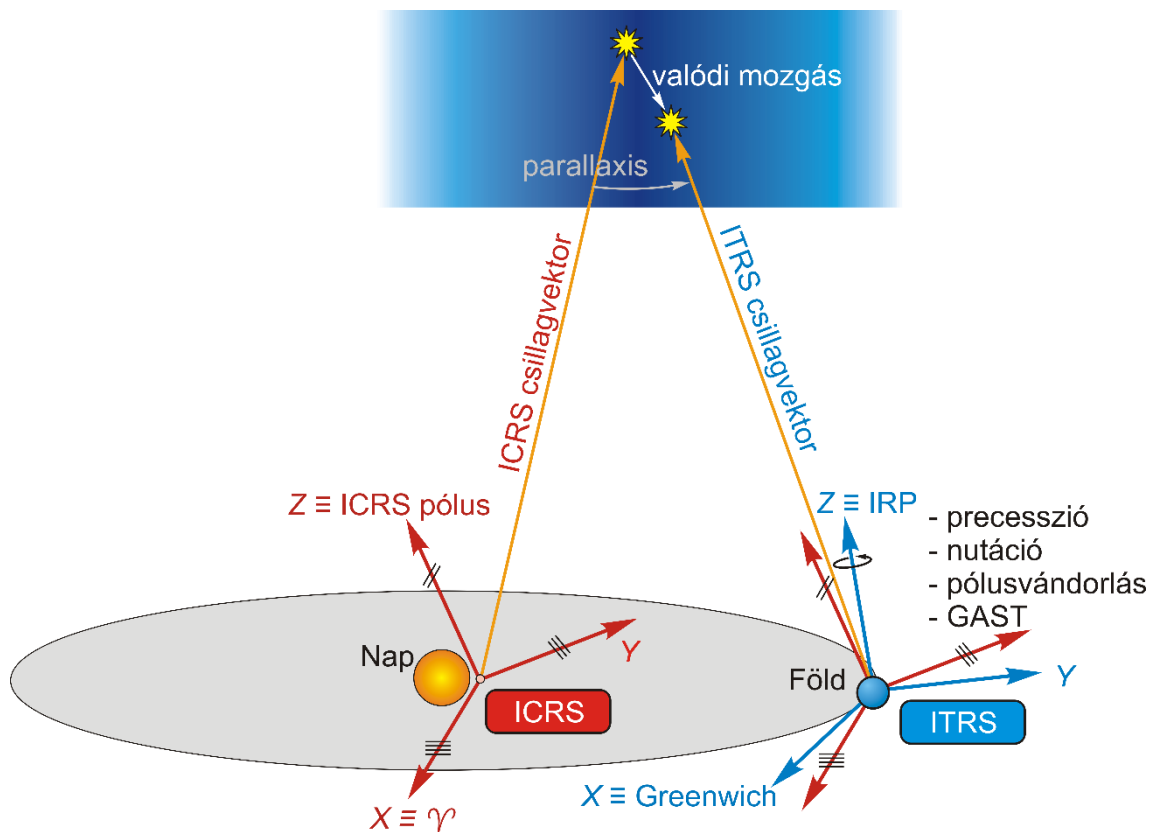


15. ábra: Mérés Bugyitól keletre

Minden mérés után, még a helyszínen lefuttattuk a QDaedalus rendszer saját feldolgozó szoftverét. Minden esetben azt tapasztaltuk, hogy a mérések eredményei megfelelőek a későbbi feldolgozáshoz.

