

AZ EÖTVÖS–PEKÁR–FEKETE EKVIVALENCIAELV-MÉRÉSEK MEGISMÉTLÉSE

Péter Gábor,¹ Deák László,² Gróf Gyula,³ Kiss Bálint,¹
Szondy György,⁴ Tóth Gyula,⁵ Ván Péter,^{2,3} Völgyesi Lajos⁵

¹BME, Irányítástechnika és Informatika Tanszék

²MTA, Wigner Fizikai Kutatóközpont

³BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

⁴független kutató

⁵BME, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Eötvös Loránd munkatársaival, *Pekár Dezsővel* és *Fekete Jenővel* 1906-tól mérésorozatot végeztek (Eötvös-kísérlet, más ismert rövidítéssel EPF-mérések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan [1].

A mérésekben *Fischbach* és munkatársai 1986-ban olyan, hibahatárt alig meghaladó szisztematikus eltéréseket találtak, amelyeket a későbbi, jóval pontosabb, de részben eltérő módszert használó mérések nem tudtak sem reprodukálni, sem megmagyarázni.

Az Eötvös-kísérlet elemzésének eredményeképpen olyan szisztematikus hibalehetőséget találtunk [2], amely indokoltá teszi a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek mellett a mérések megismétlését. A méréseket a KFKI (Wigner FK) területén lévő Jánossy Föld alatti Fizikai Laboratóriumban, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények

és kontrollált feltételek között tervezzük. Az Eötvös-kísérlet megismétlésének külön aktualitást ad, hogy Eötvös Loránd halála 100. évfordulójának tiszteletére 2019 az UNESCO által is támogatott Eötvös Loránd emlékévként. Jelenlegi tanulmányunkban röviden áttekintjük az előzményeket, beszámolunk a mérések előkészületeiről és jelenlegi állapotáról.

Előzmények

Eötvös Loránd és kollégái 1906 és 1908 között Eötvös-ingával méréseket folytattak a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának ellenőrzésére. A mérések során azt használták ki, hogy a nehézségi erő a Föld középpontja felé mutató gravitációs erő és a forgástengelyére merőleges centrifugális erő eredőjeként áll össze. Amennyiben a gravitációs erő anyagfüggő, akkor az eredő nehézségi erő iránya szintén anyagfüggő lesz, ami egy kelet–nyugat tájolású Eötvös-ingával kimutatható. Az elvégzett mérések csupán elhanyagolható, a 10^{-9} hibahatár néhányszorosának megfelelő, véletlenszerűnek tűnő eltéréseket mutattak.

Jóval később, 1986-ban *Fischbach* és társai azt találták, hogy ezek a kis eltérések mégsem egészen

A mérések alpműszere, az Eötvös–Pekár-inga az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet tulajdona. Ezúton fejezzük ki köszönetünket az intézet vezetőinek, hogy méréseink céljára rendelkezésünkre bocsátották a műszert. Köszönjük továbbá a Fornax 2002 Kft. és *Sári Pál* műszertechnikai segítségét. Köszönjük a Wigner FK támogatását, elsősorban *Lévai Péter* főigazgatónak, illetve a Jánossy Föld alatti Fizikai Laboratórium körülményeiért *Barnaföldi Gergelynek* és *Somlai Lászlónak*. A munkát a 124286 és a 124366 számú NKFIH pályázata támogatta.



Péter Gábor villamosmérnökként végzett 2015-ben a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéken, ahol azóta doktori tanulmányait folytatja. Kutatási témája ismeretlen területek kooperáló ágensekkel történő feltérképezése.



Gróf Gyula matematikus-mérnök, a BME Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék vezetője. Fő kutatási területe az energetikai és transzportfolyamatok kísérleti és elméleti vizsgálata, hőfizikai mérések fejlesztése. Speciális szkennereket és fotorobotot épített, amely berendezéseket a Bataapáti környéki geológiai kutatásokban alkalmaztak.



Deák László fizikus, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézet, Nukleáris Anyagtudományi Osztályának tudományos főmunkatársa. Kutatási területe a röntgen-, neutron- és Mössbauer-spektroszkópia, ezek alkalmazása spekuláris és diffúz szórásban.



