

# A QDaedalus rendszer kalibrációja

*Völgyesi Lajos – Tóth Gyula*

A QDaedalus rendszer GNSS technikával kiegészített számítógéppel vezérelt automatikus észlelőrendszer, amely elsősorban csillagászati-geodéziai mérésekre alkalmazható. A mérések előtt a legfontosabb lépés a műszer kalibrálása. Ennek során kapcsolatot kell teremteni a mérőállomás vízszintes és magassági körén, illetve a CCD érzékelő koordináta-rendszerében adódó leolvasások között. A korábbi eljárással éjszaka, terepi körülmények között a kalibráció meglehetősen körülményes volt és nem elégítette ki az igényeknek megfelelő mérési pontosságot sem. A probléma megoldására olyan új módszert és eszközt fejlesztettünk, amellyel a kalibráció egyszerűbben és pontosabban megoldható. Vizsgálatokat végeztünk az optimális kalibrációs mérésszámra és raszter-méretre vonatkozóan, illetve vizsgáltuk a mérések hőmérsékletfüggését is.

Tapasztalataink minden olyan esetben eredményesen hasznosíthatók, amikor geodéziai műszereket átalakítunk, az okulárlencse helyére CCD érzékelőt szerelünk fel.

## Bevezetés

A QDaedalus rendszer elsősorban asztrogeodéziai mérések felhasználásával függővonal-elhajlások meghatározására használható. Alapeszköze egy GNSS rendszerrel kiegészített és megfelelőképpen átalakított Leica TCA1800 mérőállomás (Völgyesi és Tóth 2016; Tóth és Völgyesi 2016). A mérőállomás átalakítása az optikai rendszert érinti, a műszer okulárját nagy felbontású és igen nagy érzékenységgű CCD érzékelőre cseréljük. A GNSS két irányban szolgáltat adatokat: a CCD érzékelőt és a vezérlő számítógépet a csillagászati felvételek készítéséhez pontos időjellel látja el, továbbá a függővonal-elhajlás számításához meghatározza a WGS84 koordinátákat. A teljes rendszer vezérlését és az adatfeldolgozást a QDaedalus szoftver végzi. Vezérli a mérőállomás mozgását, a távcső fókuszálását, fogadja és feldolgozza a CCD érzékelő képeit, kezeli a GNSS adatokat, asztrogeodéziai mérések esetén meghatározza a csillagok, a Nap, Hold és a bolygók pillanatnyi topocentrikus koordinátáit, adatbázisba rendezi a kiinduló és a mért értékeket, kiegyenlítéssel a helyszínen meghatározza a keresett függővonal-elhajlás, vagy azimut értékeket. A QDaedalus rendszer vázlatos felépítése az 1. ábrán látható.

## A kalibráció alapeve

A mérések kezdetén a legfontosabb lépés a műszer kalibrálása (Völgyesi és Tóth 2016). Ennek során kapcsolatot kell teremteni a mérőállomás vízszintes és magassági körén tett  $\ell$ ,  $z$  illetve a CCD érzékelő koordináta-rendszerében adódó  $x$ ,  $y$  leolvasások között (2. ábra).

A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövét a kalibrálásra kiválasztott megírányzott pont (cél tárgy) környezetében kis lépésekben körülmozgatja miközben a vízszintes irányértékek és a zenitszögek leolvasása mellett a CCD érzékelő is regisztrálja a ponthelyeket. A lehetséges műszerhibák kiküszöbölése és a megfelelő pontosság elérése céljából ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) helyzetben ( $j = 1, 2$ ) távcsőállásban végezzük a kalibrációs méréseket és rögzítjük az  $\ell_{ij}$  irányértékeket, a  $z_{ij}$  zenitszögeket, valamint a képfeldolgozás során meghatározzuk a CCD érzékelő 2. ábra bal oldalán látható  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  koordináta-rendszerében az  $x_{ij}, y_{ij}$  értékeket. A CCD érzékelőhöz definiált koordináta-rendszer

kezdőpontja az általa készített kép bal felső sarkában lévő pixelpont közepe, az  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  tengelyek pedig egymásra merőlegesek és párhuzamosak a CCD érzékelő szélével. Az  $x_{ij}, y_{ij}$  értékekből az

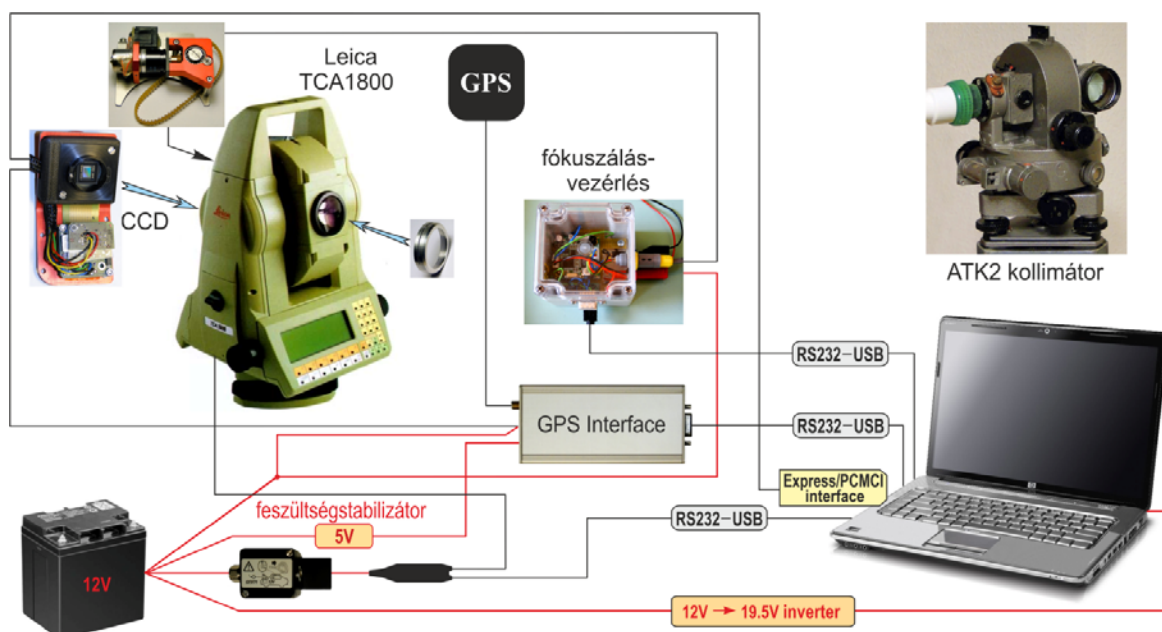
$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_{i1} + x_{i2}}{2} \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{i1} + y_{i2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

