

HAJTOGATOTT SUGÁRMENETŰ OPTIKA MESTERSÉGES HOLD HELYZETMEGHATÁROZÁSÁHOZ ÉS EGYIDEJŰLEG A FÖLDFELSZÍN FÉNYKÉPEZÉSÉHEZ

Greguss Pál , Greguss Edit*

1. BEVEZETÉS

Nagy az igény a miniatürizált mesterséges holdak fedélzeti eszközeinek miniatürizálására, tovább fejlesztésére, újak kifejlesztésére, különösen a nano és a mikro mesterséges hold programok számára. A mesterséges hold helyzetének meghatározására és a földfelszín fényképezésére szolgáló két külön álló egység helyett, egyetlen eszköz kidolgozására teszünk javaslatot a nemrég kifejlesztett Humanoid PAL látórendszer felhasználásával. Ez a **Panoráma Gyűrűs Lencsére alapozott kombinált mesterséges hold helyzetmeghatározó érzékelő és földfelszín fényképező (PALAMGI) eszköz** .

Az 1998. október 24-én sikeresen pályára állított SEDSAT-1 mikro mesterséges hold optikai helyzet meghatározó rendszere, a PALADS, már tartalmazott egy, a körbelátó elvű leképezésen alapuló modult. Ennek alapja egy katadioptrikus optika, a Panoráma Gyűrűs Lencse (*Panoramic Annular Lens, PAL*), egy egy tömbből álló, törő és visszaverő gömbfelületekkel határolt optikai leképező elem[1].

2. KIINDULÁSI SAROKPONTOK

2.1. Helyzetmeghatározási módszerek

Számos helyzetmeghatározási eljárás ismeretes, többek között Nap érzékelők, Föld horizont érzékelők, magnetométerek. A Nap és a horizont érzékelőket azonban más érzékelőkkel társítva kell alkalmazni ahhoz, hogy *háromtengelyű* helyzet meghatározásra használhassuk azokat. A magnetométerek képesek háromtengelyű helyzetadatot szolgáltatni, de csak 0.5-3.0 fok pontosság érhető el velük, hacsak nem alkalmazzuk együtt más érzékelőkkel. A csillagérzékelők nagy pontosságúak (0.0003-0.01 fok), de nagyon érzékenyek a véletlenszerű bukdácsolásokra, rezgésekre, és gondot jelent annak beállítása, hogy az érzékelő egy adott csillagra mutasson.

2.2. A körbelátó leképezés és a PAL optika

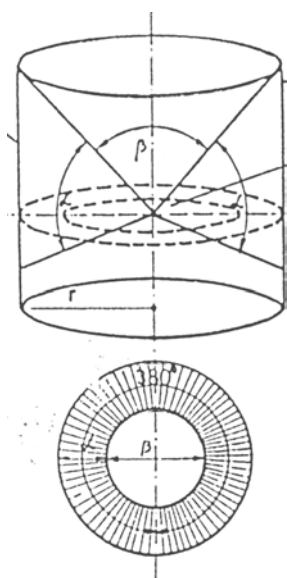
A körbelátó leképező egység egy Panoráma Gyűrűs Lencse, azaz egy katadioptrikus (tükörfelületeket is tartalmazó) optika, ami egyetlen tömbön kialakított törő és visszaverő gömbfelületekkel valósítja meg a körbelátó elvű leképezést.

Ennek az optikai elemnek az első úrkutatásbeli alkalmazása volt a *radiális profilométer*, amellyel üregek belső körvonalát, illetve eltéréseit vizsgálhatjuk 360°-os körben anélkül, hogy az optikát tengelye körül forgatni kellene. Ezt úgy érjük el, hogy az üreg belső felületét úgy világítjuk meg, hogy a megvilágító fénynyaláb egy körgyűrűt pásztáz végig az üreg belső felületén. Ezt a megvilágított gyűrűt képezi le a PAL optika. A PAL optika által szolgáltatott képen bármilyen eltérés a köralaktól egy kiugrást hoz létre, azaz, az adott üreg belső felületi szelvényének a köralaktól való eltérései képszerűen jelennek meg. Jegyezzük meg, hogy az így nyert kép nem egy *keresztmetszet*, hanem a háromdimenziós üregfelület kétdimenziós váza, azaz a képfelületre merőleges irányból tartalmaz információt. Ezt a módszert a *huntsville-i Alabama Egyetem gépészeti osztályával (Department of Mechanical Engineering of the University of Alabama in Huntsville)* dolgoztuk ki.

