

A koherens optikai mérés technika legújabb eredményei és hasznosítási lehetőségük a közúti közlekedésben

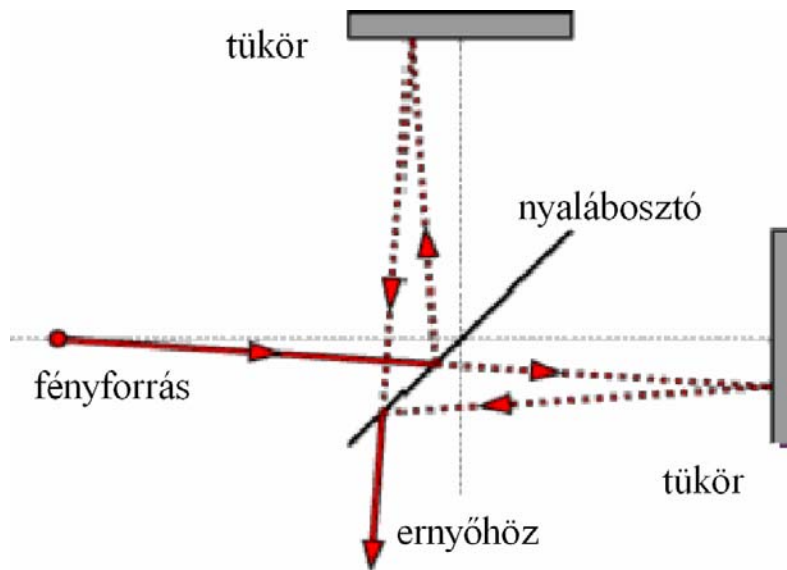
Papp Zsolt, Kornis János
BME Fizikai Intézet, Fizika Tanszék
1111 Budapest, Budafoki út 8.
papp@phy.bme.hu, kornis@phy.bme.hu

Az optikai mérési technikák alkalmazása lehetővé teszi tárgyak – pl. járművek, útfelület, alkatrészek stb. - érintésmentes vizsgálatát. Sok esetben egy jó minőségű ipari kamerával rögzített kép is informatív lehet a felhasználó – vagy a döntést előkészítő automatika ill. számítógép - számára. A koherens optikai módszerek általában bonyolultabb mérési összeállítást igényelnek, mint a klasszikus optikai elrendezések. Ennek oka az, hogy a vizsgálandó tárgy felszínéről szóródott fénynek nem csak az intenzitását, hanem a fázisát is rögzítik. Ehhez általában koherens fényforrásra (lézert) van szükség. Fázishelyes képrögzítés után sok esetben visszaállítható a vizsgált tárgy 3 D-s képe. Ez lehetőséget ad arra, hogy nagy pontosságú (akár $0,1 \mu\text{m}$) alak-, elmozdulás-, deformáció- stb. méréseket lehessen végezni. Az előadás bevezető részében vázlatosan ismertetjük a koherens optikai mérések alapjául szolgáló, legtöbbet használt eljárásokat: interferométerek alkalmazása, holográfia, digitális holográfia és elektronikus szemcsekép interferometria. A mérés technikai alkalmazásokat - azok igen nagy száma miatt - itt csak vázlatosan felsoroljuk. (Az előadáson a felhasználási és hasznosítási lehetőségeiket több képpel is demonstráljuk, valamint az előadás után részletes diskusszióra is lehetőség van.)

A koherens optikai mérés technika néhány módszere

1. Interferometria, interferométerek

Az 1. ábrán látható egy tipikus Michelson típusú interferométer vázlatos rajza.