Kiss Bálint villamosmérnök ('96), a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszék vezetője, egyetemi docens. Kutatási területe a robotika és mechatronikai rendszerek irányítása.

véletlenszerűek, hanem az atommagok kötési energiájának lineáris függvényeként írhatók fel, és egy rövid hatótávolságú, úgynevezett ötödik erő létezését vetették fel [3–5]. A feltételezés komoly vitákat váltott ki. Eötvösök eredményeit részletesen elemezték, új, sokkal pontosabb méréseket is végeztek, de azokban sem mutatták ki a megíósolt Yukawa-jellegű, véges hatótávolságú ötödik erőt. Ez annál is inkább várható volt, mert Eötvösök a hatást egy anyagpárra a Nap gravitációs tere esetén is ellenőrizték, és hasonló eltérést mutattak ki [1], így az észlelt eltérések vélhetően nincsenek összefüggésben a távolsággal.

A súlyos és a tehetetlen tömeg ekvivalenciájában nagy távolságokon eddig sem kételkedtünk, hiszen erre vonatkozó méréseket Eötvösök óta többen is végeztek. Fischbachék előtt *Robert Dicke* és munkatársai 10^{-11} , *Braginsky* és társai pedig 10^{-12} pontossággal igazolták az ekvivalenciaelvet [7, 8].

Robert Dicke és munkatársai több újítást is bevezettek. Először is egy észak–dél tájolású ingával a Nap vonzása és a Föld keringéséből adódó centrifugális erő viszonyának anyagfüggését mérték. Ennek előnye, hogy az ingát, a jel 24 órás periodicitása miatt a mérés során nem kellett forgatni. Ezen kívül háromszög-elrendezésű ingát készítettek,¹ amely érzéketlenebb a gradienshatásokra, emellett az arany-alumínium anyagpárból álló ingát vákuumban helyezték el, az inga csillapítását és egyensúlyban tartását pedig egy visszacsatoláson keresztül két elektródával oldották meg. Az alkalmazott kvarcszál driftjét is ily módon, elektrosztatikusan kompenzálták. A több napos mérési ciklusok során rögzített adatokból számítógép segítségével, statisztikai módszerrel szűrték ki a hőmérséklet-ingadozás és a mechanikai rezgések (a mérési helytől körülbelül 30 méterre folyó építkezés) okozta zavarjeleket.

¹ Lásd *Patkós András* írásának 2. ábráját idei januári számunk 8. oldalán (műsz. szerk.).



Szondy György villamosmérnökként végzett 1994-ben. Azóta informatikai rendszerek fejlesztésével foglalkozik. Jelenleg egy IT startupot vezet. Független kutatóként 18 éve foglalkozik aktívan a gravitáció fundamentális, elméleti és gyakorlati kérdéseivel. Az elmúlt években több relativitáselmélet-konferencián is előadott. 2006-óta az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE) elnökségi tagja.



Tóth Gyula egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa földmérőmérnöki szakon végzett 1985-ben. Azóta a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén oktat és kutat. Kutatási területe a fizikai és matematikai geodézia, azon belül a Föld matematikai alakja, a geoid meghatározása. Ez irányú kutatásaiért 2011-ben Akadémiai Díjban részesült.

Braginsky és társai mérésük során *Dicke*-ékhez hasonló módon jártak el. Az érzékenységet többek között azzal sikerült nagymértékben növelni, hogy a volfrámból készült torziós szálát extrém mértékben, mintegy 3 m hosszúságúra növelték.

1986 után, az ötödik erő felvetése új lendületet adott ezen kísérleteknek. 1990-től hasonló, egyre pontosabb méréseket végzett az Eöt-Wash csoport (University of Washington). Legújabb ingájukkal végzett méréseikben 10^{-13} pontosságot értek el [5]. Sajátosságuk az extrém gradiens melletti mérés, hogy akár 1 méteres hatótávolságú Yukawa-kölcsönhatást is tesztelni tudjanak. A fellépő gradiens hatásokat gondosan kompenzálják. A csoport olyan méréseket is végzett, ahol a Napot, illetve a Tejutat tekintik attraktornak [9].

