

ESTUDI DE LA QUALITAT D'IMATGE D'UNA ULLERA DE LLARGA VISTA PER ANÀLISI DE L'ONA EMERGENT

Carme FERRAN, Santiago VALLMITJANA

Departament de Física Aplicada i Òptica, Universitat de Barcelona
carme.ferran@ub.edu; santi.vallmitjana@ub.edu

Paraules clau: instruments òptics, telescopis, ulleres, ulleres de llarga vista

Study of the image quality of a spyglass by means of analysis of the emerging wave

Summary: This study presents a way to obtain the information needed to simulate the images seen through an old spyglass without any kind of manipulation. The method is based on the analysis of the emergent wave by means of a wavefront sensor, once the spyglass is illuminated with suitable lighting. The main advantage of the method is that it avoids dismantling the instruments to measure parameters, which is not always possible or advisable. To prove the precision and reliability of the method, we used a spyglass dated from the beginning of the 20th century, achieving good results. After this preliminary work we intend to extend the study to even older telescopes and other optical instruments.

Key words: optical instruments, telescopes, spyglass

Introducció

Per a la història de la ciència és molt important conèixer els límits que la tecnologia de cada època imposa als investigadors, ja que ens ajuda a entendre les conclusions i apreciacions a les quals els científics arribaren en funció de la tecnologia de què disposaven. L'evolució en els instruments òptics i per tant en la qualitat d'imatge ha suposat una peça clau en la història dels descobriments. La importància dels telescopis és indiscutible i, per tant, l'estudi del seu desenvolupament tecnològic permet valorar les possibilitats de la recerca en cada període de temps considerat.

Un exemple històric el trobem en les descripcions dels anells de Saturn (Arcimis, 1901: 360-362; Rosselló, 2002: 93-129). A partir de les seves observacions, Galileu, Cassini, Gasendi, Caramuel i altres expliquen l'existència d'unes nanses o llunes a banda i banda del planeta, amb formes canviants,

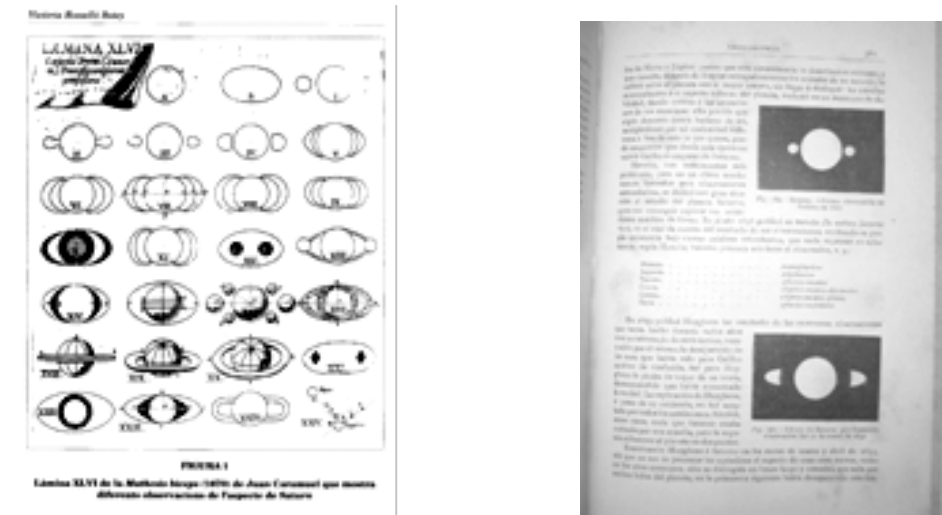


Fig. 1. Esquerra: Descripcions de Caramuel. Dreta: Extracte d'*Astronomia Popular*, d'Arcimis.