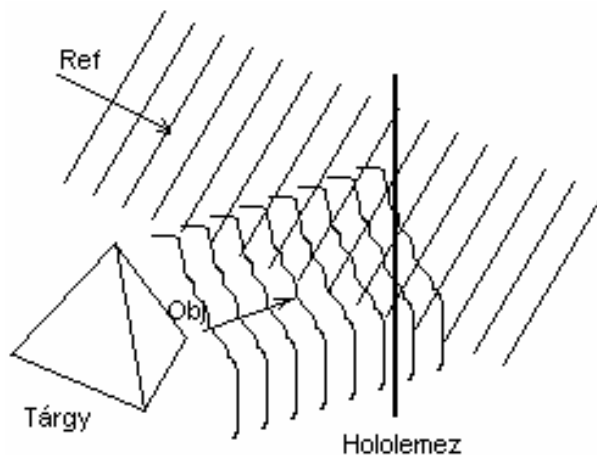
1. ábra

A fényforrásból a nyalábosztóra érkező fénynyalábot a nyalábosztó két – általában ugyanakkora intenzitású részre bontja. Azok a tükrökről visszaverődve majd a nyalábosztón újra áthaladva közel azonos irányban haladnak. A tükrök nyalábosztótól mért távolságától függ a nyalábok fázisa, amelyek különbsége határozza meg az interferáló nyalábok intenzitását. Az alkalmazott fényforrás hullámhossza jellemzően $0,5 \mu\text{m}$ körüli érték. Ebből adódik az interferométerek viszonylag nagy mérési pontossága: az interferométer egyik tükrének elmozdítása mérhető akár a $0,1 \mu\text{m}$ -es pontossággal is. Hasonló elrendezések igen jól használhatók elmozdulás ill. távolság mérésére is. Laboratóriumi körülmények között, rezgésmentes környezetben az említett mérési pontosság még legalább egy nagyságrenddel növelhető, azonban a mérhető legnagyobb elmozdulás mindössze általában néhány méter.[1], [2], [3] Interferométereket több mint 100 éve használnak, azonban mérés technikai alkalmazásuk a koherens fényforrás vagyis a lézer megjelenésével terjedt el. Ipari körülmények között vagy a közúti közlekedésben távolságmérésre vagy elmozdulásmérésre többfajta lézeres eljárás is létezik. Ezek a módszerek némelyike nem az interferencia jelenségén alapul; a mérési pontosság is általában kisebb ($0,1 \text{ mm} - 1 \text{ cm}$), viszont a mérési tartomány akár több 100 m is lehet. Számítógéppel összekapcsolt interferométer segítségével megoldható a távolság és az elmozdulás valós idejű mérése, mely lehetővé teszi a közlekedésmérnökök, gépészmérnökök számára pl. az olyan speciális közlekedésbiztonsági mérések elvégzését is, amelyek az emberi test anatómiai jellegzetességeire építve meghatározza az egyes testrészek térbeli elmozdulásait, sebességeit, anélkül, hogy beavatkoznánk a bio-dinamikai rendszer működésébe. A modellezés elméleti megalapozásában jelentős eredményeket értek el G. Gissinger és T. Péter [16]. Eredményeiket felhasználva és a javasolt mérési módszerekkel kiegészítve, a nemlineáris humán dinamikai rendszer tömeg és geometriai paramétereinek, a korábbiaknál sokkal pontosabb identifikálására nyílik lehetőség.

A profil ill. felületi alakmérés igen fontos alkalmazási területe még az interferometriának. Laboratóriumi körülmények között sík, szférikus ill. kváziszférikus felületek mérése szintén nagy pontossággal történhet. Kereskedelmi forgalomban több cég is árulja berendezéseit. [4] Az említettektől eltérő formájú – esetenként nagyméretű - tárgyak 3D-s alakmérése nagy pontossággal és gyorsan csak speciális esetekben valósítható meg.

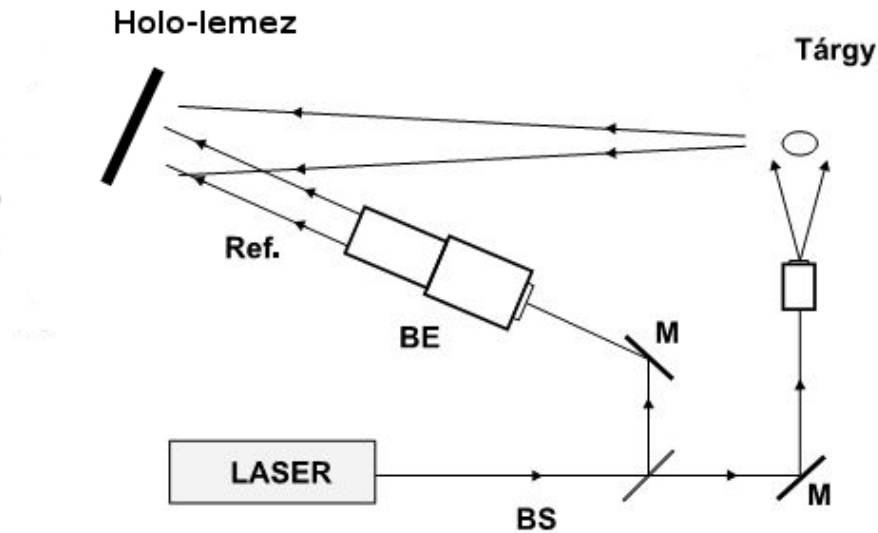
2. Holográfia, holografikus mérési módszerek.