A Lunar Laser Ranging (LLR) kísérlet a Föld–Hold távolság pontos mérésével, a Nap Földre és Holdra gyakorolt vonzását hasonlítja össze. A mérés kimutatja, hogy a két égitest nehézségi gyorsulása 10^{-13} méreési hibahatáron belül megegyezik. Az eredménynek több vonatkozása is lehet. Ha a gravitációs önkölcsönhatás miatt változik a súlyos és tehetetlen tömeg aránya, akkor az az erős ekvivalenciaelv sérülését jelentené. Ez a fajta „kötési energia” sok nagyságrenddel kisebb, mint az atommagokban lévő kötési energia, ebből eredően a kísérlet $(2,3 \pm 3,2) \times 10^{-4}$ pontossággal igazolta az erős ekvivalenciaelvet. E méréssel kapcsolatban arra a feltételezésre is hivatkoznak, amely szerint a Föld és a Hold anyagi összetétele jelentős mértékben eltér egymástól, ugyanis a Föld a vasmeteoritok anyagához hasonló vas-nikkel maggal rendelkezik, míg a Hold nem [9]. Ekkor a gyenge ekvivalenciaelv ellenőrzésére van lehetőség sokkal nagyobb pontossággal. Ugyanakkor az említett, vas-nikkel magot feltételező geokémiai meteoritmodell nem áll összhangban a mai geofizikai ismereteinkkel, mert – többek között – nem tudja magyarázni például a külső magban a nyírófeszültségek eltűnését. Fizikai-



Ván Péter fizikus, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Rézecske és Magfizikai Intézet, Elméleti Fizikai Főosztályának és a BME Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének tudományos főmunkatársa. Kutatási területe a nemegyensúlyi termodinamika. Az utóbbi években ő koordinálja Wigner FK a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumának kutatásait.



Völgyesi Lajos geofizikus, az MTA doktora. A BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén professor emeritus. Főbb kutatási területei a fizikai, csillagászati és matematikai geodézia, a Föld forgása és nehézségi erőterének mérése és vizsgálata, az Eötvös-inga továbbfejlesztése és alkalmazási lehetőségei. Akadémiai díjas, számos hazai és nemzetközi tudományos bizottság elnöke és tagja.

lag reálisabb az úgynevezett asztrofizikai modell, amely szerint a földköpeny és a földmag anyagi összetételben nincs számottevő eltérés, a különbség a nagy nyomás miatti fázisátalakulás következménye [10]. A Hold belsejében viszont a Hold kis tömege miatt nem alakul ki olyan nagy nyomás, hogy a Földhöz hasonló fázisátalakulás létrejöhesse, ezért nincs magja és a Földhöz hasonló mágneses tere sem. A Holdról származó kőzetminták alapján sincs számottevő különbség a két égitest anyagi összetételében, életkoruk is teljesen megegyezik, ami az egyidejű, azonos anyagi forrásból történő keletkezést és az azonos anyagi felépítést valószínűsíti [11]. Így az LLR-kísérlet feltehetően nem alkalmas a gyenge ekvivalenciaelv igazolására.

A 2016 decembere óta adatokat gyűjtő MICROSCOPE-kísérlet további két nagyságrenddel tervezi megjavítani az eddigi kísérletek pontosságát, felhasználva a Föld körül kicsit eltérő pályán keringő teszttömegek relatív gyorsulásának különbségét. A tervezett „Galileo Galilei” pedig az űrben, zero gravitációra tervezett torziós ingával további két nagyságrenddel javítana, és 10^{-17} pontossággal ellenőrizné a gyenge ekvivalenciaelv érvényességét [12].

Mindazonáltal az Eötvös-kísérletet az eredeti formában és eredeti eszközökkel nem ismételték meg, és az újabb, kifinomultabb módszereket alkalmazó mérések után nem törődtek az Eötvösök munkáiban megfigyelt szisztematikus eltérések okával [6].

Az Eötvösök méréseiben általunk feltételezett szisztematikus hiba a nehézségi erőter gradienseinek olyan, magasabb rendű hatása miatt lép fel, amelyet az alkalmazott minták alakjától függő erőhatás okoz. Az Eötvös-kísérlet megismétlése a gradiens alakhatás figyelembevételével nemcsak a fent említett szisztematikus hibára vonatkozó feltevést igazolhatja, hanem új szempontokkal járulhat hozzá a jelenlegi legpontosabb földi mérésekhez.