* Gépgyártástechnológia Tanszék, Budapesti Műszaki és Közgazdasági Egyetem, Budapest, Hungary
OPTOPAL Méréstechnikai Szolgálat

2.3. A PAL leképezés alapelve

A PAL leképezés azon alapul, hogy a bennünket körülvevő világ geometriai szerkezetét inkább hengeresen, mint gömbszerűen tükrözi vissza, azaz *körbelátó elvű (centric minded imaging, CMI)* szemléletet követ. A CMI azt jelenti, hogy a háromdimenziós tárgyterben egy képzeletbeli henger felületén belül elhelyezkedő pontok a kétdimenziós képtérben egy sík mentén képződnek le. Így aztán egy pontnak a háromdimenziós tárgyterben elfoglalt igazi helyére a képsíkbeli helyéből származtatott hengerkoordinátákkal hivatkozhatunk. Ha most feltételezzük, hogy a minket körülvevő henger sugara megegyezik az *éleslátás* távolságával, akkor egy panoráma képet kapunk ennek a képzeletbeli hengernek a falán. Ennek a gondolatmenetnek az eredménye azonban csak egy 360° panoráma *nézet*, de nem egy mindenirányú panoráma *kép*, a képnek abban az értelmében, hogy ez még nem *egy Euklideszi sík felületen* megjelenített intenzitáseloszlás.



1. ábra A CMI alapelve

Megmutatható, hogy ez a panoráma hengervetületi nézet a képzeletbeli henger tengelyére merőleges síkba alakítható (transzformálható) egy sajátos nyújtási eljárással. (Az eljárás hasonlít a Mercator vetítéshez, de nem azonos vele). Végeredményül, a háromdimenziós környezet panorámikus gyűrűs képe alakul ki, ahol a hengeres térben a látáshenger tengelyére merőlegesen állandó térszög alatt látszó pontok a képsíkon koncentrikus gyűrűkben helyezkednek el. (1. ábra). A háromdimenziós környezet geometriai arányai poláris koordinátákban jelennek meg és olyan kép adódik, amelyben a pontok ugyanúgy viszonylanak egymáshoz, mint a valóságban. Ez teszi lehetővé a leképezett terület torzításmentes körkörös megjelenítését.

A körbelátó elven végzett leképezés tehát annyit tesz, hogy a háromdimenziós tárgyternek azon pontjai, amelyek a képzeletbeli henger felületén belül helyezkednek el, a kétdimenziós képtérben egy sík mentén képződnek le. Következésképpen egy pontnak a háromdimenziós térben elfoglalt valódi helyét a képsíkbeli hengerkoordinátáiból származtathatjuk.

A gyűrűs kép további elemzése során azt találjuk, hogy ez az optikai lenyomat oly módon jeleníti meg a körülvevő háromdimenziós környezet kétdimenziós vázát, hogy adatokat nyerhetünk a tárgyponthoz, mivel a gyűrű szélessége megfelel a látási henger tengelye irányában a *látószögnek* (α).

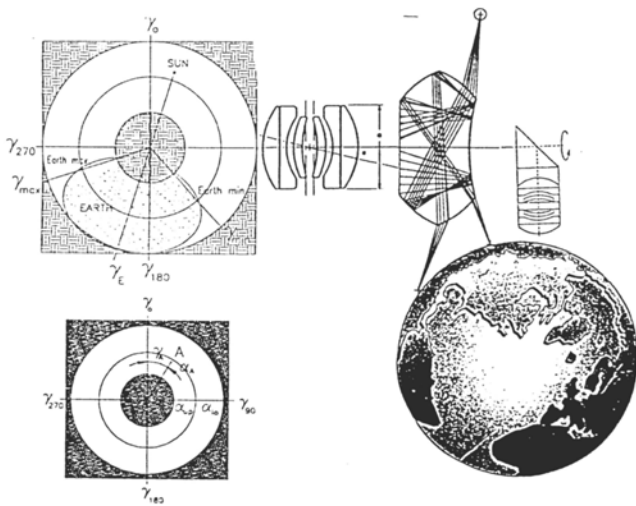
Végeredményként azt kapjuk, hogy egy ilyen leképező tömb *mélységélessége a felületétől a végtelenig terjed*, következésképpen az ezen az elven történő leképezés elvileg nem kíván fókuszlást.