összefüggésekkel képezhető a kalibráció szempontjából fontos  $\bar{x}, \bar{y}$  középérték ( $\bar{x}, \bar{y}$  a távcső optikai tengelypontjának – az ún. *vezérpont (képfőpont)* – koordinátái a CCD érzékelő síkján), amihez viszonyítva meghatározhatók a 2. ábrán látható  $\delta x_{ij} = x_{ij} - \bar{x}$ ,  $\delta y_{ij} = y_{ij} - \bar{y}$  eltérések. A CCD érzékelő koordináta-rendszere és a mérőállomás szögleolvasásai közötti kapcsolat az

$$\ell_{ij} = \ell + \delta \ell_{ij} = \ell + \frac{1}{\sin z_{ij}} (a_{11}(x_{ij} - \bar{x}) + a_{12}(y_{ij} - \bar{y})) \quad (2)$$

$$z_{ij} = z + \delta z_{ij} = z + (a_{21}(x_{ij} - \bar{x}) + a_{22}(y_{ij} - \bar{y})) \quad (3)$$

összefüggésekkel adható meg (Bürki et al 2010). Ez egyszerű 6 paraméteres affín transzformáció a két rendszer között, amelyben ha ismerjük az  $\ell_{ij}, z_{ij}$  műszerleolvasásokat és a CCD érzékelővel meghatározott  $x_{ij}, y_{ij}$  értékeket, akkor a (2), (3) alapján, az (1) figyelembevételével, a hat ismeretlen  $\ell, z, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  paraméter meghatározása pl. a legkisebb négyzetek módszerének felhasználásával egyszerűen megoldható. A kalibrációt a rendszer minden új összeszerelése után, vagy minden olyan esetben újra el kell végezünk, amikor akár a legkisebb mértékben megváltoztatjuk a CCD érzékelő helyzetét. Mivel a kalibrációs paraméterek a fókusz állításakor és a hőmérséklet változásával is módosulhatnak (Knoblach 2009; Bürki és mások 2010), ezért vizsgálatokat tervezünk a tényleges mérésekkel egyidőben történő meghatározásukra.



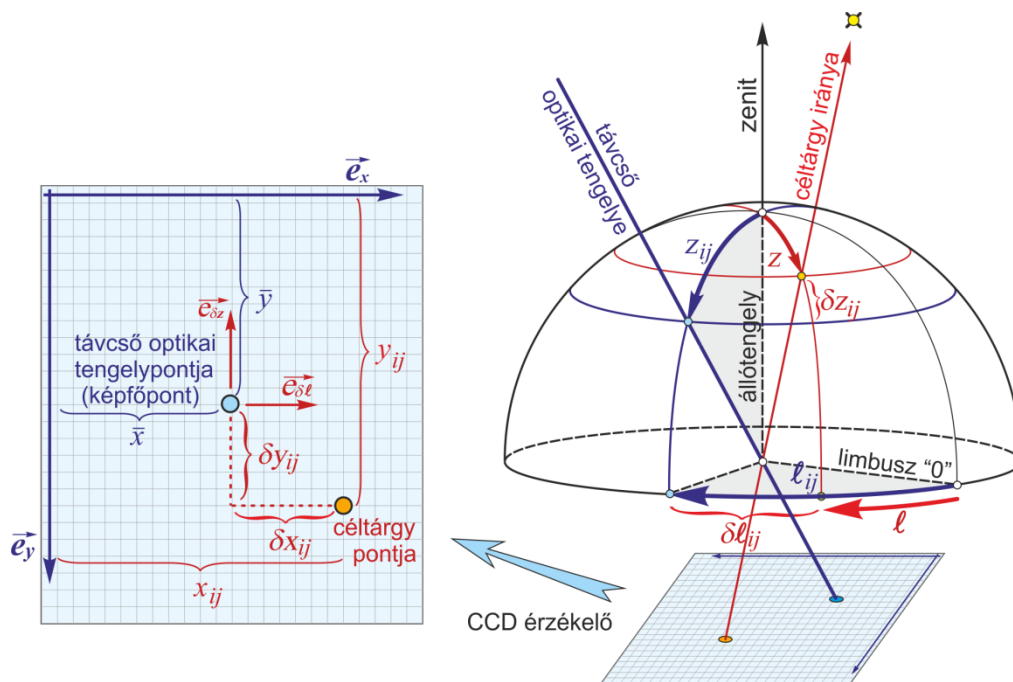
1. ábra. A QDaedalus rendszer vázlatos felépítése

Az  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  kalibrációs paraméterek és a vezérpont (képfőpont)  $\bar{x}, \bar{y}$  koordinátáinak ismeretében a CCD leolvasással pontosított  $\ell^*, z^*$  értékek:

$$\ell^* = \ell_i - \frac{1}{\sin z_i} [a_{11}(x_i - \bar{x}) + a_{12}(y_i - \bar{y})], \quad (4)$$

$$z^* = z_i - [a_{21}(x_i - \bar{x}) + a_{22}(y_i - \bar{y})], \quad (5)$$

ahol  $\ell_i, z_i$  a mérőállomás vízszintes és magassági körén rögzített leolvasások,  $x_i, y_i$  pedig a CCD érzékelő koordináta-rendszerében meghatározott értékek.