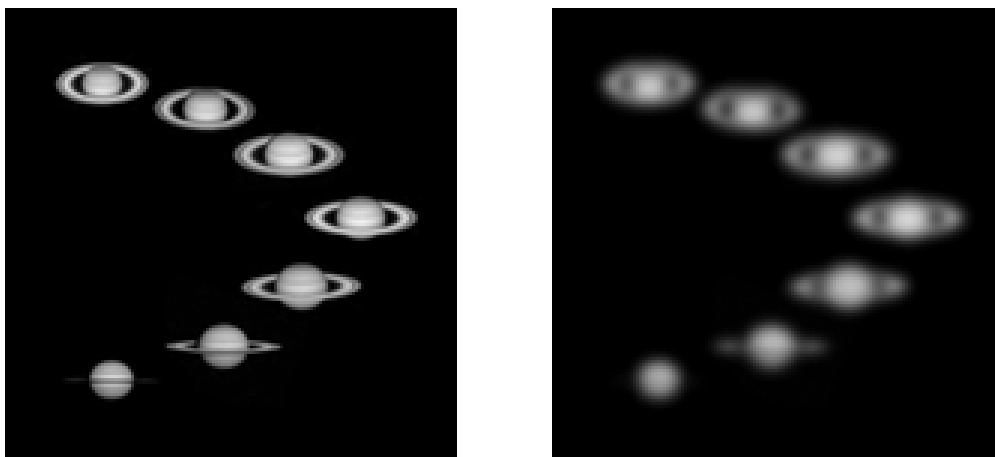


Fig. 2. Esquerra: Imatge «perfecta» de Saturn amb diferents inclinacions dels seus anells. Dreta: Mateixa imatge de Saturn alterada amb un filtre de Gauss simulant la presència d'aberracions.

com es pot veure en la figura 1. La presència d'aberracions en els instruments òptics que utilitzaven donava lloc a una manca de qualitat en la imatge que no els permetia tenir suficient poder resolutiu per distingir els anells, confonent-los amb altres objectes. El canvi en la forma i posició de les nanses es devia a la variació en la inclinació dels anells que es dona en períodes de 14 o 15 anys aproximadament.

En la figura 2 es mostra una simulació digital que explica aquest aspecte canviant. S'ha degradat una imatge amb diverses inclinacions de Saturn amb un filtre bastant similar a la resposta impulsional (PSF que descrivim en el proper paràgraf) que tindria l'objectiu amb aberracions òptiques d'una ullera astronòmica.

En aquest estudi es mostra com és possible obtenir la informació necessària per simular les imatges que produiria una ullera sense necessitat de manipular-la. El mètode es basa en l'anàlisi de l'ona emergent mitjançant un sensor de front d'ona, un cop la ullera és il·luminada amb una llum adequada. Per comprovar la precisió i fiabilitat del mètode, s'ha aplicat a una ullera de llarga vista de

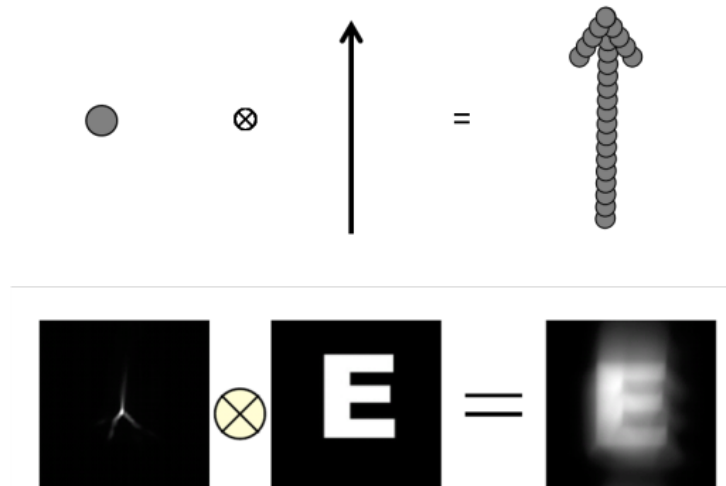


Fig. 3. La imatge real es pot obtenir com la convolució de la imatge perfecta (al centre) per la PSF del sistema (esquerra).

principis del segle xx, obtenint uns bons resultats. Amb aquest treball preliminar es pretén continuar l'estudi per a telescopis més antics i altres instruments òptics.