2.4. A PALADS – Panoramic Annular Lens Attitude Determination System kifejlesztése



2. ábra. A SEDSAT-1 a vizsgálókamrában az oldalt kinyúló PALADS optikával

A SEDSAT-1 helyzetének meghatározására kifejlesztett körbelátó optikai leképező rendszerben, a PALADS-ban használt kb. 38 mm átmérőjű, s az optikai tengely körül 360°-os körben 45° látószögű PAL optika SEDSAT-1 (2. ábra)-ból oly módon nyúlik ki, hogy a Föld sarló és egy csillag virtuális képe jelenik meg a PAL tömbben, amit egy lencserendszer egy CCD kamerára képez le. Ez a kép adatokat szolgáltat a Nap és azon pontok helyzetéről, amelyek a Föld sarló és a PAL horizont metszéspontjában helyezkednek el. Kihhasználva a PAL leképezés egyik alaptulajdonságát, nevezetesen azt, hogy a képsík minden egyes képpontjának a gyűrű alakú referencia síkban egyértelműen tartozik egy szög. A gyűrűs kép és a háromdimenziós környezet geometriai viszonyaiból a mesterséges hold helyzete és magassága, viszonylag könnyen számítható.



3. ábra A PALADS működésének elvi vázlata

A PALADS által használt fő koordináta rendszer az égi gömbi koordináta-rendszer volt. Ez azt jelenti, hogy a mesterséges hold földfelszín feletti magassága és az égbolton elfoglalt helyzete, továbbá a referencia forrás égi koordinátái a PALADS bemenő adataiként szolgáltak. A PALADS szolgáltatja a mesterséges hold egy tengelyének (a PAL optikai tengelye) helyzetét, és az ehhez a tengelyhez mért fázisszöget, ami egy teljes háromtengelyű helyzetmeghatározást eredményez. Ezek az adatok szolgálnak arra, hogy kiszámítsák a formális helyzet mátrixot, Euler szögekben kifejezve. Az első ezek közül megfelel a helyzet vektornak a viszonyítási rendszer 3. vagy Z tengelyéhez viszonyított elfordulási szögének, a második Euler szög a helyzetvektor deklinációjának (a viszonyítási rendszer elforgatott 2. vagy Y tengelye körüli elfordulás), míg a harmadik Euler szög a helyzetvektor körüli elfordulás fázisszöge (a viszonyítási rendszer elforgatott 1. vagy X tengelye körüli elfordulás). Mivel a 3X3-as helyzet mátrix egyes elemei az adott mesterséges hold tengely és adott viszonyítási rendszer tengelye által bezárt szögek koszinuszai, a helyzet mátrix teljes mértékben leírja a mesterséges holdnak a viszonyítási rendszerhez vett helyzetét.

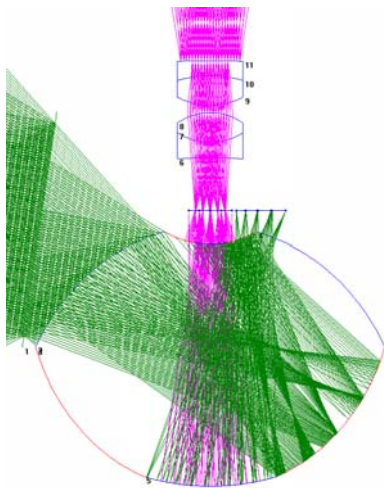
Spacecraft Attitude Matrix

$$A(3 \times 3) = \begin{pmatrix} X_{ref} \cdot X_{spc} & X_{ref} \cdot Y_{spc} & X_{ref} \cdot Z_{spc} \\ Y_{ref} \cdot X_{spc} & Y_{ref} \cdot Y_{spc} & Y_{ref} \cdot Z_{spc} \\ Z_{ref} \cdot X_{spc} & Z_{ref} \cdot Y_{spc} & Z_{ref} \cdot Z_{spc} \end{pmatrix}$$

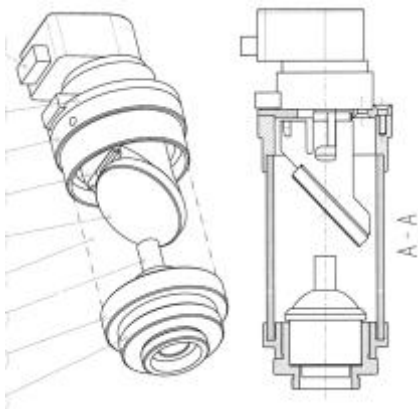
2.5. PAL képképző tömb sugármenet analízise

