

## Hullámfront-érzékelés és processzálás parallel on-chip implementációja

### OTKA szakmai beszámoló

A OTKA pályázat keretében a hullámfront-érzékelés és processzálás parallel on-chip implementációjának vizsgálatára vállalkoztunk. Ennek azért van nagy jelentősége, mert az úgynevezett hullámfront szenzorokban találkozunk a fejlett fényérzékelő tömbök technológiája a nagysebességű valós idejű feldolgozási igénnyel, amit párhuzamos, szenzor-közeli eszközökkel lehet teljesíteni. Ekkor nem lépnek fel az adatok soros továbbítása által okozott késések és a megvalósuló eszköz kisebb fogyasztású és nagyságrendekkel olcsóbb lehet, ami jelentősen tágítja a lehetséges alkalmazások körét. A feladat végrehajtására többféle megközelítést is kipróbáltunk. Az első két módszer az egyik legelterjedtebb hullámfront mérő elrendezést az úgynevezett Shack-Hartmann szenzort alkalmazza. Ez egy szenzor-tömbből és egy megfelelően elé illesztett lencse mátrixból áll (lenslet). Egy-egy lencse (subapertúra) a megfigyelt tárgynak (pl. referencia csillagnak) a bejövő hullámfront lokális ferdeségének megfelelően eltolt képét adja. Az ezen eltolások alapján számolt deriváltakból lehet meghatározni a bejövő, nagy sebességgel, dinamikusan változó hullámfrontot. Kiterjedt objektumok vizsgálata esetén az eltolódások meghatározása korrelációs módszerrel lehetséges (ez jel/zaj arány szempontjából is optimális), aminek viszont igen jelentős műveletigénye van.

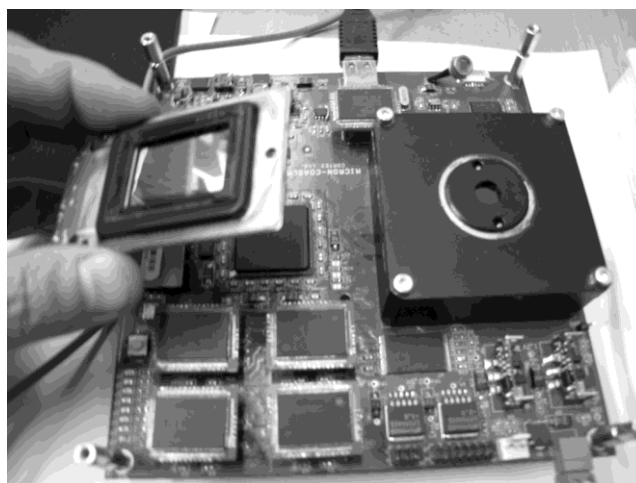
1,

Az első megközelítésben egy teljesen új, kevert - analóg és digitális processzással egyaránt rendelkező, celluláris architektúrát használó, párhuzamos processzással képes - programozható szenzorhoz (Eye-Ris) illesztettünk egy lencse mátrixot (Shack-Hartmann szenzor). Az így összeállított eszközre készítettünk egy korrelációs hullámfront mérő algoritmust. Ugyan az eszközön elérhető felbontás nem túl nagy (176x144), de magán a chip-en a párhuzamosan futó algoritmus következtében igen nagy sebesség érhető el. Kísérleteink azt mutatták, hogy a feladat chip-en való implementálása hatékonyan megoldható analóg, illetve részben analóg, részben digitális műveletek segítségével. Megvizsgáltuk melyek az eszköz párhuzamos processzással a határai, illetve a berendezés speciális tulajdonságaihoz illesztettük az algoritmust. Vizsgálataink azt mutatták, hogy csak viszonylag kis hullámfront torzítások esetén érdemes a korrelációs szenzort használni, mert a mért analóg képek eltolása során a hiba halmozódik. Így csak néhány pixelyi eltolás valósítható meg, mivel a korreláció kereső ablaka limitált. Távcsővel végzett előkísérleteink azt mutatták, hogy ez a viszonylag kis lehetséges elmozdulás nem korlátozza lényegesen az eszköz alkalmazhatóságát. Megjegyzendő, hogy az algoritmus a mért képeket még digitalizálás előtt, analóg módon képes feldolgozni. Ennek előnye az, hogy az eltolás, az abszolút különbségképzés és az átlagolás műveletek – a digitalizálás szűk keresztmetszetét kikerülve – párhuzamos módon megoldhatóak. A szükséges nem párhuzamosítható műveleteket a kamerába épített digitális adatfeldolgozó eszköz végzi. Ilyen például a minimumok keresése és a sub-pixeles pontosságú interpoláció, illesztés. Az így megmért lokális

hullámfront-meredekség adatok alapján szintén a chip felületén rekonstruálható a hullámfront alakja. Tehát nem csak a mérés, hanem a rekonstrukció során is van mód on-chip processzálásra. A berendezés skálázható és így a továbbiakban a teljesítménye is jelentősen növelhető, mivel a méret növelésével elméletileg nem csökken az elérhető sebesség. Az eszköz további fejlesztése során mind a felbontás, mind a szenzorelemek fényérzékenysége és a digitális feldolgozó egység sebessége nőni fog. Egy adott alkalmazás specifikus igényeinek megfelelő módosításokra természetesen szükség lehet és ezek akár más feladatok elvégzését is segíthetik. Megmutattuk tehát, hogy a chip felületén végrehajthatóak a hullámfront torzulások méréséhez szükséges algoritmusok leginkább számítás-igényes lépései és ezáltal egy igen nagy sebességű, olcsó és széles területen alkalmazható hullámfront szenzor készíthető.