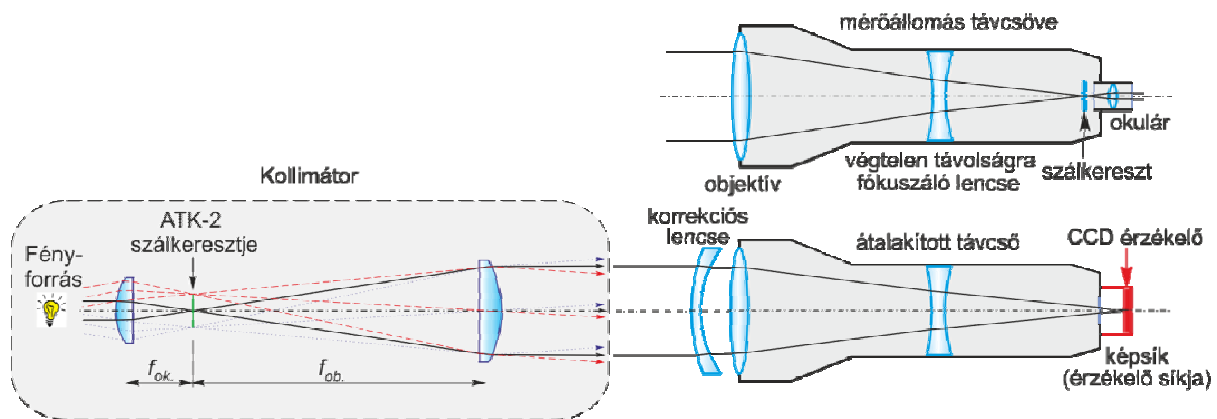


2. ábra. A kalibráció alapelve

## A kalibráció technikai megoldása

A kalibrációt minden esetben el kell végeznünk, amikor a CCD érzékelőt felhelyezzük a mérőállomásra, elmozdítjuk, vagy megváltoztatjuk a rögzítését. Csillagászati mérések esetén a mérőállomás parallaxisát végtelenre kell állítani ezért a kalibrációt is ebben a helyzetben kell elvégezni, mivel a CCD érzékelőn csak a végtelenben elhelyezkedő tárgyról alakulhat ki éles kép. A kalibrációhoz kezdetben száz-kétszáz méteres távolságban elhelyezett mozdulatlan LED diódákat alkalmaztunk, azonban éjszaka terepi körülmények között ezek megfelelő használata és kezelése igen komoly nehézségekbe ütközött, ráadásul még a több száz méteres távolságban elhelyezett fényforrásokról sem alakult ki teljesen éles kép a CCD érzékelőn. Megpróbáltuk a kalibrációhoz az  $\alpha$  Ursa Min. (Poláris) csillagot is használni, azonban a mozgása miatt ez sem volt alkalmas a pontos kalibrációra mivel nem pontosan a Föld forgástengelyének irányában található és a kalibráció során elmozdul a képe a CCD érzékelőn. Ezek után olyan megoldást kellett keresnünk, amely terepi körülmények között éjszaka is alkalmas az egyszerű és pontos kalibrációra.

A problémát kollimátor alkalmazásával sikerült megoldanunk, amelynek alapelvét a 3. ábrán láthatjuk.

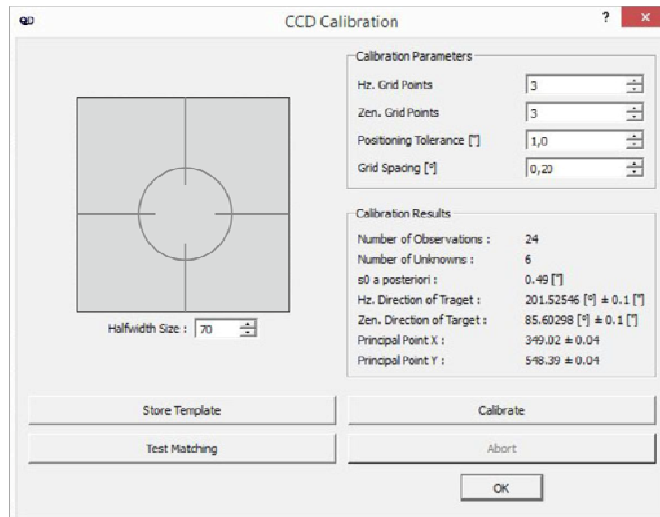


3. ábra. A kollimátor elvi működése és alkalmazása a kalibráció céljára

A kollimátorunk olyan segédtávcső, mely az okulár oldali fókuszpontjában elhelyezett tárgyról párhuzamos fénysugarakat állít elő, mint amilyen párhuzamos fénysugarak a végtelen távoli tárgyról (csillagokról) érkeznek a műszerünkbe. A kalibrációs mérések céljára készített 4. ábrán látható kollimátorunk egy megfelelően átalakított ATK-2 csillagászati műszer, amelynek parallaxisa rögzítetten végtelenre van állítva. Az ATK-2 műszerben kalibrációra alkalmas tárgy a fókuszpontban elhelyezett szálkereszt, amely megvilágítására speciális LED világítást készítettünk. Az 5. ábrán a QDaedalus szoftver kalibrációs ablakában kalibrációs jelekként az ATK-2 műszer szálkeresztjének képe látható.