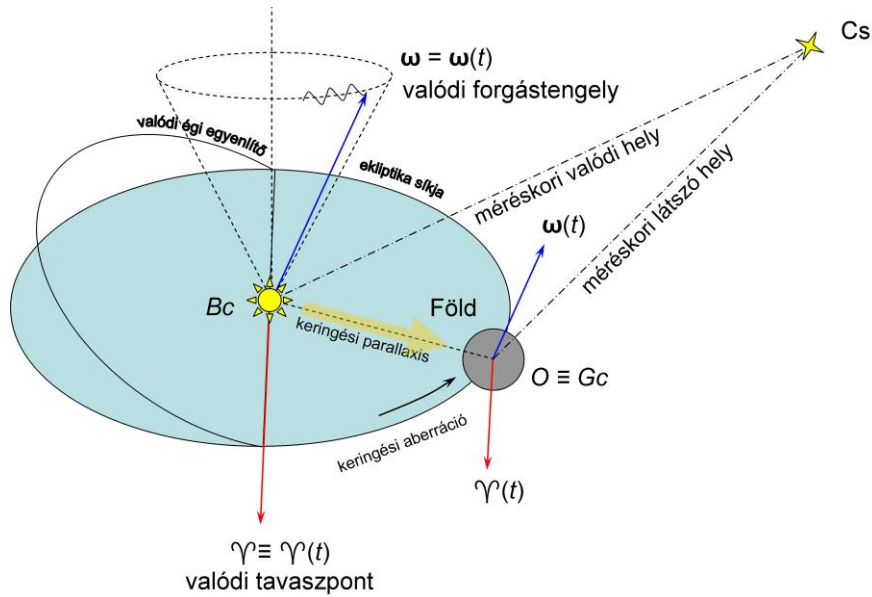
3. Mérési adatok feldolgozása

A csillagászati geodéziai mérések feldolgozása két fő részre bontható. Az első a mért csillagok helyzetének meghatározása a mérés időpontjában a földi térbeli derékszögű koordináta-rendszerben (ITRS), majd ezt követi az álláspont szintfelületi földrajzi koordinátáinak számítása. A kiinduló adatok a következők: az FK6 csillagkatalógusból kinyerhető a mért csillag δ , α koordinátái az égi egyenlítői koordináta-rendszerben (ICRS), illetve sajátmozgás, a parallaxis és a sugár irányú sebesség. Továbbá a mérés időpontját is rögzítjük UTC-ben. A Nemzetközi Földforgási és Vonatkoztatási Rendszerek Szolgálat (IERS) által szolgáltatott földtájékozási paraméterek biztosítják a két koordináta-rendszer közötti transzformációt. Ezek a paraméterek a szökőmásodpercek száma, az (UT1-UTC) különbsége másodpercben és az égi pólus koordinátái az ITRS-ben, szögmásodperc egységben. A 16. ábra jól szemlélteti az égi és a földi koordináta-rendszer kapcsolatát, megjelenítve azokat az egyéb tényezőket, amiket a transzformáció során figyelembe venni.



16. ábra: Az égi és a földi koordináta-rendszer kapcsolata I.

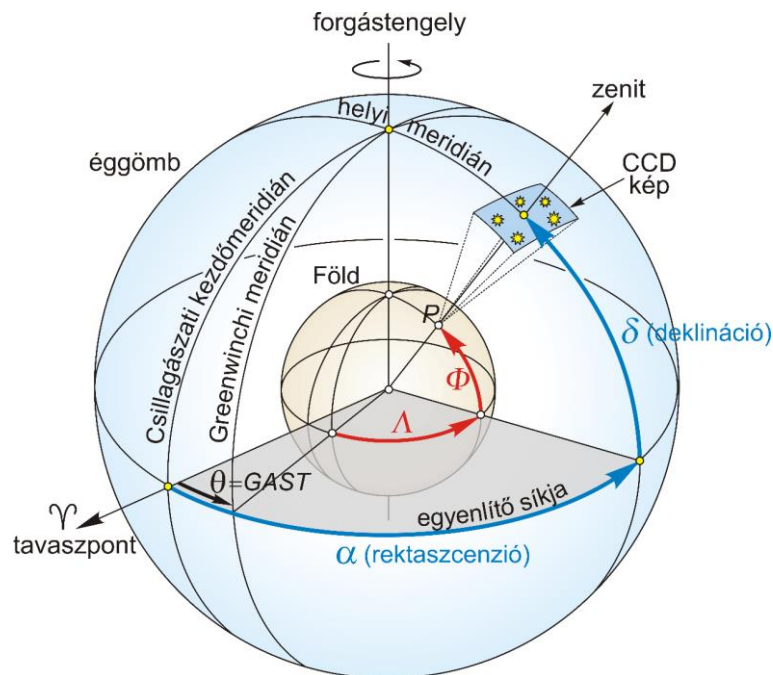
A csillagok helyzetének ITRS-be történő számítását a mérési időpontra vonatkozóan azzal kezdjük, hogy meghatározzuk az FK6 csillagkatalógus adatok alapján a csillagok koordinátáit geocentrikus ICRS-ben (GCRS). Az UTC-ben adott mérési időpontot a szökőmásodpercek ismeretében át kell számítani földi időbe, majd meghatározzuk a Föld és a csillag helyzetvektorát és sebességvektorát ICRS-ben. A GCRS-be történő átszámításhoz szükséges még az ICRS középpontja, azaz a baricentrum és a geocentrum közötti fényidő különbség, a sajátmozgás, az éves keringési parallaxis és az éves keringési aberráció ismerete, melyek a 17. ábra alapján egyértelműen értelmezhetőek.