Tervek

Az eddigi előzetes vizsgálataink a mérés szempontjából két komoly eredményt hoztak. Egyik, hogy a mérési pontosság a mai technológia segítségével láthatóan legalább egy-másfél nagyságrenddel javítható. A másik, hogy amíg az eredeti Eötvös-kísérletet a környezeti hatások (például a hőmérséklet és a gravitációs gradiensek) általunk ismeretlen módon és mértékben befolyásolhatták (ezek pontos nagyságát az



1. ábra. Balra a felújított Eötvös-Rybár (Auterbal) inga és jobbra az Eötvös-Pekár-inga.

eredeti mérési adatok híján csak találgatni tudjuk), addig a tervezett új méréseket mind a hőmérséklet, mind a környezeti gradiensek szempontjából kontrollált körülmények között tudnánk végezni. A mérés tervezett helyén a környezeti hatások minimálisak, a gravitációs gradiensek pedig az előzetes számítások és mérések szerint jól kezelhetők, és nem túl nagyok.

Éppen ezért lenne fontos, hogy az Eötvös-kísérletet az eredeti módszerrel, de a mai technológia által biztosított nagyobb pontossággal elvégezzük, mert így eldönthető lehet, hogy mi az oka annak az összefüggésnek, amelyet Fischbach és munkatársai Eötvösök eredményeiben felfedezni véltek, illetve vizsgálható a gradiensalak-hatás szerepe a jelenlegi földi és műholdas ekvivalenciaelv-kísérletekben.

2017. június 23-án a Wigner Fizikai Kutatóintézetben született meg a döntés az Eötvös-kísérlet mai, modern technikai lehetőségekkel és eszközökkel segített megismétlésére, reprodukálására és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására.

A projekt az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE) kezdeményezésére a Wigner Fizikai Kutatóközpont, a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, továbbá az Irányítástechnika és Informatika Tanszék együttműködésével, valamint más tanszékek, szervezetek és szakértők bevonásával valósul meg 2017 és várhatóan 2020 között.

A cél eléréséhez az alábbi nagyobb feladatcsoportokat definiáltuk:

1. Az Eötvös-ingával folytatott mérések teljes automatizálása, a távvezérléssel történő mérés lehetőségének kialakítása.
2. Az inga pontosságának korszerű módszerekkel és eszközökkel történő növelése.
3. Az Eötvös-kísérlet megismétlése maximálisan kontrollált és dokumentált környezetben.
4. A mérések alapos kiértékelése és az eredmények publikálása.

Eddigi előkészületek

A tervezett mérések céljára két különböző típusú Eötvös-inga áll rendelkezésünkre: egy Eötvös–Rybár-féle Auterbal (Automatic Eötvös–Rybár Balance) műszer, illetve egy Eötvös–Pekár-féle torziós inga. Az 1. ábrán balra látható Auterbal-ingát az 1920-as években fejlesztették ki *Rybár István*, Eötvös későbbi utóda vezetésével a Kísérleti Fizikai tanszéken.

A korábbi ingákhoz képest az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legjelentősebb fejlesztés a műszer forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt [13]. Az automatikus leolvasás lehetővé tette az inga felügyelet nélküli működését, ugyanakkor a kényes óraszerkezet gyakori meghibásodásai miatt a műszer folyamatos figyelmet igényelt.

Az 1. ábra jobb oldalán látható Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengésidő csökkentésére törekedett és a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezve a hangsúlyt maradt a pontosabb és megbízhatóbb vizuális leolvasás mellett. A Pekár által fejlesztett ingák Eötvös–Pekár-ingaként ismertek, de hivatalos típusjelzésük Small original Eötvös G-2 volt [13]. A műszert három változatban gyártották, amelyek alapvetően csak a torziós szál hosszában különböztek egymástól. Az 1926-ban gyártott műszerekben a szál hossza még 50 cm, az 1928-as típusú készülékekben 40 cm, az 1930-as ingákban pedig már csak 30 cm volt.

A rendelkezésünkre álló ingákat igen régen használták, így az első fontos lépés az ingák felújítása, javítása, használhatóságuk ellenőrzése, beszabályozása [14] és kalibrálása volt. Mindez hosszú hónapokat vett igénybe. A torziós szálak csavarodási driftjének minimálisra csökkentése céljából – az ingák kioldott helyzetében – több mint fél éven keresztül, folyamatosan terheltük a szálakat. A hosszú idejű terheléssel a Pekár-inga esetében mindkét szál gyakorlatilag driftmentes állapotát sikerült elérni, míg az Auterbal-ingának egyelőre csak egyik torziós szála érte el a szinte teljesen driftmentes helyzetet. Ettől persze az Auterbal-inga is alkalmas mérésekre, hiszen a drift a mérések kiértékelése során egyszerűen korrekcióba vehető, de a szélsőséges pontossági igényű mérések céljára szerencsésebb a Pekár-inga használata. Ráadásul – mivel az Eötvös-kísérlet megismétlése tekintetében döntő szempont az ingában lévő tömegek egyszerű cserélhetősége – a mérések céljára egyértelműen a 30 cm szálhosszúságú Pekár-inga mellett döntöttünk, és a további fejlesztéseket már csak erre az eszközre koncentráltuk.