4. ábra. Az ATK-2 kollimátor és a kollimátoros kalibrálás laboratóriumi testje

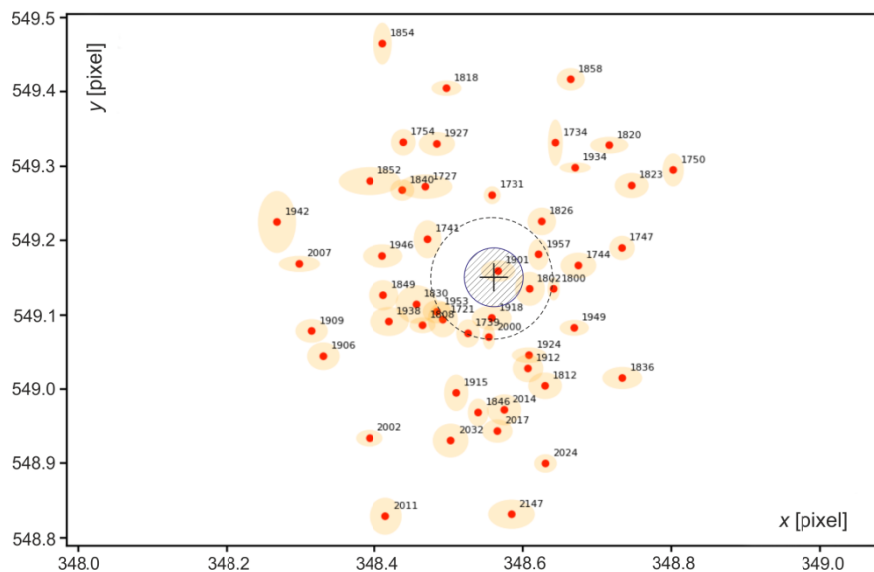


5. ábra. A vezérlőszoftver kalibrációs ablaka és benne a kollimátor szálkeresztje mint kalibrációs jel

## A kalibrációs mérések optimális száma

A kalibráció legfontosabb kérdése a kalibrációs mérések optimális száma. A mérések számának növelésével fokozható a képfőpont  $\bar{x}, \bar{y}$  koordinátáinak, valamint a meghatározandó  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  kalibrációs paraméterek pontossága, ugyanakkor a nagyobb pontosságért a hosszabb mérési idővel kell fizetünk. A kérdés tehát, hogy mennyi mérést kell elvégeznünk ahhoz, hogy a lehető legrövidebb idő alatt a szükséges pontosságot elérjük? Legalább három mérésre biztosan szükségünk van, mivel ha két mérés jelentősen eltér egymástól, nem lehet eldönteni, hogy melyik a hibás.

A vizsgálatokhoz ötven kalibrációs mérést végeztünk a kollimátor szálkeresztjére a CCD érzékelő ugyanazon rögzített helyzetében azonos hőmérsékleten és változatlan optikai beállítás (parallaxis) mellett,  $3 \times 3$  méretű kalibrációs mátrix pontjaiban. Az ötven mérésből meghatároztuk a CCD érzékelőn a képfőpont koordinátáinak középértékét. A 6. ábrán a képfőpontok és hibaellipsziseik eloszlása látható a CCD érzékelőn, a középső kereszt pedig a képfőpont átlagos helyzetét mutatja. Az egyes kalibrációs mérések középhibái alapján az 50 mérésből számítható átlagos képfőpont középhiba  $x$  és  $y$  irányban is  $\pm 0.02$  pixel.



6. ábra. Képfőpontok és hibáik eloszlása a CCD érzékelőn. A középső kereszt a képfőpont átlagos helye.

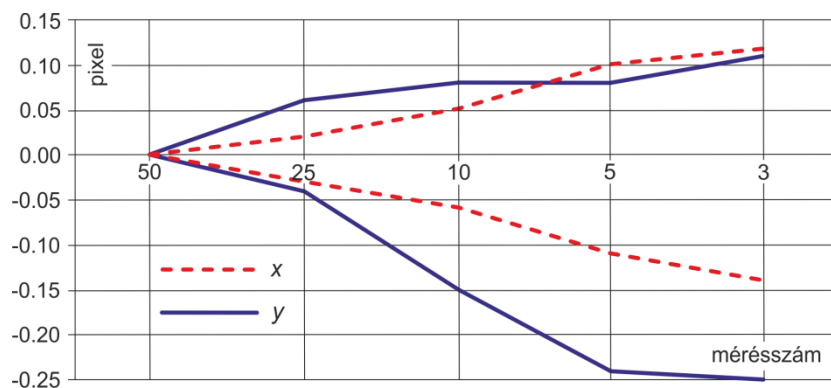


Az 50 kalibrációs mérésből a mérések optimális számának megállapításához véletlenszerűen kiválasztottunk 25, 10, 5, és 3 mérést tartalmazó csoportokat 10-10 különböző kombinációban, majd mindegyik csoportban meghatároztuk a képfőpont átlagos helyzetét és ennek eltolódását az 50 mérésből adódó képfőpont átlagos helyéhez viszonyítva. Kiszámítottuk az egyes kalibrációk, illetve kalibrációs csoportok által meghatározott képfőpont koordinátáinak középhibáit is, amelyeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. A táblázat adatai alapján látható a mérésszám csökkentésével a középhibák növekedése.

1. táblázat. A képfőpontok középhibáinak változása a mérésszám függvényében.

mérésszám	$\Delta x$ [pixel]	$\Delta y$ [pixel]
50	0.02	0.02
25	0.02	0.03
10	0.04	0.04
5	0.05	0.05
3	0.06	0.08

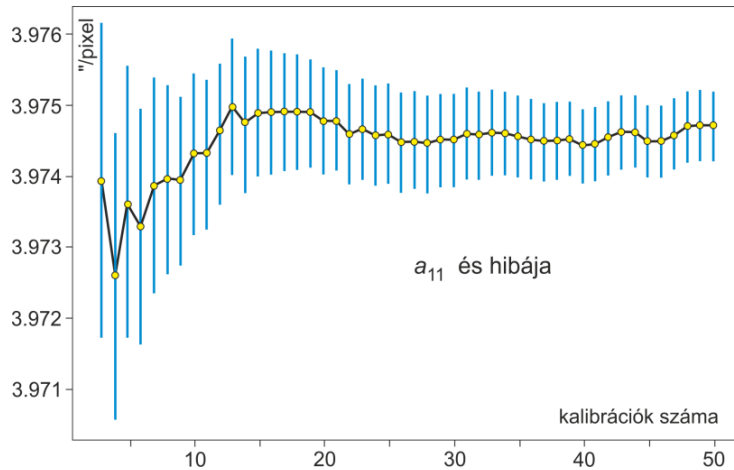
A kalibrációs mérések optimális számának meghatározásához fontos információ, hogy az egyes mérési csoportokban mekkorák az 50 mérésből kialakított képfőpont koordinátáihoz képest a legnagyobb pozitív és negatív eltérések. A 7. ábrán látható diagram azt mutatja, hogy a kalibrációs mérések számának csökkenésével egyre jobban nő a képfőpontok koordinátáinak eltérése az 50 mérésből meghatározott értékhez viszonyítva.