17. ábra: ICRS-ből GCRS-be történő átszámításakor figyelembe vett egyéb tényezők

Következő lépés a csillag irányának a GCRS-ben meghatározott egységvektora ITRS-be transzformálása. Mivel a koordináta-rendszerek kezdőpontja azonos, ezért a megfelelő forgatási mátrixokat (képletben R) kell felírni a transzformáláshoz, melyek tartalmazzák a precesszió és a csillagászati nutáció hatását, illetve a pólusmozgás korrekciós értékét is. A 18. ábra alapján látható, hogy a két rendszer közötti kapcsolathoz szükség van még a GAST, azaz a greenwichi kezdőmeridián (IRM) és a csillagászati kezdőmeridián egymástól való eltérésére. Mindezek ismeretében elvégezhető az ITRS-be történő transzformáció, amit a következő összefüggés ír le:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRS} = R_y(-x_p) \cdot R_x(-y_p) \cdot R_z(GAST) \cdot R^N(t) \cdot R^P(t) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{ICRS}$$



18. ábra: Az égi és a földi koordináta-rendszer kapcsolata II.

A feldolgozás második része az álláspont szintfelületi földrajzi koordinátáinak számítása. Elsőként meghatározzuk a mérésfeldolgozási modellt, ami az álláspont Φ, Λ szintfelületi földrajzi koordinátáinak meghatározására szolgál. Ezzel párhuzamosan meghatározhatunk még egyéb paramétereket is, mint például az indexhiba értékét és a tájékozási ismeretlen. A mérésből származó, hibával terhelt mennyiségek a mérőállomás távcsőtengelyének mérés kori vízszintes- és zenitszöge és a mért csillagok képkordinátái. A feldolgozáshoz szükséges paraméterek még a csillag irányának az előbbieken meghatározott egységvektora ITRS-ben a mérés időpontjára vonatkozóan, a mérés kori légnyomás és hőmérséklet, a kalibrációhoz használt affín transzformáció paraméterei, a képfőpont koordináták és az álláspont előzetes szintfelületi földrajzi koordinátái. Előzetes koordinátaként alkalmazhatjuk a GPS-mérésekből származó ellipszoidi földrajzi koordinátákat.

A következő lépésben meghatározzuk a funkcionális modellt, ami a mérések és a paraméterek közötti összefüggéseket kifejező feltételi egyenletek felírását jelenti. Minden méréshez két közvetítő egyenlet írható fel. Az i -dik mérésre felírt egyenletek a következők:

$$\left[l_i + \overbrace{\omega - \arctan\left(\frac{y_{TOPO}}{x_{TOPO}}\right)}^{-l_i^*} \right] \sin \left[\overbrace{\arccos(z_{TOPO}) - i_z - \delta_{refr}}^{z_i^*} \right] - a_{11}(x_i - x_0) - a_{12}(y_i - y_0) = 0$$

$$z_i - \arccos(z_{TOPO}) + i_z + \delta_{refr} - a_{21}(x_i - x_0) - a_{22}(y_i - y_0) = 0$$

, ahol a_i az affín transzformációs paraméterei, i_z az indexhiba, δ_{refr} a refrakció hiba, ω a tájékozási ismeretlen, l_i és z_i a mérőállomás távcső tengelyének mérés kori vízszintes- és zenitszöge fokban, l_i^* és z_i^* a mért csillagok vízszintes- és zenitszöge fokban, x_0 és y_0 a képfőpont képkordinátái, x_i és y_i mért csillagok képkordinátái, $(x_{TOPO}, y_{TOPO}, z_{TOPO})$ a csillag irányának topocentrikus koordinátái.

A fenti összefüggésekből jól látszik, hogy a mérések és a nem mért paraméterek is szerepelnek az egyenletekben, így a kiegyenlítés során egyértelműen az V. kiegyenlítési csoport szerint kell eljárni.