Factors que intervenen en la qualitat d'imatge

Un sistema teòricament perfecte donaria un punt com a imatge d'un punt. Lamentablement els sistemes òptics no són perfectes i la imatge d'un punt resulta ser un punt imatge estès, el que anomenem resposta impulsional (PSF, *point spread function*). Les causes d'aquesta extensió són dues: la difracció i les aberracions (Goodman, 2005: 127-172). La difracció, conseqüència del caràcter ondulatori de la llum, causa que la imatge d'un punt sigui una distribució d'intensitats corresponent a l'anomenat disc d'Airy. Les aberracions provoquen que la imatge d'un punt adopti diverses formes segons el tipus dominant. Tant l'efecte de la difracció com la presència d'aberracions (esfèrica, coma, astigmatisme, cromàtica) limiten en gran mesura el poder resolutiu dels instruments òptics, ja que dos punts propers, en quedar estesos, poden convertir-se en una única taca.

La imatge d'un objecte o escena és el resultat de l'operació matemàtica coneguda com el producte de convolució de l'escena perfecta per la resposta impulsional del sistema. Tal com s'ha dit, aquesta resposta impulsional, o PSF, és la funció que descriu la imatge estesa d'un punt objecte, a causa de la difracció i de les aberracions. Per tant, el coneixement d'aquesta funció és molt útil per avaluar la qualitat en la imatge de qualsevol instrument i ens permet simular l'aparença de la imatge real a través de l'instrument.

En la figura 3 es representa l'aspecte que tindria la imatge d'un sistema òptic en el qual es coneix la funció PSF.

Predicció de la imatge d'un instrument òptic

A part del mètode directe de determinar la qualitat d'imatge d'un instrument òptic mitjançant l'observació d'objectes reals, és possible utilitzar mètodes indirectes mitjançant càlculs i simulacions. Des del punt de vista teòric és possible simular les imatges obtingudes amb programes de disseny de sistemes òptics sempre que es coneguin tots els paràmetres involucrats en totes les lents i miralls, com són radis de curvatura, índexs de refracció, gruixos i distàncies relatives. Però això suposa desmuntar