7. ábra. A legnagyobb pozitív és negatív eltérések a kalibráció számának csökkentése esetén x és y irányban az 50 kalibrációs mérés átlagos képfőpontjához viszonyítva.

Vizsgálataink alapján megállapítható, hogy ötnél kevesebb mérés esetén már nem várható a fél tized pixel alatti pontosság sem. A 6. ábra tanúsága szerint a képközéppontok a sraffozott belső körön belül várhatóak 10 vagy ennél magasabb ismétlésszám esetén, míg 5 ismétlésszám alatt már nagy eséllyel a szaggatott körön kívüli területre is eshetnek a pontok.

Hasonló eredményre jutunk az  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  kalibrációs paraméterek vizsgálata során is. A QDaedalus szoftver a képfőpont  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  koordinátái mellett a (2) és a (3)-ban szereplő  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  kalibrációs paramétereket is meghatározza. Külön megvizsgáltuk az egyes kalibrációs paraméterek értékének és hibájának változását a kalibrációs mérések számának függvényében. A 8. ábrán példaképpen az  $a_{11}$  paraméter értékének és hibájának változása látható a kalibrációk számának növelésével 1-től 50-ig. A vizsgálatainkból megállapítható, hogy kezdetben a kalibrációs paraméterek értéke nagy hibával jelentősen változik, viszont kb. a 12.-13. méréstől már felvesznek egy olyan értéket, ami a későbbiekben alig változik és innen már a meghatározás hibája is kisebb és csak nagyon keveset javul. Gyakorlatilag ugyanez jellemző az  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  kalibrációs paraméterekre is.



8. ábra. Az  $a_{11}$  kalibrációs paraméter értékének és hibájának változása a kalibrációs mérésszám függvényében.

Összegezőképpen a vizsgálataink alapján megállapítható, hogy a QDaedalus rendszer használata során legalább 10 kalibrációs mérést érdemes csinálni, viszont 15-nél több mérés már nem javítja számottevően az eredményeket, tehát a 10-15 közötti kalibrációs mérés látszik a legjobb kompromisszumnak a pontosság és a hozzá szükséges mérési idő tekintetében.

### Az optimális kalibrációs mátrixméret

A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövét a kalibrálásra kiválasztott megírányzott pont (céltárgy) környezetében kis lépésekben meghatározott sorrendben körülmozgatja. A CCD érzékelő kalibrációs mérésbe bevont területe a kalibrációs mátrix mérete és a ráctávolság függvényében változtatható.

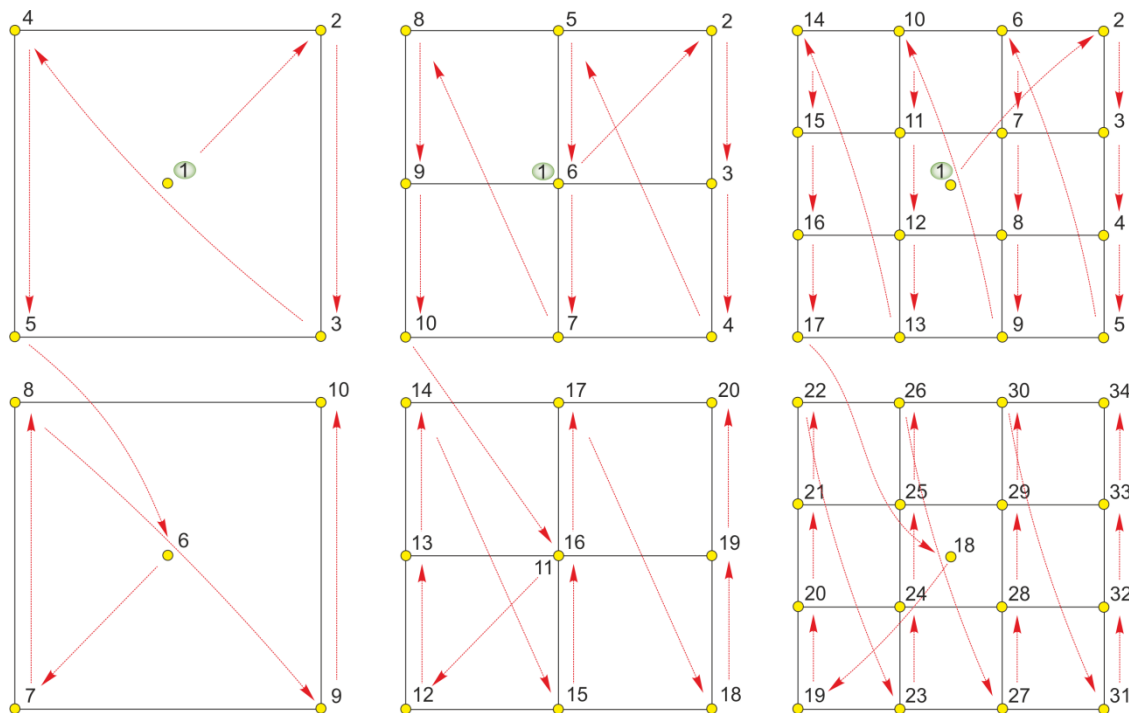
A QDaedalus szoftver alapértelmezésben  $3 \times 3$  méretű kalibrációs mátrix pontjai mentén a 9. ábra középső részén mutatott sorrendben mozgatja végig a műszer távcsövét első és második távcsőállásban. A ráctávolság alapértelmezésben 0.2 fok, amivel a CCD érzékelő nagyobb területét vonjuk be a kalibrációba. Választhatunk más ráctávolságot is, pl. 0.05 fok esetén a CCD érzékelőnek csak azt a kisebb, középpont körüli részét vonjuk be a vizsgálatba, ahova egyébként általában esetben a mérés során a csillagok leképződnek.