A mért csillag topocentrikus egységvektorát az ITRS-ben meghatározott egységvektor elforgatásával nyerjük a következő képlet alapján:

$$e_{TOPO} = \begin{bmatrix} x_{TOPO} \\ y_{TOPO} \\ z_{TOPO} \end{bmatrix} = T(\Phi, \Lambda) e_{ITRS} = \begin{bmatrix} \sin\Phi \cos\Lambda & -\sin\Phi \sin\Lambda & \cos\Phi \\ -\sin\Lambda & \cos\Lambda & 0 \\ \cos\Phi \cos\Lambda & \cos\Phi \sin\Lambda & \sin\Phi \end{bmatrix} e_{ITRS}$$

A QDaedalus standard függővonal-elhajlás mérések esetén a kollimáció hiba és a fekvőtengely merőlegességi hibája összeolvad a tájékozási ismeretlenek meghatározásával, ami abból következik, hogy a mért csillagok zenitszögei közel azonosak. Továbbá az állótengely kompenzátor indexhibái is beolvadnak a tájékozási ismeretlenek és az indexhiba meghatározásába, ezért ezek nem határozhatók meg elkülönítve. A meghatározandó paraméterek a következők lesznek: Φ szintfelületi földrajzi szélesség, Λ szintfelületi földrajzi hosszúság, a tájékozási ismeretlen és az indexhiba.

A sztochasztikus modellben a mérésekhez hozzárendeljük a megfelelő középhibákat. A függetlennek tekintett mérésekhez meghatározzuk a súlyokat. Minden szükséges mennyiség meghatározása után elvégezzük a kiegyenlítést az V. kiegyenlítési csoport alapján [3.]. A kiegyenlítés legfontosabb eredményeként megkapjuk az álláspont szintfelületi földrajzi koordinátáit és a koordináták becsült középhibáit.

A robusztus kiegyenlítést elvégezhetjük a dán módszer alapján is. Ekkor a k -adik iteráció után a $k+1$ -dik iterációnál a súlyok a következőképpen változnak: (általában $s=3$)

$$p_{k+1} = p_k f(v_k)$$

$$f(v_k) = \begin{cases} 1, & \text{ha } \frac{|v_k| \sqrt{p_0}}{\mu_0} < s \\ \text{különbén} & \exp\left(\frac{-|v_k| \sqrt{p_0}}{s\mu_0}\right) \end{cases}$$

A mérési adatok feldolgozását a gyakorlatban a BME-n fejlesztett QDBME feldolgozó szoftverrel végeztük el az előzőekben leírtak alapján. A QDFeldolgozó szoftver futtatásához szükségünk volt néhány szöveges (txt) állományra, melyeket a méréskor mentett fájlokból nyertünk. A szükséges állományok a következők:

- Calibration.txt, ami a kalibrációs paramétereket tartalmazza
- Station.txt, amiben az álláspont ellipszoidi koordinátái találhatóak
- Observation.txt, az észlelések adataival
- iers.txt, a rendszerek közötti transzformációhoz szükséges földtájékozási paraméterekkel
- StarCat.txt, a csillagkatalógus adatokkal

A futtatáshoz szükséges paramétereket az input.txt tartalmazza, mint például a hőmérséklet és légnyomás értékek. Itt az eredményfájl neve is megadható. A mellékletben található egy mintafájl, ami a feldolgozott mérési eredményeket és azok pontossági mérőszámait tartalmazza.

4. Kiértékelés, észrevételek

Ebben a fejezetben röviden összefoglaljuk néhány tapasztalatunkat, észrevételünket az előkészületekkel, a mérésekkel és a feldolgozással kapcsolatban.

A mérések időszükséglete nem túl nagy. A néhány perces kalibrálást követően akár 15 perces méréssel is megfelelő pontosság érhető el, így egy éjszaka alatt több állásponton is elvégezhetjük a méréseket.

A kalibrációt egy négy pontból álló LED sorral oldottuk meg, amit a műszertől legalább 100 méter távolságra célszerű elhelyezni. Tapasztalataink szerint érdekesebb lenne több, kisebb LED-pontból álló jeltáblát készíteni, melyen elszórtan helyezkednek el pontok mátrixos formában, így tovább növelve a mérés megbízhatóságát.

A mérés megkezdése előtt rendkívül fontos a mérőállomás kompenzátorának megfelelő beállításait (Stability Check ON) elvégezni, ugyanis csak így érhető el a megfelelő pontosságú eredmények.