A Gábor Dénes által 1947-ben felfedezett holográfia mint képrögzítési eljárás megjelenése után hosszú ideig, egészen pontosan 1963-ig kellett várni míg a valódi, 3D-s tárgyról készített első hologramok megjelentek. Ennek oka abban rejlik, hogy élvezhető ill. kiértékelhető hologram készítéséhez koherens fényforrásra (lézer) van szükség, viszont az első lézert csak 1960-ban építették. A lézerek megjelenése után a holográfia is gyors fejlődésnek indult.



2. ábra

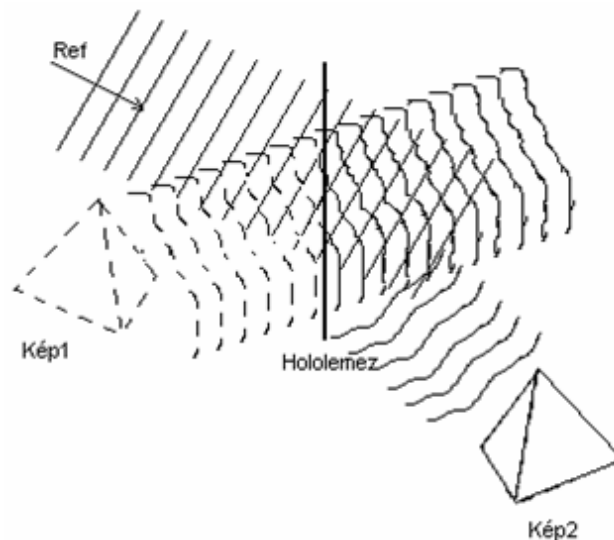
A szokásos fényképezési eljárások esetében a filmen vagy fotólemezzen a tárgy felületéről szóródott hullám (fény) valamely optikai eszközzel (lencse, objektív, stb.) történt leképezése által kapott intenzitáseloszlást rögzítik. A holografikus képrögzítés annyiban tér el ettől, hogy egyrészt nincs leképező optikai elem. Másrészt a tárgyat koherens fényvel (lézernyaláb) világítják meg és a fotólemez nemcsak a tárgyról szóródott fény, hanem a tárgyról szóródott hullámmal (a továbbiakban tárgyhullám) koherens segédnyaláb (a továbbiakban referenciahullám) is megvilágítja. (2. ábra) A két hullám interferál és a kialakult interferenciakép exponálódik a lemezre. Egy tipikus, hologram felvételére alkalmas elrendezés elvi vázlatja látható a 3. ábrán.



3. ábra

(Jelölések: BE nyalábtágító, BS: nyalábosztó v. féligáteresztő tükör, M: síktükör)

Ezután a fotólemez vagy filmet a hagyományos fotózásban is használt hívási technikához hasonló fotokémiai eljárások segítségével előhívják; ez a hologram. A tárgy 3D-s képének megtekintéséhez csak arra van szükség, hogy a kész hologram lemezt a felvételnél használt referenciahullámmal (vagy egy azzal hasonló koherens nyalábbal) megvilágítsuk. (4. ábra)