Lehetőség van a CCD érzékelő kérdéses területének finomabb felbontású kalibrációs vizsgálatára is a mátrix méretének növelésével és a ráctávolság csökkentésével. A 9. ábra jobb oldali részén példaként a  $4 \times 4$  méretű kalibrációs mátrix mérési pontjainak elhelyezkedését és a távcső mozgatási sorrendjét láthatjuk.

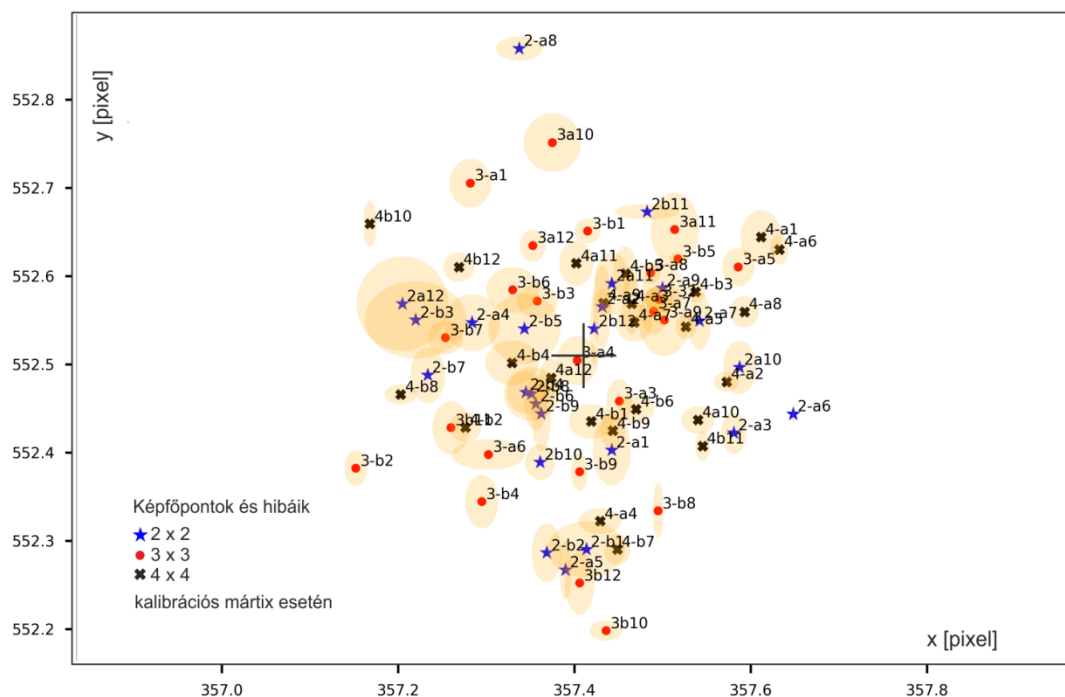
Vizsgálataink során arra kerestünk választ, hogy többször ismételt mérésekkel kisebb (pl.  $2 \times 2$ ) méretű, vagy kevesebb ismétléssel, de nagyobb (pl.  $4 \times 4$ ) méretű kalibrációs mátrixra végzett méréssel jutunk-e jobb eredményre. Méréseinket a 9. ábrán látható  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , valamint  $5 \times 5$  és  $6 \times 6$  méretű kalibrációs mátrixokra is elvégeztük úgy, hogy közben a ráctávolság változtatásával a CCD érzékelőnek ugyanarra területére korlátoztuk a méréseinket. Az  $5 \times 5$  és  $6 \times 6$  méretű rácpontok mentén mérve már a mérések kezdetén nyilvánvalóvá vált, hogy ezekben az esetekben csak a mérési időtartam növekszik meg jelentősen bármiféle pozitív hozadék nélkül, ezért ezekkel a lehetőségekkel a továbbiakban nem foglalkozunk.

Kalibrációs méréseinket úgy végeztük, hogy minden változatban kétszer 12 (összesen 72) mérést végeztünk  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ , majd újból  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$  méretű esetek sorrendjében. A különböző kalibrációs mátrixok esetére vonatkozó vizsgálataink eredményeit (a képfőpontok

területi eloszlását) a 10. ábrán mutatjuk be, a számszerű eredményeket pedig a 2. táblázatban foglaltuk össze.



9. ábra. A távcső kalibrációs mozgása  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  és  $4 \times 4$  méretű mátrix sarokpontjai mentén I. és II. távcsőállásban



10. ábra. Képfőpontok és hibáik  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  és  $4 \times 4$  méretű kalibrációs mátrix esetén

A 10. ábrán látható, hogy a képfőpontok elrendezésében semmiféle szabályszerűség nem mutatkozik, a különböző felbontású kalibrációs mátrixokra vonatkozó mérések eredményei véletlenszerűen keverednek, a kereszttel jelölt átlagos helyzetű képfőpont körül egyformán szóródnak. Ezt alátámasztják a 2. táblázat adatai is, amelyek szerint a kalibrációs mátrix méretének növelésével a képfőpont helyzete mindössze század pixel nagyságrenddel változik



és az átlagos képfőpont helyzetéhez viszonyított legnagyobb pozitív és negatív eltérésekben sincs számottevő különbség. Ugyanakkor jelentős különbség van a mérési időben, a táblázat utolsó oszlopában egy-egy kalibrációs mérés teljes időtartama látható (a teljes időtartamba beletartozik az adott kalibrációs mérés paramétereinek beállítása, a tényleges mérés időtartama és az adatok mentése ellenőrzéssel). Látható tehát, hogy a 2×2 mátrixméret esetében a mérés szükséges időtartama 1 perc 25 sec, a 3×3 esetben 2 perc 20 sec és a 4×4 esetben 3 perc, (5×5 mátrixméret esetén már közel 5 perc).