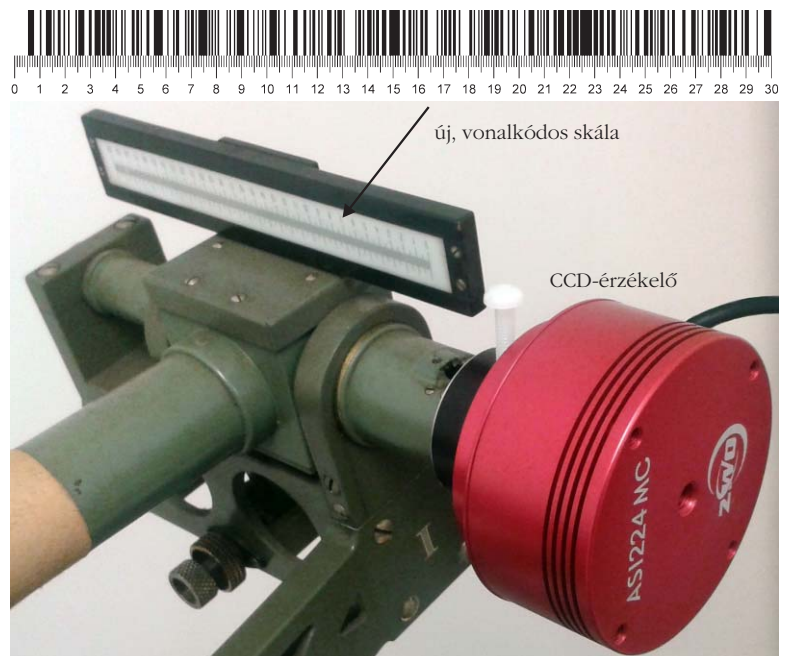
A sikeres mérések legfontosabb körülménye a méréseket zavaró körülmé-

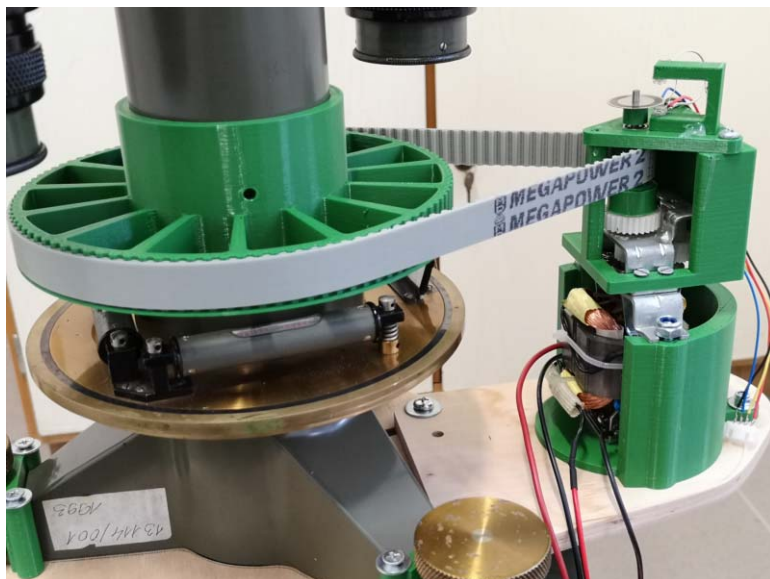
nyek minél teljesebb kiiktatása. Az Eötvös-kísérlet méréseit leginkább veszélyeztető hibaforrások: a műszert leolvasó személy zavaró tömege, a talajrezgések, a hőmérséklet változása és a nehézségi erőter gradienseinek magas értéke az inga környezetében. Az utóbbi probléma megfelelő helyszín kiválasztásával és az Eötvös-tenzor elemeinek – a műszer környezetében – pontos feltérképezésével egyszerűen kezelhető. Megfelelő helyszín kiválasztásával biztosítható a környezeti hőmérséklet stabilitása és jelentősen csökkenthetők az – elsősorban forgalom okozta – talajrezgések is. A mérések helyszínéről ezért választottuk a Jánossy Föld alatti Fizikai Laboratórium 30 m-es mélységben lévő folyosóját. Előzetes méréseink szerint a helyszín hőmérsékleti stabilitása megfelelő, a napi változás mindössze néhány század fok és várható, hogy mikroszeizmikus talajnyugtalanosság is alacsony, amit szeizmográfval ellenőrizzük.