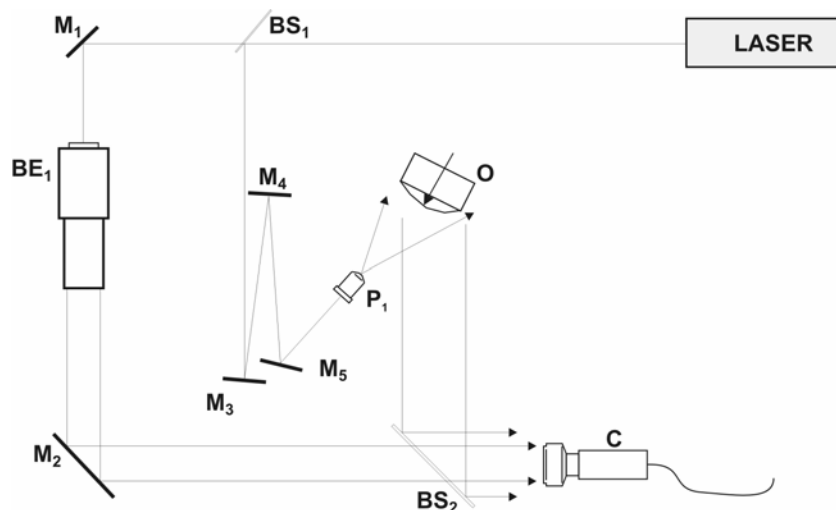
4. ábra

Az ábrán látható, hogy ilyenkor két kép is megjelenik. Az egyik a valódi, rekonstruált hullámfront, míg a másik az. un. konjugált hullám. (Megfelelő elrendezéssel elérhető, hogy egyszerre csak az egyik jelenjen meg.) A hologramról diffraktálódott referenciahullám olyan mint a tárgyról szóródott fény; ezért látjuk a tárgy 3D-s képét. Az a tény, hogy a hologram segítségével visszaállítható a tárgy hullám számos mérési elrendezés kialakítására ad lehetőséget, mint például 3D-s alakmérés, elmozdulás mérése, stb.

A holografikus mérési módszerek előnyei: A tárgy felülete lehet diffúz. Nagyméretű objektumokról (pl. egy személygépkocsi) is lehet hologramot felvenni. Összehasonlító mérések elvégzése is lehetséges, stb. Különböző technikák, alkalmazásával elérhető, hogy a mérési pontosság a $0,1 \mu\text{m}$ - 1 cm tartományon belül változhat. Impulzuslézer alkalmazásával gyorsan mozgó tárgyról is lehet hologramot készíteni. A holografikus mérés technika használatát ipari körülmények között megnehezíti, hogy az elrendezést rezgésmentes optikai asztalon célszerű összeállítani. [5], [6], [7], [8], [9]

3. Digitális holográfia

A holografikus mérés technika számos, az iparban, a gépészetben, a közlekedésgépészetben és a közúti közlekedésben jól használható módszer alkalmazására nyújt lehetőséget, mint az az előzőekben felsoroltakból kitűnik. A hagyományos holografikus eljárások használatának egyik hátránya az egyéb képrögzítési technikákkal szemben az, hogy az exponált holografikus lemezt fotokémiai eljárásokkal elő kell hívni. Ez a leggyorsabb hívási eljárásoknál is néhány percet igénybe vesz, valamint laboratóriumi körülmények vagy sötétszoba is szükséges. Erre a problémára kínál megoldást a digitális holográfia. A digitális holográfia azt jelenti, hogy hologramlemez helyett általában egy CCD kamerával rögzítik a tárgy hullám és a referenciahullám által előállított interferenciaképet. A rögzített hologramot számítógéppel tárolják és a rekonstrukció, azaz a kép megjelenítése numerikus feldolgozás segítségével történhet. Ennek az a nagy előnye, hogy egyrészt kihagyható egy kémiai folyamat, másrészt pedig a megjelenítés és a feldolgozás gyorsaságának mindössze az elektronika szab határt. Hátránya abból adódik, hogy a ma még kereskedelmi forgalomban kapható digitális kamerák felbontása jóval kisebb, mint egy holografikus lemeznél. Jellemzően a CCD mátrix pixelmérete $10 \mu\text{m} * 10 \mu\text{m}$, addig egy hagyományos hologramlemez felbontása elérheti akár a $0,5 \mu\text{m}$ -t is. A CCD pixelek meghatározzák a maximális térfrekvenciát, ami olyan kicsi, hogy a tárgynyáláb és a referenciányáláb csaknem azonos irányból kell, hogy a kamera félvezető lapkájára essen. (5. ábra) Ebből adódik, hogy a visszaállított kép felbontása jóval gyengébb mint egy hagyományos hologram által rekonstruált kép.