2. táblázat. A képfőpont helyzete és hibái a kalibrációs mátrix méretének függvényében.

Mátrix- méret	Képfőpont helyzete és hibái				Legnagyobb + és – eltérések				
	x[pixel]	mx	y[pixel]	my	$\Delta x_{\max}$	$\Delta x_{\min}$	$\Delta y_{\max}$	$\Delta y_{\min}$	t [sec]
Összes	357.41	±0.04	552.51	±0.05	0.26	-0.24	0.26	-0.24	–
2x2	357.40	±0.05	552.50	±0.05	0.20	-0.25	0.21	-0.17	85
3x3	357.43	±0.03	552.49	±0.04	0.28	-0.18	0.29	-0.16	140
4x4	357.44	±0.03	552.51	±0.04	0.24	-0.19	0.22	-0.15	180

Összességében megállapítható tehát, hogy a kalibrációs mátrix méretének növelése a mérés időtartamának jelentős növekedése ellenére sem eredményezi a képfőpont helyzeté pontosságának szignifikáns növekedését. Megfelelő tehát a 2×2 méret, de a 4×4-es méret alkalmazása biztosan fölösleges. Az optimális megoldás tehát a kis mátrixméret mellett a mérésszám növelése.

## Hőmérsékletfügés

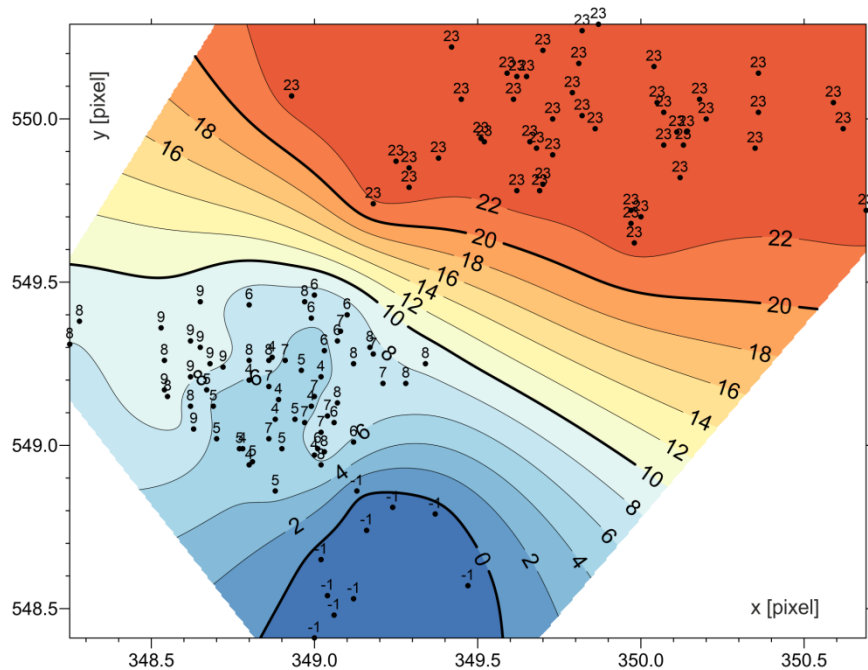
A hőmérséklet változása a lineáris hőtágulás elméletének megfelelően mind az optikai rendszer, mind a CCD érzékelő és rögzítésének apró deformációit okozza, ami következtében várható a képfőpont helyzetének megváltozása. A kérdés a változás mértéke, illetve, hogy ez mekkora hibát okoz a rendszer működésében? A méréseket tág hőmérsékleti tartományban, -1 és +23 °C között végeztük, mindvégig gondosan ügyeltünk a CCD érzékelő változatlan helyzetére és közben a végtelenre fókuszáló parallaxiscsavar állását sem változtattuk meg. A méréseinket téli napokon végeztük, a kalibrációt minden esetben először fűtött helyiségben +23 °C hőmérsékleten kezdtük, majd a méréseket külső térben alacsonyabb (+9, +8, +7, +6, +5, +4 és -1 °C) hőmérsékleteken folytattuk. Fontos szempont volt, hogy a külső mérések megkezdése előtt minden esetben legalább egy órát pihentettük a mérőberendezést, hogy teljes egészében átvegye a külső alacsonyabb hőmérsékletet.

A mérési eredményeket a 11. ábrán szemléltetjük, ahol a képfőpont helyzetének változását láthatjuk a hőmérsékletváltozás függvényében. A képfőpontok helyzetét mutató fekete pontok melletti számok az adott pixelhelyezethez tartozó hőmérsékleti értékeket mutatják, a hőmérsékleti izovonalak pedig azokat a területeket veszik közre, ahol adott hőmérséklet mellett a képfőpontok találhatóak.

Megállapítható, hogy csökkenő hőmérséklet mellett a CCD érzékelőn egyértelműen eltolódik a képfőpont helyzete  $x$  és  $y$  irányban is az alacsonyabb értékek felé. Az eltolódás mértéke jelentős, 20 fokos hőmérsékletkülönbség esetén legalább 1 pixel. Ugyanakkor a 11. ábra középső részén megfigyelhető, hogy kisebb, 1-2 fokos hőmérsékletváltozás esetén már egymásba csúsznak a képfőpontok, vagyis 1-2 fokos hőmérsékletváltozás által okozott hiba már belecsúszik az egyéb véletlenszerű hibák mérési zajába.

Az éjszakai csillagászati mérések során a derült idő és a magas kisugárzás természetes következménye a fokozatos hőmérsékletcsökkenés. A csökkenés kezdetben gyors, óránként több fok is lehet. A kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése közötti rövidebb

mérési időtartam alatt a levegő csökkenő hőmérsékletváltozása még nem okoz számottevő problémát (a hőmérsékletváltozás okozta hiba beleolvad az ismeretlen általános mérési zajba) viszont hosszabb mérési időtartam, vagy gyors hőmérsékletcsökkenés már a mérési zajból kiemelkedő jelentősebb mérési hibákat okoz.