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban tömeghatása [15]. Ugyanakkor jelenlétével a hőmérsékleti egyensúlyt is megbontja és mozgásával egyértelműen érzékelhető talajrezgéseket kelt, sőt – a tapasztalat szerint – a műszer parányi megdőlését is okozza. A hibaforrás a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel szüntethető meg. A vizuális leolvasás helyett ehhez szükséges a megfelelő CCD-érzékelők alkalmazása és számítógépes képképtekéssel a digitális műszerleolvasás, továbbá az inga különböző mérési azimutokba forgatásához távvezérelt motor alkalmazása.

A Pekár-inga vizuális leolvasásra szolgáló okulárjának helyére CCD-érzékelőt szerelve az inga karjának helyzetét a keletkezett digitális kép kiértékelésével tudjuk meghatározni (2. ábra). Vizsgálataink szerint

2. ábra. CCD-érzékelő a leolvasó okulár helyén.





3. ábra. Az inga távvezérelt forgatásának megoldása.

megfelelő felbontású CCD-kamerát alkalmazva az elektronikusan rögzített képen a kinagyított skála egy osztása 25-30 képpont nagyságú részt foglal el. Alkalmasság kiértékelési eljárással egy képpont tört részének megfelelő helyzet is meghatározható, így a várható leolvasási pontosság egy képből nagyjából $1/100$ skálaosztás (10^{-10}). Ez már így is egy nagyságrenddel jobb, mint az eredeti vizuális észlelés 10^{-9} pontossága. Ráadásul az inga egyensúlyi helyzetéről – másodpercenként több képet készítve – néhány perc alatt akár 1000 kép is rögzíthető és kiértékelhető, ami további leolvasási pontosságnövekedést eredményezhet.

A mérés egyik fontos kérdése, hogy a digitális képfeldolgozás kellően gyors és hatékony-e? A relatív skálaelmozdulás – két egymást követő kép között képkorrelációval – az eredeti skálát használva is gyorsan és pontosan meghatározható. A skála abszolút helyzetének, vagyis a teljes leolvasás automatikus meghatározása már jóval nehezebb, a mesterséges látás alkalmazását igényli, hiszen a skála osztásaihoz tartozó számokat és azok helyzetét is fel kell ismerni. Ezért új, vonalkódos skálát terveztünk és hozzá kapcsolódó kiértékelési eljárást készítettünk, amely a számítógépes leolvasást jóval egyszerűbbé, hatékonyabbá teszi, ugyanakkor növelni tudja a leolvasási pontosságot is.

A vonalkódos hosszmerési technológiát már évtizedek óta sikeresen alkalmazzák különböző geodéziai műszergyártó cégek a nagy pontosságú, szabatos digitális szintezésben. Ennek analógiájára olyan vonalkódos skálát terveztünk, amelynek a CCD-n látható részéből bármilyen leolvasási helyzetben nagy pontossággal és egyértelműen rekonstruálható a skála nullpontjának távolsága, vagyis a keresett skálaleolvasás. Miután a vonalkódos skála hagyományos vizuális észlelésre nem alkalmas, ezért – amint a 2. ábra felső részén is látható – kombinált vonalkódos és hagyományos számozott skálákat terveztünk. Így megmarad a hagyományos észlelés lehetősége, ugyanakkor a