Sugármenetanalízisek azt mutatják, hogy a PAL lencse optikai tengelye körüli térrész egzaktalan nem vesz részt a gyűrűs panoráma kép kialakításában, a képképző sugarak csak áthaladnak rajta [3]. Ez a tény vezetett számos összetett látórendszer – a panoráma és a hagyományos leképező rendszerek társításának – a kialakításához. Ezek példái az előrenéző, a foveális, a humanoid gépi látó rendszerek (4., 5., 6. ábrák). A szerző többek között kialakította az úgynevezett HPAL (Humanoid Panoramic Annular Lens) rendszert, amelynél az optika tengelyében levő tükröző felület egy részét eltávolítottuk, aminek eredményeként keresztülnézhetünk a leképező tömbön a panoráma leképező képesség bármiféle csorbulása nélkül, ami alapvető tényező a PAL alapú helyzetmeghatározásban.

Ha most egy leképező lencsét, -*foveálisnak* nevezett lencsét - úgy helyezünk a fent említett módon létrehozott optika elé, hogy annak képe egy síkba kerüljön a PAL lencse gyűrűs képének síkjával, akkor a gyűrűs kép közepén „hiányzó” teret is képpel tölthetjük ki



4. ábra Előrenéző rendszer



5. ábra Foveális PAL rendszer



6.ábra Foveális kép, amelyik a 360° panoráma kép egy kiválasztott részét mutatja négyszeres nagyításban.

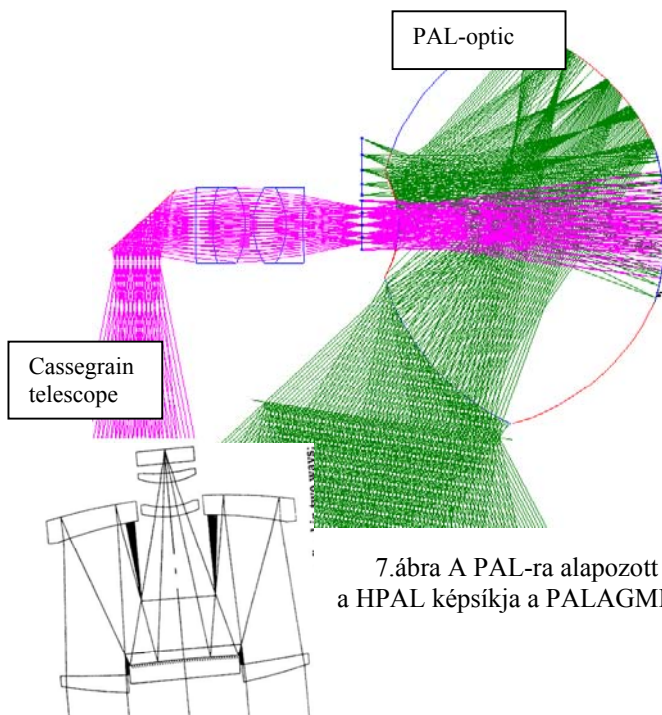
3. TERVEZÉSI ELKÉPZELÉS

Ha a HPAL elé egy ferde tükröt, vagy prizmat helyezünk el, ahogy azt a PALADS működési elvét bemutató 3. ábrán láthatjuk, akkor egy, helyzetmeghatározásra alkalmas, *hajtogatott sugármenetű optikai rendszert kapunk.*

Ez az alapvető része annak a javaslatnak, hogy **társítsuk a helyzetmeghatározási feladatot a földfelszín fényképezéssel**, s ezzel létrehozunk egy alapvetően új PAL lensére alapoyott hajtogatott sugármenetű optikai rendszert egyidejű helyzetmeghatározás és felszínfényképezés céljára.

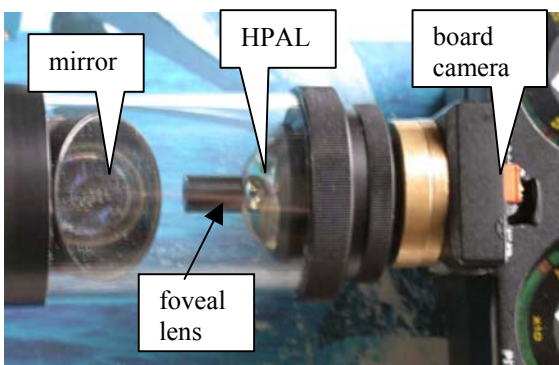
4. A HAJTOGATOTT SUGÁRMENETŰ OPTIKA

Bár a PALADS ad a csillagokról és a Föld sarlóról egy panoráma képet , azt mégsem lehet igazán földfelszín fényképezésre használni, mert az általa behozott terület túl nagy. Ez a javaslat egy olyan hajtogatott optikai rendszerelképzelést mutat be, amely mindkét feladatot elvégzi.