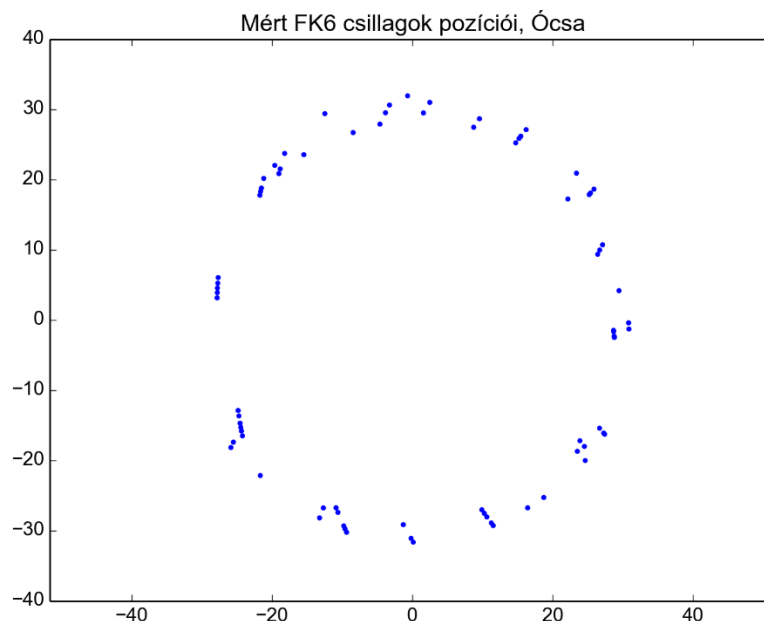
A mérés lebonyolítását illetően a rendszer még további fejlesztésekre szorul. Az egyes eszközök számítógéppel történő összekapcsolása kábelekkel történik, amiből számos nehézség adódhat a mérés során. Az egyik legnagyobb problémát a mérőállomáshoz tartozó rövid kábel jelentheti, ami egyes helyzetekben rácsavarodhat a műszerre, így kedvezőtlenül befolyásolhatja a mérést. Továbbá minden eszközt, a GPS-vevőt, a CCD érzékelőt és a mérőállomást is külön kell csatlakoztatni a számítógéphez, viszont a csatlakoztatott, nagyszámú USB eszközt nem minden esetben tudja megfelelően kezelni.

A technikai háttér mellett egy másik tényező, mely egyértelműen jelentősen befolyásolhatja a csillagászati-geodéziai méréseket, az az időjárás. Akár kisebb, részleges felhőzet is megakadályozhatja a mérés lebonyolítását, de a ködképződés is nagyon negatívan befolyásolhatja a mérési eredményeket, melyet az örkényi mérés során volt alkalmunk megtapasztalni.

Minden mérési ponton végeztünk legalább két kalibrációt, hogy az eredmények kiértékelésekor megvizsgáljuk azok összefüggését. Egy kalibráció két távcsőállásban végzett 10-10 mérését jelentett. A legtöbb esetben a 10 mérésből 4-5 mérést használtunk fel, de volt olyan kalibráció is, ahol csak kettőt. A különböző kalibrációk esetén viszont csak néhány század szögmásodperces eltéréseket tapasztaltunk.

A mérés során minden megírányzott csillagra több mérést végez a műszer, melynek értéke beállítható és alapbeállításban 4 mérést jelent. Tapasztalataink szerint az elvégzett mérések közül az első általában kevésbé pontos, mint a következő mérések, így ezek elhagyásával pontosabb eredményekhez juthatunk, ami szoftveres beállítással egyszerűen megoldható.

A 19. ábra az ócsai mérés során felhasznált csillagok pozícióit szemlélteti. Az ábrán jól látszik mért csillagok a (0,0) zenitpont körül egy $30^{\circ} \pm 2^{\circ}$ -os körgyűrűn helyezkednek el, viszonylag homogén eloszlásban.



19. ábra: ócsai ponton mért FK6 csillagok pozíciói (fokban)

Minden mérési ponton több mint 200 irányban mértünk. Az eredmények pontossága egyértelműen függ a mért irányok számától, azaz mérés időtartamától, így a pontosság növelésének egy lehetséges módja, ha a hosszabb mérés időtartamának növelése.