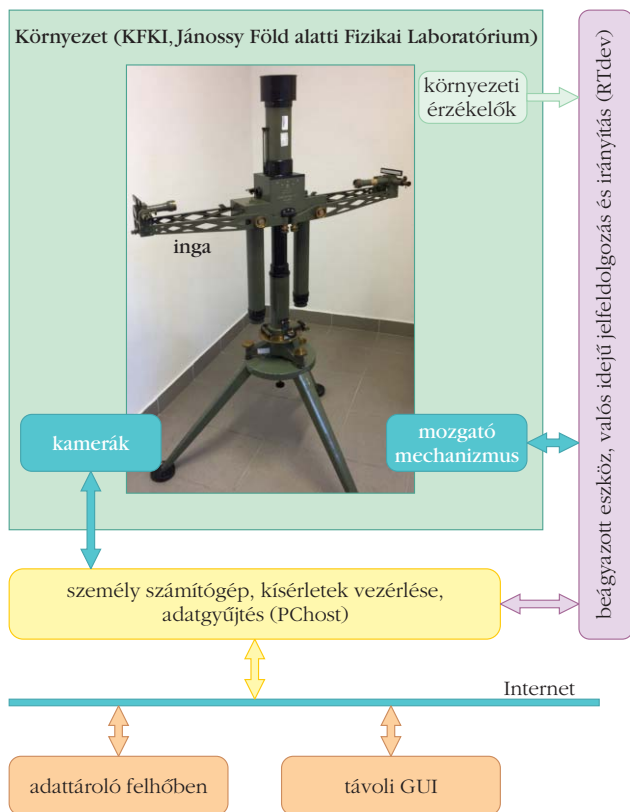
számítógépes leolvasás számára ideális és gyors vonalkódos kiértékelés is lehetővé válik. A kombinált skálák legyártása lézergravírozással folyamatban van, és amennyiben pontosságuk kielégíti igényeinket, akkor a mérés során ezeket fogjuk alkalmazni. Az első vonalkód-gravírozás minősége sajnos messze nem elégítette ki elvárásainkat, ezért részletesen meg kellett ismerkednünk a gyártási technológiákkal, és az új tervek ezek ismeretében kellett kialakítani.

A mechatronikai megoldások legkritikusabb eleme az inga távvezérelt forgatását végző egység elkészítése. Az egységgel szemben támasztott fontos követelmény, hogy a forgatások közötti nyugalmi helyzetben, a mérések közben elkerüljük a forgatómotor és a hozzá kapcsolódó szerkezet által okozott permanens mágneses zavarokat. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga 0° , 90° , 180° , 270° azimutokba forgatása pontosan, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül, a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, mechanikai sokk nélkül történjen. A forgatás során a megfelelő indulás és megállás az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt.

Az inga különböző mérési azimutokba forgatásához a 3. ábrán látható szerkezetet készítettük, a forgatásról – az inga szabadon futó felső részével összekötő bordásszíjas hajtáson keresztül – speciális motor gondoskodik. Érdekeség, hogy a legtöbb alkatrész 3D nyomtatással készült. A jelenlegi áttétel 1:10, amelyhez egy 10 és egy 100 fogas tárcsa tartozik a motor, illetve az inga oldalán. A szöghelyzet megfelelő felbontású visszaméréséről optikai elven működő enkóder tárcsa és a hozzá kapcsolt optokapuk gondoskodnak a hajtás motoroldali tengelyén. A tárcsa 100 vonalas, ez a dupla fototranzisztoros kialakításnak köszönhetően fordulatonként összesen 400 inkremenst jelent. Mivel az inkeremensek előjeles számlálása a motoroldali tengelyen történik, az áttétel miatt az inga teljes, 360° -os tartományára vonatkoztatva $0,09^\circ$ -os felbontást kapunk.

Amennyiben az áttétel nagysága a próbák során nem tűnik kielégítőnek, akkor egy további, csigahajtásos hajtómű kerülhet beépítésre, hogy a torziós szátra ható rántások tovább csökkenjenek. Ezzel persze a szöghelyzet mérési pontossága is javul.

A mérés automatizálását biztosító megoldás architektúrájának vázlatát a 4. ábra mutatja. A beágyazott mikrovezérlőt tartalmazó egység (RTdev) feladata a valós idejű adatgyűjtés az inga környezetében elhelyezett szenzorokról (hőmérséklet, páratartalom stb., igény szerint), a tápellátás monitorozása, valamint az inga mozgató egységének vezérlése, így a szöghelyzetjeladók kezelése is. A nem időkritikus műveletek személyi számítógépen (PChost) kerülnek megvalósí-



4. ábra. A rendszer felépítése.

tásra. Itt történik az automatizált méréshez rögzített, akár mérésenként egyedi módon definiált forgatási szekvenciák végrehajtása, a CCD-érzékelők adatgyűjtés-vezérlése, a kapott adatok és képek naplózása és mentése, illetve feldolgozása is. A PChost fogadja a kameraképeket is. Itt nem szükséges valós idejű feldolgozás, ugyanakkor a képek rögzítésének pontos időpontját is tárolni kell.