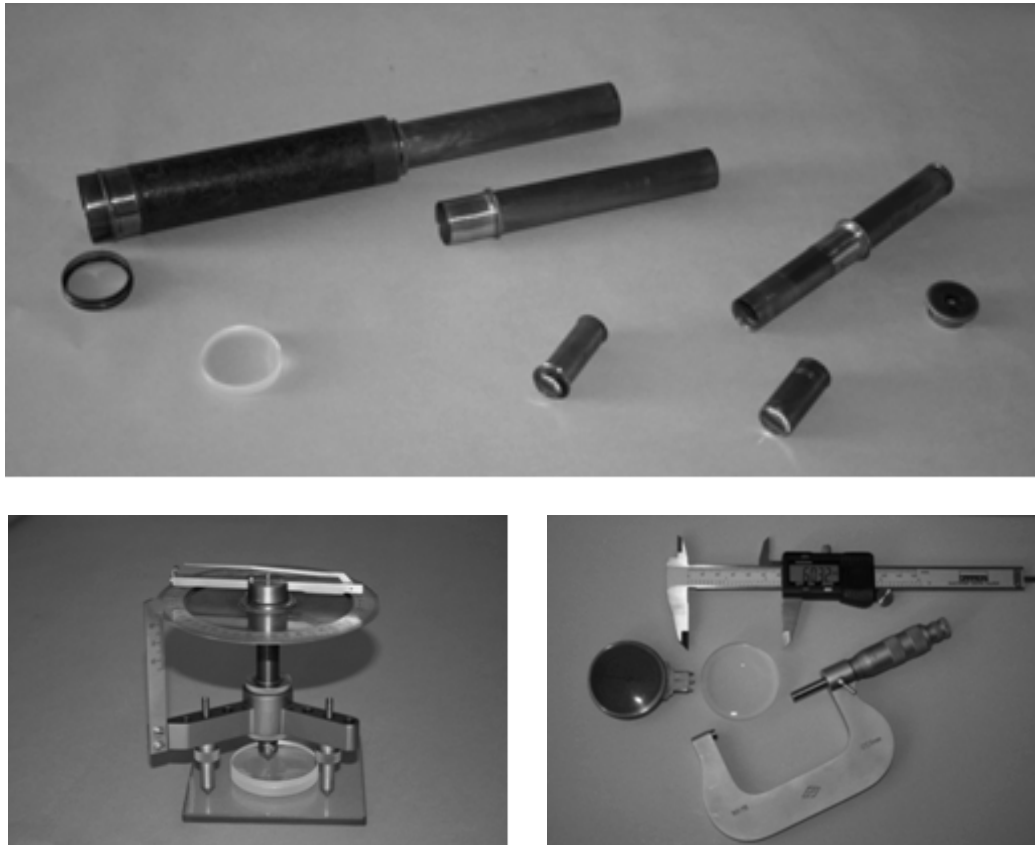


Fig. 4. Superior: Telescopi desmuntat en els seus diferents components.
 Inferior esquerra: Esferòmetre per mesurar radis de curvatura.
 Inferior dreta: Peu de rei i palmer per mesurar gruixos.

els aparells per poder mesurar els esmentats paràmetres, cosa que no sempre és factible. En el procediment de desmantellament i mesura dels diferents elements, es pot malmetre greument l'instrument en conjunt, fet que no interessa en absolut, especialment quan es tracta de peces o aparells antics o d'exemplars de gran valor històric. Aquest és el gran inconvenient dels mètodes de contacte per avaluar les característiques dels sistemes òptics. En la figura 4 es mostren les parts d'una ullera de llarga vista i els instruments per mesurar amb precisió radis de curvatura i gruixos, evidenciant el desmuntatge i el contacte en mesurar.

En aquest estudi presentem un mètode alternatiu de no contacte, basat en l'anàlisi del front d'ona. L'instrument en qüestió és il·luminat per un front d'ona pla, és a dir, un feix col·limat d'un làser amb una fibra òptica, simulant la formació d'imatge d'un objecte situat a l'infinit. El front d'ona emergent és rebut i analitzat per un sensor de front d'ona, tal com es representa en la figura 5.

El sensor de front d'ona

Els sensors de front d'ona mostren els «problemes» que presenten els elements òptics una vegada un feix de control ha travessat l'instrument considerat. Aquests problemes representen la diferència del front d'ona respecte el front d'ona ideal o de referència, és a dir, les components matemàtiques que caracteritzen les aberracions òptiques. La figura 6 mostra la diferència de camí entre el front d'ona de referència i el front d'ona aberrat.

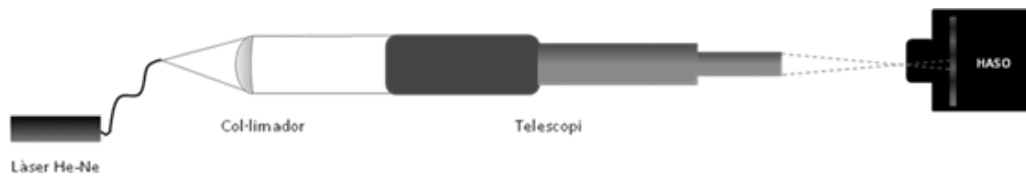


Fig. 5. Esquema del muntatge per l'anàlisi del sistema òptic.