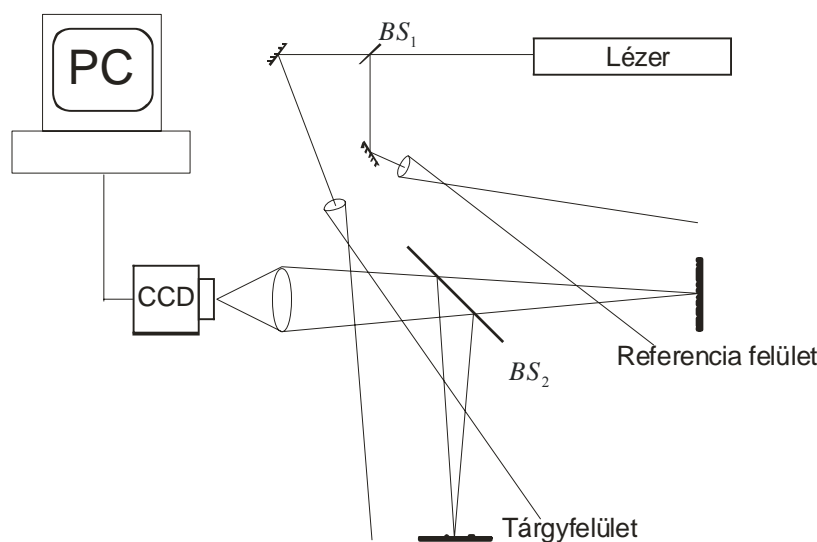


5. ábra

Számos alkalmazás esetében azonban nincs szükség nagyfelbontású kép visszakódolására, ezért az utóbbi kb. tíz évben jelentős kutatások folytak a holografikus mérési technikák helyettesítésére digitális holográfiával. [10], [14], [15]

4. Elektronikus szemcsekép interferometria (ESPI)

Az elektronikus szemcsekép interferometria egyesíti a holográfia és a gyors felvételt, rögzítést és kiértékelést lehetővé tevő ipari kamerás fényképezés előnyeit. A módszer lényege abban áll, hogy a tárgyról szórt és egy objektívvel leképezett nyalábja mellé egy azzal koherens fénynyalábot, egy referenciahullámot kevernek. (6. ábra) A felvett képek kiértékelése gyorsan elvégezhető. Az ESPI elrendezések összeállítása általában nem túlzottan bonyolult. Igen jól alkalmazhatók rezgéseképek felvételére, de deformáció és alakmérésre is használható. [11]



6. ábra

Alkalmazási lehetőségek

Az alábbiakban felsorolt mérési technikák jól alkalmazhatók a gépészet, a közlekedésgépészet valamint a közúti közlekedés speciális mérési feladatainak megoldására.

- 3D-s alakmérés (szintvonalazás változtatható szintkülönbséggel)
- Összehasonlító alakmérés (mestertárgy és az attól esetleg távol lévő testtárgy összehasonlítása)
- Deformációs analízis (hőmérséklet- vagy nyomásváltozás hatására bekövetkező alakváltozás mérése, felszín alatti anyaghibák, törések, repedések kimutatása)
- Gáz ill. folyadék áramlás 3D-s megjelenítése, sebességtér meghatározása
- Elmozdulás mérése, elmozdulásmező számítása (egyidejű deformáció és elmozdulás mérés, stb.)
- Vibrációs analízis (spektrum felvétele, rezgéskép megjelenítése, stb.)
- Diffúz felületek statisztikai analízise (érdesség ill. hullámosság mérése)

A közlekedés terén a forgalom elemi összetevői (pálya, jármű, ember) dinamikai viselkedése, egymásra gyakorolt hatása rendkívül fontos mind forgalombiztonsági, mind élettani, mind gazdasági szempontból. Az emberi test viselkedésének vizsgálata az egyes forgalmi helyzetekben, baleseti, orvosi biológiai és közlekedés komfort szempontjából igen jelentős.

A közúti közlekedés két –talán - legfrekvenciáltabb kérdésköre a vezető és a pálya! Vizsgálatuk valóban rendkívül indokolt. Az optikai mérés technikai módszereinket ezen a két területen kívánjuk továbbfejleszteni.

A járműdinamika alapvető rendszerei közül a legtöbb bizonytalanságot a vezető hordozza magában. A vezetőre irányuló környezeti hatásokat különösen felerősíthetik egyéb tényezők, mint például fáradtság, betegség, stb. Ezzel párhuzamosan a környezeti viszonyok határozzák meg a látásviszonyokat (köd, napszak, csapadék) és az útfelület tulajdonságait is nagymértékben megváltoztathatják: az útfelületnek mind az egyenetlensége mind a tapadási tényezője megváltozik különböző időjárási feltételek között (pl. havas, jeges vagy vizes útviszonyok).