7.ábra A PAL-ra alapozott hajtogatott sugármenetű optikai rendszer sugármenet analízise és a HPAL képsíkja a PALAGMI-ban

Ha ugyanis úgy helyezünk el egy, megfelelő nagyítású, földfelszín fényképező rendszert - célszerűen egy Cassegrain távcsövet - hogy annak képe egy ferde tükör segítségével a PAL lencse képsíkjában keletkezzék, akkor a távcső képe pont ott jelenik meg a gyűrű alakú PAL képen, ahol egyéb optikai információ nincs jelen.



8. ábra A PALAMGI megvalósíthatóságára vonatkozó modell kísérlet

Az ötlet megvalósíthatóságát vizsgálándó, deszkamodellt állítottunk össze. A kísérlet azt mutatta, hogy nincs szükség újra fókuszálásra, a két képsík egybeesett.

5. A TECHNIKAI MEGVALÓSÍTÁS KÖVETELMÉNYEI

A fenti ötlet megvalósítása során, a korábban a PALADS-nál alkalmazottnál, nagyobb látószögű HPAL optikát szeretnénk kialakítani. Nagyobb törésmutatójú üveget használva és új optikai tervezőprogram segítségével a korábbi 45°-os látószöget 80°-ra növeltük.

Előreláthatólag a legnagyobb feladat a PALAGMI tervezésében és gyártásában annak megoldása, hogy a földfelszíni fényképezőrendszer, mint foveális lencse képe, hogyan tölti ki a gürűs képet. Ha két kép nem esik pontosan egy síkba, akkor egyik vagy másik kép, vagy mindkettő kikerülhet a fókuszából, s ebben az esetben elveszítjük a PAL lencse végtelen mélységélességgel jellemzett kiváló tulajdonságát, azt, hogy nem kíván fókuszálást, élesreállítást.

A 4. ábra sugármenet analízise azt mutatja, hogyan oldottuk meg ezt a problémát a humanoid látórendszerénél.

Mivel a hajtogatott sugármenetű elrendezés azt célozza, hogy ne kelljen több, hanem csak *egyetlen* képérzékelőt alkalmazni mind a 360°-os panoráma képhez, mind a felszínleképezőhöz, ügyelnünk kell a két kép által lefedett képpontok (pixelek) arányára is. A gürűs kép által lefedett terület kb 3,37-szer nagyobb, mint foveális képterület. Csak példa kedvéért a 2/3"-os érzékelő formátum és 6.7 μm x 6.7 μm képpontméret esetén a panoráma kép 535735 képpontot, míg a foveális kép 226056 képpontot fed le.

A fent javasolt optikai rendszer reményeink szerint több feladat végrehajtása során is jó szolgálatot tehet egyszerűsége, kis súlya és összefogottsága folytán. Ilyenek lehetnek: különféle Föld megfigyelések, bolygóközi járművek, Mars és Hold expedíciók, ahol szigorú súly és költségkorlátok érvényesülnek.

Irodalom

- [1] Hung Pat. 192125; US Pat. 4566763; German Pat. 3402847; French Pat. 2540642, Japan Pat. 1962784
- [2] P. Greguss, "Catadioptric type design for machine vision systems", *INES'99 - 1999 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems Proceedings - November 1-3, 1999, Poprad, High-Tatras, Stara Lesna, Slovakia*, (Eds. Imre J. Rudas and Ladislav Madarasz), pp.147-151, 1999. ISSN 1562-5850, ISBN 80-88964-25-3
- [3] P. Greguss, A.H Vaughan, "Development and optimization of machine vision systems using a Panoramic Annular Lens (PAL)". *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'99) Tokyo, Japan*, pp. 463-468, 1999.

A szerzőről: Greguss Pál nyugalmazott egyetemi tanár, Gépgyártástechnológia Tanszék, Budapesti Műszaki és Közgazdasági Egyetem

Életének 82-ik évében tragikus baleset következtében hunyt el 2003. február 26-án. Az IMEKO-ra bejelentett előadását legközelebbi munkatársa, élete társa hat évtizeden keresztül, felesége: Greguss Edit adta elő. Az általa már összeállított előadás végső szerkesztését és a magyar nyelvre fordítását fia ifjabb Greguss Pál végezte.