Les desviacions òptiques del front d'ona respecte el pla de referència o front d'ona esfèric

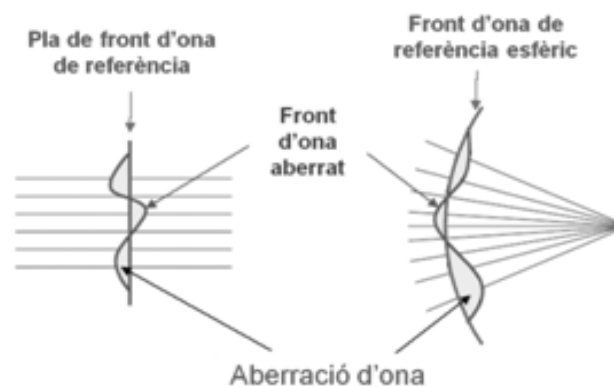


Fig. 6. Diferència de camí entre el front d'ona de referència i el front d'ona aberrat.

La tecnologia del sensor de front d'ona Shack-Hartmann utilitzat es basa en el càlcul dels paràmetres d'aberració a partir de les inclinacions del front d'ona incident sobre una xarxa de microlents. El sistema mesura la diferència en la posició del punt de focalització de cada microlent sobre el xip CCD situat a la focal d'aquestes lents (Platt & Shack, 2001: 573-577).

En la figura 7 es representen aquestes diferències en el cas d'un front pla perfecte i en el cas d'un front d'ona real.

El sensor de Shack-Hartmann es va desenvolupar l'any 1974 per testejar làsers i a principis de la dècada de 1980 es va començar a fer servir en sistemes d'òptica adaptativa. Actualment aquests sensors es fan servir en oftalmologia, astronomia, òptica adaptativa i nombrosos tests òptics. La seva versatilitat i rapidesa a l'hora de determinar les aberracions permet crear sistemes per compensar i corregir aquestes imperfeccions aproximadament en temps real (Merkle, 1989: 224-232).

Procediment experimental i resultats

L'estudi s'ha dut a terme sobre una ullera de llarga vista del 1916, del fabricant anglès TT & H Ltd. (ambdues informacions gravades en el tub), amb un objectiu de 50 mm d'obertura, 500 mm distància focal, un inversor de dues lents i amb un augment intermedi de 3X i un ocular de 35 mm de distància focal. Les ulleres de llarga vista són telescopis de poc augment (entre cinc i trenta augments) en les quals s'ha afegit un sistema de lents per adreçar la imatge, originalment invertida. En la figura 8

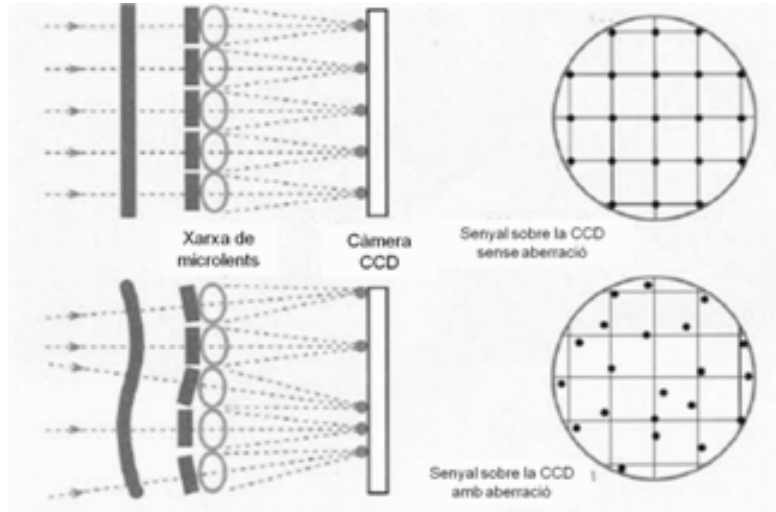


Fig. 7. Mètode de funcionament de la tecnologia Shack-Hartman per a l'anàlisi del front d'ona.



Fig. 8. Ullera de llarga vista sotmesa a anàlisi durant l'estudi.

es veu fotografiada la ullera conjuntament amb un anunci seu en un exemplar de *Times Weekly Edition* de 1924.

En primer lloc s'han captat les imatges d'un parell d'objectes de referència, amb un telescopi modern de bona qualitat i amb la ullera descrita. Les imatges captades amb el telescopi modern ens serviran com a model d'imatges «perfectes». El conjunt d'operacions està reflectit en la figura 9.