2,

A második megközelítés során (combined optically addressable spatial light modulator, COALSM) egy speciális, nagysebességű- és felbontású CMOS szenzort használtunk a hullámfront érzékelésére. (Itt is Sack-Hartmann szenzort alkalmaztunk, ahol a CMOS szenzor egy megfelelő lencsemátrix-al van kiegészítve.) Ezt egy nagyteljesítményű, párhuzamos processzálásra alkalmas FPGA eszközzel egészítettük ki, ami a szenzor kontrol funkcióján kívül a szükséges processzálásokat is elvégzi. Az eszköz hullámfront korrigáló egysége egy nagy sebességű LCOS mikro-megjelenítő, aminek a kontrol funkcióit is a beépített FPGA látja el. Előnye az előző kísérleti összeállításhoz képest (1), hogy a CMOS szenzor - ami a hullámfrontot érzékeli egy lencse-tömb segítségével - nagy sebessége mellett a felbontása és a pontossága is jóval nagyobb, mint az előző megoldás esetében (1280x768, 540Hz). További előnye, hogy az érzékelőhöz sebességben és felbontásban illeszkedő folyadékkristályos fázis-modulátor eszközt is tartalmaz, ami a hullámfront-kompenzációt végzi. Mivel korrelációs hullámfront szenzort építünk, igen nagy számítási kapacitásra volt szükség, amit egy sok logikai kapuval rendelkező FPGA eszköz tud párhuzamosan megoldani, lehetővé téve a nagysebességű- és felbontású hullámfront érzékelő megépítését (24x40-48x80 subapetúra). Az önállóan is működőképes (standalone) eszköz USB interface-szel kapcsolódik egy számítógéphez, melyen keresztül lehet tesztelni és a programparamétereket állítani. Nagy belső memóriája segítségével a szenzor és a megjelenítő (hullámfront korrektor) lokális hibáit, egyenetlenségeit kompenzálni lehet. Az eszköz (HDL) kontrol programja elkészült és sebesség tekintetében teljesíti az előzetes elvárásokat. Ez egy önmagában is igényes programozási feladat volt, hiszen az összes alkatrész más-más méretű és sebességű adatbusszal rendelkezik. Gondoskodni kellett továbbá számos kiegészítő funkcióról is, mint az USB, UART, SPI, memóriakezelés. A tesztelés folyamatban van, néhány (hardware) hiba még javításra vár. A berendezés készültségi foka ~98%. Az eszköz képe a foton látható. Elkészült a számítógépes vezérlő program, mely a fejlesztés előrehaladtával további funkciókkal bővül. Érdeemes meg jegyezni, hogy az általunk épített berendezés paramétereivel rendelkező eszköz a piacon jelenleg sehol sem beszerezhető. A nagyságrendekkel lassúbb, kisebb felbontású és nem programozható eszközök is – számos alkalmazásban – elérhetetlenül drágák, áruk jelen OTKA pályázat teljes támogatási összegénél is magasabb.



A korrelációs alapú hullámfront szenzor processzálása SAD (Sum of Absolute Difference) algoritmust alkalmaz. Ennek a rutinnak FPGA implementálására korábban már készültek megoldások – amelyeket főleg MPEG kódolási célokból fejlesztettek. Elkészítettük ennek a SAD algoritmusnak egy igen hatékony, új, párhuzamosított FPGA implementációját, amely (erőforrás-kihasználás szempontjából) jobb és gyorsabb, mint az eddig publikált megvalósítások. A hullámfront szenzor a hullámfront torzulás lokális gradiensét méri. Kifejlesztettünk egy hatékony algoritmust, amely ebből visszszámolja a hullámfront torzulást (kétdimenziós integrálás) és megoldja a fázissimítás (phase unwrapping) feladatát is. Folyamatban van a fázistorzulásokat korrigáló eszköz fejlesztése. Mivel megfelelően nagy memória nem áll rendelkezésre (nagy adat sávszélesség), a nagy sebesség eléréséhez zonális korrekciókat hajtunk végre a modális (sorfejtett Zernike komponensek megjelenítése) helyett. Ennek a beállítása, kalibrálása időigényes és nehéz feladat, ezért az eddigiekben csak a hullámfront szenzor rész működőképességére koncentráltunk(, OTKA pályázatunk keretében is csak erre vállalkoztunk). Elgondolásunk szerint a berendezés képes lesz zárt hurkú kontrol esetén is a szenzor valós idejű feldolgozásának sebességét elérni. Célunk a továbbiakban a fejlesztett eszköz teljes befejezése és adaptív optikai alkalmazása.