11. ábra. Képfőpont helyzetének változása a hőmérsékletváltozás függvényében

A hőmérsékleti vizsgálatainkból levonható legfontosabb következtetés, hogy fűtött helyiségből alacsonyabb hőmérsékletű terepi mérésekre kiszállítva a műszereket, a mérés megkezdése előtt meg kell várni, hogy a műszerek (a műszerek belső optikai szerkezete is) teljesen átvegyék a külső hőmérsékletet. A teljes hőmérsékleti egyensúly kialakulásához elsősorban télen, nagy hőmérsékletkülönbségek esetén hosszabb időtartam szükséges, ami akár egy óra is lehet.

Ugyanazon ponton a kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése között eltelt időben nem lehet 1-2 foknál nagyobb a hőmérsékletváltozás. Jelentősebb éjszakai lehülés (hőmérsékletcsökkenés) esetén célszerű a csillagászati mérés előtt és után is kalibrációs méréseket végezni és a kettő átlagából kiszámítani a képfőpont helyzetét és az  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  paramétereket. Emiatt a mérések során fontos a hőmérsékletváltozás folyamatos figyelése.

## Összefoglalás

A QDaedalus csillagászati-geodéziai mérések kezdetén a legfontosabb lépés a műszer kalibrálása, mely során kapcsolatot kell teremteni a mérőállomás vízszintes és magassági körén, illetve a CCD érzékelő koordináta-rendszerében adódó leolvasások között. A kalibrálás céljából a mérőállomás szervomotorja a műszer távcsövét a kalibrálásra kiválasztott céltárgy (a megírányzott pont) környezetében kis lépésekben meghatározott sorrendben körülmozgatja a kalibrációs mátrix pontjai mentén. A kalibráció alapelveinek tisztázását követően foglalkoztunk a kalibrálás gyakorlati megoldási problémáival, majd a problémák megoldására kollimátor alkalmazásával új egyszerű és pontos technikai megoldást mutattunk be.

A méréseink és vizsgálataink során foglalkoztunk a kalibrációs mérések optimális számával, az optimális kalibrációs mátrixméret meghatározásával és a hőmérséklet változásának hatásával.

Vizsgálataink alapján megállapítottuk, hogy a QDaedalus rendszer használata során legalább 10 kalibrációs mérést érdemes végezni, ugyanakkor 15-nél több mérés már nem javítja számottevően az eredményeket, tehát a 10-15 közötti kalibrációs mérés látszik a legjobb kompromisszumnak a pontosság és a hozzá szükséges mérési idő tekintetében.

A CCD érzékelő kalibrációs mérésbe bevont területe a kalibrációs mátrix mérete és a ráctávolság függvényében változtatható. Megállapítottuk, hogy a kalibrációs mátrix méretének növelése a mérés időtartamának jelentős növekedése ellenére sem eredményezi a képfőpont helyzete pontosságának szignifikáns növekedését. Megfelelő tehát a  $2 \times 2$  és a  $3 \times 3$  mátrixméret, de a  $4 \times 4$ -es méret alkalmazása már fölösleges. Az optimális megoldás a kis mátrixméret mellett a mérésszám növelése.

Megvizsgáltuk azt is, hogy a hőmérséklet változása mekkora hibát okoz a rendszer működésében. Megállapítottuk, hogy a kalibráció kezdete és a csillagászati mérés befejezése között eltelt időben nem lehet 1-2 foknál nagyobb a hőmérsékletváltozás. Intenzív éjszakai lehülés (hőmérsékletcsökkenés) esetén célszerű a csillagászati mérés előtt és után is kalibrációs méréseket végezni és a kettő átlagából kiszámítani a képfőpont helyzetét és a transzformációs paramétereket. A hőmérsékleti vizsgálatainkból levonható további fontos következtetés, hogy fűtött helyiségből alacsonyabb hőmérsékletű terepi mérésekre kiszállítva a műszereket, a mérés megkezdése előtt meg kell várni, hogy a műszerek (a műszerek belső optikai szerkezete is) teljesen átvegyék a külső hőmérsékletet, vagyis beálljon a teljes hőmérsékleti egyensúly.

**Köszönetnyilvánítás.** A kutatások a K-124286 sz. OTKA támogatásával folynak.

## Irodalom

- Bürki, B. – Guillaume, S. – Sorber, P. – Oesch, H. P. 2010. 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.
- Knoblach, S. 2009. Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hänge-tachymeters. *Dissertation, Techn. Univ. Dresden*.
- Tóth, Gy. – Völgyesi, L. 2016. Data processing of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering* 5 évf. 8 sz. pp. 149-166.
- Völgyesi, L. – Tóth, Gy. 2016. A QDaedalus-rendszer geodéziai alkalmazási lehetőségei. *Geodézia és Kartográfia* 68. évf. 9-10 sz. pp. 11-17.

## Summary

### Calibration of the QDaedalus system

QDaedalus system is a computer-controlled automated geodetic total station completed with GNSS technology which can be used mainly for astrogeodetic measurements. Before the measurements, the most important step is to calibrate the instrument. Accordingly, it is necessary to establish a connection between the readings on the horizontal and vertical circle of the total station and the readings in the coordinate system of the CCD sensor. By the previous procedure at night in field conditions, the calibration was rather cumbersome and did not meet the exact measurement accuracy. To solve this problem, we have developed a new method and tool for calibrating more easily and more accurately. Studies were performed on the optimal calibration measurements and raster size; additionally, the temperature dependence of the measurements was also investigated. Our experiences are useful in all cases when installing a CCD sensor for geodetic instruments.



Dr. Völgyesi Lajos  
professor emeritus

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék  
volgyesi@eik.bme.hu  
<http://www.agt.bme.hu/volgyesi>



Dr. Tóth Gyula  
egyetemi docens

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék  
gtoth@sci.fgt.bme.hu