A sikeres mérések fontos követelménye – az inga modernizálásához szükséges egyedi informatikai megoldások mellett – a különleges alkatrészek precíziós beszerzése és gyártása. A soron következő legnehezebb feladat a megfelelő alakú és tömegű próbatömegek gyártása és megfelelő szálakra függesztése.

Összegzés

Eötvös Loránd és munkatársai a súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozó kísérletsorozatukban apró, a hibahatárt alig meghaladó eltéréseket kaptak. Az erre vonatkozó publikációkat alaposan áttanulmányozva, a mérésekben olyan szisztematikus hibalehetőséget találtunk, amely indokoltá tette a kísérletek – mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek melletti – megismétlését.

2017 júniusában a Wigner Fizikai Kutatóintézetben döntés született az EPF-mérések Eötvös-ingával történő megismétlésére és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására. A mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja,

a BME Általános- és Felsőgeodéziai Tanszéke, az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE), a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke vesznek részt, más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával.

A méréseket a KFKI területén lévő Jánosy Föld alatti Fizikai Laboratóriumban, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények és kontrollált feltételek között tervezzük. A mérések előkészületi munkái több mint egy éven keresztül folytak a BME Általános- és Felsőgeodéziai Tanszékén. A mérések céljára átalakított Eötvös–Pekár-inga 2018. december 20-án került a mérések helyszínére, a Jánosy Föld alatti Fizikai Laboratóriumba [16]. Az inga beszállítása, az előzetes kalibrációs mérések, a vezérlőmotor tesztelése és ez alapján első fejlesztése megtörtént, a CCD-érzékelők felszerelése és a vezérlő szoftver programozása, a vonalkódos skála elkészítése és az első próbatömegek gyártása lezajlott, a precíziós kódgyűri felszerelése 2019 áprilisában megtörténik. A tényleges mérések – terveink szerint – ezután azonnal elkezdődnek.

Irodalom

1. Eötvös R., Pekár D., Fekete E.: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik* (1922) 11–66.
2. Tóth Gy.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciamérések szabályos hibája. *Fizikai Szemle* 69/5 (2019).
3. Fischbach E., Sudarsky D., Szafe A., Talmadge C., Aronson S. H.: Reanalysis of the Eötvös experiment. *Physical Review Letters* 56/11 (1986) 3.
4. Bod L., Fischbach E., Marx Gy., Nárayné Ziegler M.: Az Eötvös-kísérlet száz éve. *Fizikai Szemle* 42/3 (1992) 94–101.
5. Király P.: A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle* 57/1 (2007) 1.
6. Franklin A., Fischbach E.: *The rise and fall of the fifth force: Discovery, pursuit, and justification in modern physics*. Springer (2016).
7. Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H.: The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26 (1964) 442.
8. Braginsky V. B., Panov V. I.: Verification of Equivalence Principle of inertial and Gravitational Mass. *Zb. Eksp. Teor Fiz.* 61 (1971) 873.
9. Adelberger E. G., Gundlach J. H., Heckel B. R., Hoedl S., Schlamminger S.: Torsion Balance Experiments: A Low-energy Frontier of Particle Physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 62 (2009) 102–134.
10. Völgyesi L., Moser M.: The Inner Structure of the Earth. *Periodica Polytechnica Chem. Eng.* 26 (1982) 155–204.
11. Völgyesi L., Moser M.: The Inner Structure of the Moon. *Periodica Polytechnica Chem. Eng.* 29 (1985) 59–70.
12. Nobili A. M., Anselmi A.: Relevance of the weak equivalence principle and experiments to test it: Lessons from the past and improvements expected in space. *Physics Letters A* 382 (2018) 2205–2218.
13. Szabó Z.: Az Eötvös-inga története. *Magyar Geofizika* 40/1 (1999) 26–38.
14. Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ulmann Z.: Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban. *Geomatikai Közlemények XII* (2009) 71–82.
15. Csapó G., Laky S., Égető Cs., Ulmann Z., Tóth Gy., Völgyesi L.: Test measurements by Eötvös-torsion balance and gravimeters. *Periodica Polytechnica Civil Eng.* 53/2 (2009) 75–80.
16. Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Péter G., Kiss B., Deák L., Égető Cs., Fenyvesi E., Gróf Gy., Ván P.: Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére. *Magyar Geofizika* 59/4 (2018), 165–179.