3,

Megkezdjük egy harmadik eljárás megvalósítását is, ami ugyan nem kapcsolódik szorosan a pályázatban eredetileg eltervezett módszerekhez, de a kitűzött célok más módú megvalósításához igen; ezért említjük meg itt. A gyors hullámfront-érzékelésre szolgáló eljárás térbeli fázistolás-interferometrián alapul (FINCH). Ennek lényege, hogy a hullámfrontról egyszerre több, önmagával képzett, nulla úthossz-különbségű interferogrammot veszünk fel különböző fázistolásokkal ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ). Ekkor a hullámfront fázisa egyszerűen (elemi algebrai műveletekkel) meghatározható. Igaz ugyan, hogy a négy interferenciakép egyidejű, párhuzamos mérése jelentősen csökkenti az elérhető felbontást, de ez még mindig bőven elegendő lehet adaptív optikai alkalmazásokhoz. Így nulla úthossz különbségű interferometriát alkalmazva nem

ütközünk abba az akadályba, hogy a módszer csak koherens fényvel működik. Nincs szükség egy különálló referencia nyalábra sem, amit például az eredeti hullámfront egy tülyukkal szűrt verziójaként szoktak előállítani. Ezáltal nem csak megfelelő referencia csillag alkalmazásakor, vagy lézeres adaptív optikában használható, hanem kiterjedt inkoherens objektumok esetében is. A szükséges fázismoduláló eszközt megterveztük és legyártattuk. Folyamatban van az optikai rendszer pontos megtervezése és összeállítása, aminek nehézségét az adja, hogy a fázis-moduláló eszköz pontos pozicionálása, leképezése a használandó szenzor felületére munkaigényes: meg kell tervezni és mérni, hogy mely szenzor pixelekre milyen fázis-tolt képpontok esnek.

#### Alkalmazási területek:

Az elkészített hullámfront-érzékelőt elsősorban olyan helyeken tervezzük alkalmazni, ahol a nagy sebesség és felbontás mellett elegendő fény áll rendelkezésre. Ez a követelmény például a napteleszkópok és lézeres technikák esetén teljesül. A hullámfront mérése módot ad arra, hogy sok rövid expozíciójú képből a torzítások, azaz a hullámfront alapján meghatározott elmosódás ismeretében akár digitálisan kiszámítsuk az eredeti képet. Így kisebb felbontás esetén akár valós idejű digitális képjavításra is lehetőség, van, ami távmegfigyelés esetén a légköri vibrálás, hullámozás okozta blöört jelentősen csökkenti. További alkalmazási lehetőség optikai rendszerek jusztirozása és aberrációinak kimérése.

A kombinált (COALSM) berendezés, ami a hullámfront szenzoron kívül tartalmazza az LCOS optikai modulátort, alkalmazható lehet Fresnel inkoherens holográfiához, vagy akár mozgó elem nélküli zoom optika is kialakítható vele. Felhasználható lehet nagysebességű, optikailag is címezhető spatial light modulator-ként, és földi megfigyelések képének (felbontásának) a javítására is. Pályázati és egyéb források bevonásával tervezzük az eszközök prototípusá fejlesztését.

#### Megjelent közlemények

Szabolcs Tökés, László Orzó, Ahmed Ayoub “Programmable OASLM as a Novel Sensing Cellular Computer” Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, pp. 63-67. The Marmara Istanbul Hotel August 28 – 30, 2006 Istanbul, Turkey

Detre Örs Hunor: Nagy felbontású optikai csillagászat földi távcsövekkel, ELTE Csillagászati Tanszék, 2007

Mező György, Regály Zsolt, Orzó László és Detre Örs: Szögmásodperc alatti felbontás hagyományos távcsövekkel – Magyarország, Fizikus Vándorgyűlés Eger, 2007

György Mező, Zsolt Regály, Örs Detre, László Orzó “Speckle interferometry for testing CMOS”  
VLT Summer School 2008, Keszthely

[http://www.vlti.org/events/assets/4/documents/gyorgy\\_mezo\\_short\\_talk.pdf](http://www.vlti.org/events/assets/4/documents/gyorgy_mezo_short_talk.pdf)

L. R. Orzó, G. Mező, S. Tőkes, A. Radványi, “Combined optically addressable spatial light modulator for affordable adaptive optics” SPIE proceedings Vol. 7015, 70153M1-8, Marseille, 2008

Zoltán Kincses, László Orzó, Zoltán Nagy, György Mező and Péter Szolgay, “ High-speed, SAD based wavefront sensor architecture implementation on FPGA” Journal of Signal Processing Systems, Springer, Submitted; Manuscript Number: VLSI669

Zoltán Kincses, László Orzó, Zoltán Nagy, György Mezo and Péter Szolgay, “Implementation of a paralell SAD based wavefront sensor architecture on FPGA” ECCTD. Submitted;