En el laboratori s'ha realitzat, com es veu en la figura 10, el muntatge que consisteix en una fibra òptica connectada al làser d'He-Ne que proporciona llum monocromàtica i una lent que proporciona un feix col·limat que incidirà sobre la ullera, simulant la il·luminació d'un objecte llunyà. El sensor està situat després de la ullera, i està connectat a l'ordinador per poder calcular els paràmetres de les aberracions.

S'ha dissenyat un programa per simular la PSF a partir dels valors mesurats experimentalment en el sensor de front d'ona, i per generar les imatges corresponents a la convolució de les imatges perfectes amb la PSF corresponent. Com a mètode de comparació es va captar la PSF experimentalment substituint el sensor Shack-Hartmann per una càmera CCD. Mitjançant aquest



Fig. 9. Superior esquerra: Telescopi modern amb la càmera CCD connectada per obtenir les imatges perfectes. Superior dreta: Càmera CCD connectada a la ullera de llarga vista per obtenir imatges experimentals. Inferiors: Imatges resultants.

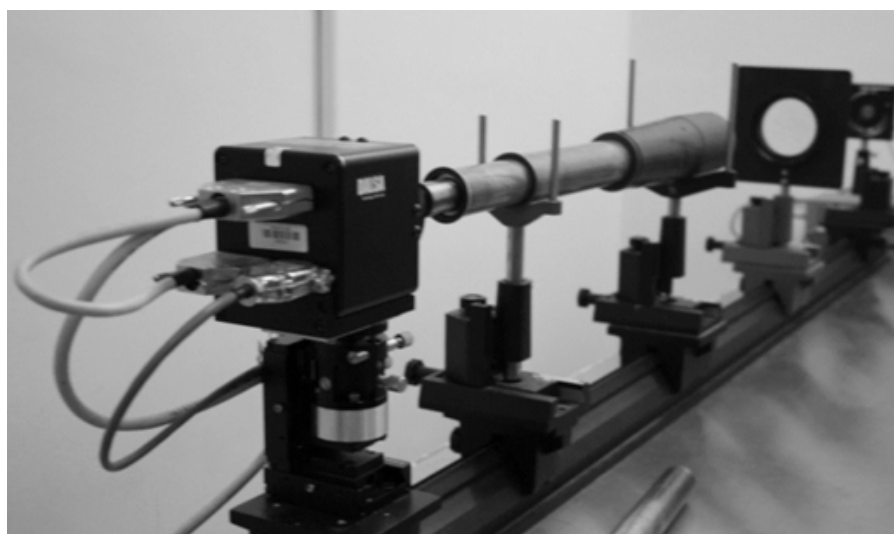


Fig. 10. D'esquerra a dreta: Sensor d'ona. Ullera de llarga vista. Lent col·limadora. Fibra òptica connectada a un làser.