A feldolgozás eredményeként az álláspont szintfelületi földrajzi koordinátái és a függővonal-elhajlás összetevőinek értéke mellett megkapjuk azok pontossági mérőszámait is. Általában 0.1 szögmásodperces középhibákat kaptunk, viszont az örkényi mérés esetén ez háromszor nagyobbra adódott. Ennek oka lehet, hogy egy olyan főút mellett végeztük a mérést, ami nagy forgalmat bonyolít le még az esti időszakban is, ami jelentősen befolyásolja a kompenzátor működését. Továbbá a mérés során a műszer többször körbefordult, ami a kábel feltekeredését eredményezte, és amit annak folyamatos átemelésével tudtunk megoldani. A kábel folyamatos mozgatása egyértelműen negatívan hatott az eredmények pontosságára.

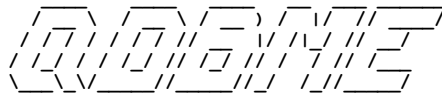
2. táblázat: A középhiba értékek az egyes pontokon

Mérési pontok	É-D irányú függővonal elhajlás középhibája	K-NY irányú függővonal elhajlás középhibája
1. Ócsa	±0.13"	±0.12"
2. Alsónémedi	±0.11"	±0.11"
3. Bugyi Kelet	±0.12"	±0.10"
4. Bugyi Dél	±0.25"	±0.26"
5. Újhartyán	±0.10"	±0.10"
6. Örkény	±0.30"	±0.24"

Az egytized szögmásodperces érték azt jelenti, hogy a függőleges iránya 2 km-en csak 1 mm-es középhibával tér el a helyes értéktől, így a rendszer valóban alkalmas a függővonal-elhajlás értékek, vagyis a helyi függőleges iránynak szélső pontosságú meghatározására.

A QDaedalus rendszer nagy megbízhatósággal alkalmazható a csillagászati-geodéziai mérések lebonyolításához és a mérési eredmények feldolgozásához, a szintfelületi földrajzi koordináták meghatározásához és a geoidi függővonal-elhajlás értékek számításához. Gyakorlati alkalmazása kisebb költségeket és kisebb időszükségletet jelent, mint az ugyanezre a célra alkalmazott zenitkamerás mérési módszerek. A QDaedalus rendszer gyors és hatékony módszert biztosít a Föld elméleti alakjának, a geoidnak a meghatározásához, így nagy jelentőséggel bír mind az elméleti, mind pedig a gyakorlati geodéziában.

5. Mellékletek



BME QDaedalus feldolgozó szoftver, v.1.3
Dr. Tóth Gyula, 2015.
BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék

Álláspont adatok

álláspont száma: 1
ellipszoidi földrajzi szélesség: 47-18-9.9594
ellipszoidi földrajzi hosszúság: 19-10-47.5554
ellipszoid feletti magasság : 149.136 m
GPST - UTC különbség : 17 s
hőmérséklet : 9.8 °C
légnyomás : 1032.0 hPa

Mérési adatok

a kompenzátor dőlési hibák alapján nem történt szelekció
minden csillagra az első iránymérés elvetve, 327 mérésből 254 db. kiválasztva

a teljes mérési idő : 26.2 perc

Ssz	FK6 sz.	Dátum	UTC időpont	mérőáll. Hz	mérőáll. V	CCD-x	CCD-y	k.haránt	k.hossz	k.po
1	723	2015.10. 1.	19 h 50 m 7.971 s	329-57-16.01	28-14-18.91	382.87	509.50	2.96"	8.69"	1"
2	723	2015.10. 1.	19 h 50 m 10.799 s	329-57-16.33	28-14-18.16	384.46	505.62	3.10"	7.80"	1"
3	723	2015.10. 1.	19 h 50 m 13.961 s	329-56-42.30	28-14-57.40	382.50	511.41	3.29"	8.15"	1"
4	880	2015.10. 1.	19 h 50 m 40.185 s	133-35-36.58	29-52-11.64	381.19	514.22	-0.81"	-4.57"	1"
5	880	2015.10. 1.	19 h 50 m 43.982 s	133-37-35.35	29-51-32.15	384.89	511.72	-0.14"	-5.46"	1"
6	880	2015.10. 1.	19 h 50 m 48.185 s	133-38-45.54	29-51- 3.63	381.68	512.00	0.97"	-3.79"	1"
7	1510	2015.10. 1.	19 h 50 m 59.938 s	255-45-46.92	28-23-58.75	384.10	510.32	10.42"	2.68"	1"
8	1510	2015.10. 1.	19 h 51 m 2.969 s	255-46-34.22	28-24-39.18	384.01	513.07	10.46"	3.20"	1"
.
.
.