A balesetekért javarészt a vezetők felelősek, de a balesetek nem lennének elkerülhetetlenek! A balesetek közel 40%-a az ütközést megelőzően működésbe lépő alkalmas jelzőrendszer, 60 % pedig megfelelő vezérlő-beavatkozó rendszer használatával megelőzhető lenne. A balesetek többségét a vezető azért nem tudja elhárítani, mert az adott kritikus vezetési helyzet meghaladja az emberi érzékelés és beavatkozás küszöbszintjét, emiatt kontrollálni sem tudja járműve mozgását.

Az optikai mérés technikában alkalmazott módszerek segítségével különböző méretű és alakú tárgyak felületének háromdimenziós alakmérése a 0,1 mm -es pontosságtól a néhány centiméteres felbontásig terjed. Kutatómunkánk során ezeket a laboratóriumban már vizsgált módszereket kívánjuk alkalmazni akár ipari körülmények között is az emberi pozíció meghatározására olyan pontossággal és felbontással, melyre idáig nem volt alkalmazás. A kidolgozandó eljárás eredményeként kifejleszthető mérőrendszerek autógyártás, útépités, útkarbantartás területén lennének hasznosíthatók.

A koherens optikai mérések összeállítása általában nem igényel túlzottan nagy anyagi ráfordítást. Némelyik – pl. vibrációs analízis - nem csak optikai laboratóriumban hanem ipari v. üzemi körülmények között is használható. Rezgő ill. lengőmozgást végző komplex rendszerek (pl. járművek) leírására készültek modellek. [12] Valamely teszttárgy összetett mozgásának dinamikus vizsgálata az említett módszerek alkalmazásával elvégezhető. Összehasonlító alakmérés segítségével meghatározható pl. egy alkatrész kopása, elhasználódásának mértéke. Nagy időfelbontású koherens optikai mérési módszerek lehetővé teszik pl. pneumatikus membránok mozgásának leírását vagy egy modell motorban az üzemanyag eloszlásának mérését a befecskendezés különböző fázisaiban, stb.

A felsorolt példák jól mutatják a lézeres mérési eljárások által nyújtott előnyöket. El kell azonban mondani, hogy az említett módszerek gyakran jóval bonyolultabb műszerezettséget igényelnek, mint a hagyományos képrögzítési eljárások (ipari kamera, videofelvétel, stb.), azonban a megfelelő pontosság ill. időfelbontás általában fázisérzékeny mérési technikák használatát igényli.

Hivatkozások:

1. P. Hariharan: Basics of Interferometry, Universitz Press 1991.
2. Nussbaum A.: Modern optika mérnököknek és kutatóknak Műszaki kvk. 1982.
3. Budó – Mátrai: Kísérleti Fizika III. , Tankönyvkiadó 1977
4. <http://www.zygo.com>
5. Hariharan P.: Optical holography, Univ. Press. 1984.
6. Jüptner, Werner P.O.: Holography technics and applications, proc. ECO1 Hamburg, 1988.
7. Schumann W.: Holography and deformation analysis, Springer 1985.
8. Vienot J.: Holográfia optikai alkalmazásokkal, Műszaki kvk. 1973.
9. Kreis T.: Handbook of holographic interferometry, Wiley, 2005.
10. Schnars, Jueptner: Digital holography, Springer 2005.
11. Ed. J. C. Dainty: Laser speckle and related phenomena, Springer 1975.
12. T. Péter: Reduction of parameters of spatial non-linear vehicle swinging systems, for identification and optimisation purposes. *Periodica Polytechnica Vol.36.No.1.1992. 131-141 p*
13. Zs. Papp, J. Kornis, Z. Füzessy: Computer aided measuring the shape of aspherical lenses, proc. Fringe'93, Akademie Verlag 1993.
14. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, "Difference displacement measurement using digital holography", Optics Communications 214 (2002), 115-121

15. B. Gombkötő, J. Kornis, Z. Füzessy, T. Rózsa, "Difference displacement measurement using digital holograms as coherent masks", Proc. of SPIE Vol. 5144 (2003) 578-584, Optical Metrology 2003
16. G. Gissinger, T. Péter and A. Racle, „Non-Linear Modelling, Identification and Validation of Driving Comfort in a Motor Vehicle”. *8TH MINI CONF. ON VEHICLE SYSTEM DYNAMICS, IDENTIFICATION AND ANOMALIES*, 11-13 November, 2002. BUDA PEST 227-240 p.