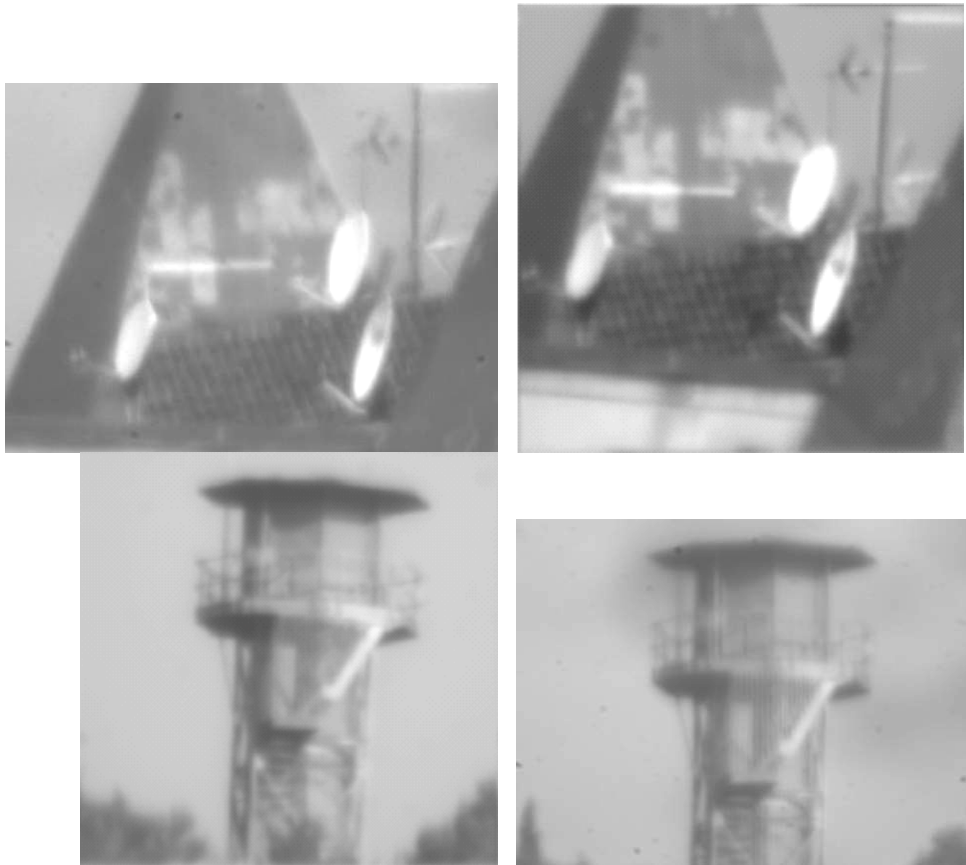


Fig. 11. A l'esquerra, les imatges captades a través de la ullera de llarga vista.
A la dreta, les imatges simulades per càlcul.

procediment es pot visualitzar i comprovar l'encert dels càlculs a partir de la PSF simulada, la PSF experimental i el diagrama d'impactes que ens proporciona el mateix software del sensor.

Com a resultat final, es pot comparar la qualitat de les imatges simulades amb les imatges captades a través de la ullera tal com es veu en la figura 11. A l'esquerra, les fotos de les imatges captades directament a través de la ullera de llarga vista. A la dreta, les imatges simulades per càlcul amb la PSF, a partir dels paràmetres obtinguts en el laboratori per l'anàlisi del front d'ona a través de la mateixa ullera.

Conclusions

L'estudi de sistemes òptics mitjançant l'anàlisi de l'ona emergent és una tècnica prometedora que pot permetre obtenir uns bons resultats i analitzar la qualitat d'imatge. El principal avantatge és que la tècnica per sensor de front d'ona és un mètode de no contacte, que evita així haver de desmuntar l'instrument i la seva manipulació amb els instruments de mesura. També pot suposar un gran avantatge en el cas d'instruments delicats que no poden ser traslladats fora d'un museu o d'una col·lecció o d'una zona de reserva.

Actualment s'està posant a punt aquesta tècnica i després d'aquest treball preliminar es pretén continuar l'estudi amb telescopis més antics i altres instruments òptics.

Bibliografia

ARCIMIS, A. T. (1901), *Astronomía Popular*, Barcelona, Montaner y Simón Ed.

GOODMAN, J. W. (2005), *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Co. Publishers.

MERKLE, F. (1989), «Adaptive optics for the ESO-Very Large Telescope», *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1.013, p. 224-232.

PLATT, B. C.; SHACK, R. (2001), «History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing», *Journal of Refractive Surgery*, 17, 573-577.

ROSSELLÓ BOTEY, V. (2002), «L'Astronomia de Juan Caramuel Lobkowitz (1606-1682)», *Cronos. Cuadernos Valencianos de Historia de la Medicina y de la Ciencia*, 5-6, 93-129.

Agraïments

Aquest estudi ha estat parcialment finançat pels projectes: HAR2008-02580-E/HIST i per DPI2008-04175/DPI.

Carme Ferran agraeix la beca APIF de la Universitat de Barcelona.