Kalibrációs paraméterek

képközéppont :
x0 : 355.61 +- 0.02 pixel
y0 : 551.78 +- 0.02 pixel
affin transzformáció :
a11 : 3.976906 +- 0.000886 "/pixel
a12 : -0.062532 +- 0.000767 "/pixel
a21 : 0.068551 +- 0.000886 "/pixel
a22 : 3.980776 +- 0.000767 "/pixel

IERS paraméterek

póluskoordináták :
xp : 0.2211 "
yp : 0.3367 "

UT1 - UTC : 0.2466 sec
TAI - UTC : 36 sec

határmagnitúdó : 5.46

napi aberráció jav. : van

A kiegyenlítés jellemzői

iterációk száma : 2 (20)
mért irányok száma : 254
durva hiba korlát a tisztatagra : 20.0 "
emiatt eliminált irányok száma : 0
ismeretlenek száma : 4
fölszámítások száma : 504
apriori súlyegység középhiba : 1.000
aposteriori súlyegység középhiba : 0.843
<0.10 relatív súlyú mérések száma : 0
iránymérési középhibák :
vízszintes szögmérés : +- 10.000 "
zenitszögmérés : +- 1.000 "
CCD mérési középhibák :
x koordináta : +- 0.300 pixel
y koordináta : +- 0.300 pixel

A kiegyenlített paraméterek

szintfelületi földrajzi szélesség : 47° 18' 9.76" +- 0.11"
szintfelületi földrajzi hosszúság : 19° 10' 51.10" +- 0.16"
É-D irányú függővonal elhajlás : -0.19" +- 0.11"
K-Ny irányú függővonal elhajlás : 2.41" +- 0.11"
tájékozási ismeretlen : 0° 0' 1.83" +- 0.56"
indexhiba : -0.23" +- 0.08"

A mérések statisztikái

a dán módszerben használt paraméter értéke : 3

Ssz	FK6 sz.	l.Hz	l.V	elim.	k.u.rel.súlyok				jav.Hz	jav.V	jav.x	jav.y	súly	magn
1	723	-0.77"	-2.75"		1.000	1.000	1.000	1.000	-0.82"	-0.47"	0.01 px	0.01 px		3.07
2	723	-1.51"	-2.83"		1.000	1.000	1.000	1.000	-2.28"	-0.51"	0.02 px	0.02 px		3.07
3	723	-1.56"	-3.00"		1.000	1.000	1.000	1.000	-2.38"	-0.58"	0.02 px	0.02 px		3.07
4	880	-6.77"	0.47"		1.000	1.000	1.000	1.000	-6.14"	-0.49"	0.05 px	0.05 px		4.58
5	880	-7.01"	2.17"		1.000	1.000	1.000	1.000	-6.60"	0.21"	0.05 px	0.05 px		4.58
6	880	-5.98"	0.55"		1.000	1.000	1.000	1.000	-4.65"	-0.46"	0.04 px	0.04 px		4.58
7	1510	-6.73"	-2.27"		1.000	1.000	1.000	1.000	-7.75"	0.10"	0.06 px	0.06 px		4.74
.

QDBME output vége

6. Irodalomjegyzék

- [1.] Biró P. – Ádám J. – Völgyesi L. – Tóth Gy.: A felsőgeodézia elmélete és gyakorlata. Budapest: HM Zrínyi Térképészeti és Kommunikációs Szolgáltató Nonprofit Kft, 2013.
- [2.] Bürki B. – Guillaume S. – Sorber P. – Oesch H P: DAEDALUS: A Versatile Usable Digital Clip-on Measuring System for Total Stations. 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15-17 September 2010, Zürich, Switzerland
- [3.] Detrekői Ákos: Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [4.] Völgyesi L. – Tóth Gy. – Bürki B. – Guillaume S: Precise Astronomical Azimuth Determination by QDAEDALUS System to the Sun, Moon, and Planets in Daytime Conditions, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2014.
- [5.] Völgyesi L. – Tóth Gy.: A QDaedalus rendszer geodéziai alkalmazása. Rédey szeminárium, 2013.