



UNIVERSITAT DE BARCELONA



DISSENY I CONSTRUCCIÓ D'UN CORRELADOR ÒPTIC DUAL INTEGRANT LES ARQUITECTURES DE VANDERLUGT I DE TRANSFORMADES CONJUNTES

Universitat de Barcelona
Departament de Física Aplicada i Òptica

Ignasi Labastida i Juan

Capítol 1

Introducció

Aquest treball s'engloba dins d'una de les línies de recerca que se segueixen en el Laboratori d'Òptica del Departament de Física Aplicada i Òptica de la Universitat de Barcelona, el reconeixement òptic d'objectes o formes. L'objectiu d'aquest reconeixement és detectar un objecte o motiu en una imatge complexa o escena, i determinar-ne la seva posició, si hi és. Aquest procés fonamentalment es realitza mitjançant la correlació òptica entre les dues imatges determinant-ne el grau de semblança. Aquesta operació es pot realitzar digitalment però també és possible dur-la a terme òpticament mitjançant muntatges òptics que reben el nom genèric de correladors. Abans de presentar la motivació i els objectius d'aquest treball cal realitzar una breu aproximació històrica per conèixer l'estat actual d'aquest camp de recerca dins del món del processat de la imatge.

1.1 Aproximació històrica

L'origen dels processos de reconeixement òptic cal buscar-lo en un treball d'Abbe, el qual va idear un mètode per millorar la resolució dels microscopis mitjançant el filtrat espacial de la transformada de Fourier (TF) de la imatge d'entrada [Abb73]. Tot i aquesta referència de finals del segle XIX, l'inici del reconeixement òptic mitjançant correladors s'ha de situar al 1964, quan VanderLugt va proposar el muntatge que rep el seu nom, el correlador clàssic de VanderLugt o $4f$ [Van64]. Les principals característiques d'aquesta arquitectura eren la realització simultània de dues transformades de Fourier òptiques i la utilització d'una imatge complexa o filtre, creada a partir de l'objecte a reconèixer. El procés de generació d'aquesta imatge es basava en l'enregistrament hologràfic del patró d'interferències creat a partir de la TF del motiu i una ona plana de referència [Van64].

Al 1966, Rau [Rau66] i Weaver i Goodman [WG66] van proposar per separat un nou muntatge per al reconeixement òptic, el correlador de transformades conjuntes (JTC¹). Aquest nou mètode no requeria la utilització de filtres ja que en el mateix pla d'entrada s'introduïen l'escena i el motiu a detectar i es realitzava llur transformada òptica, la intensitat de la qual calia enregistrar per obtenir la correlació mitjançant una segona transformació. Aquesta distribució d'intensitat rep el nom d'espectre de potència conjunt (JPS²) i juga un paper fonamental en el resultat final de la correlació, de la mateixa manera que ho fa el filtre en els muntatges de VanderLugt.

Des de l'aparició d'aquestes dues arquitectures s'han proposat diferents modificacions per millorar el procés de reconeixement, però la base de tots els sistemes òptics emprats fins ara ha estat la d'aquests dos tipus de correladors. La tria d'un dels dos sempre ha portat disparitat d'opinions i s'han realitzat força estudis comparatius on es destaquen els avantatges i desavantatges de cadascun [YSNG90, LYG90, PY97]. D'aquests treballs es pot concloure que en escenes sorolloses i en escenes multiobjecte és millor el VanderLugt que el JTC en termes d'eficiència dels pics de detecció. En canvi, per a aplicacions reals el JTC té com a avantatge la no utilització del filtre i la robustesa en termes d'alineació. Cal dir que l'arquitectura del tipus VanderLugt és molt sensible a l'existència de desalineaments ja que en un mateix pla s'han de superposar la difracció de l'escena amb el filtre generat normalment mitjançant tècniques digitals. Les conseqüències dels possibles errors en la col·locació de les imatges així com la no utilització de les escales adients són diverses, però generalment es tradueixen en l'empobriment dels resultats en la detecció del motiu a reconèixer [Van67, CYZ⁺96, MUMJ97].

Les millores que s'han anat introduint al llarg del temps en el camp del reconeixement òptic es poden dividir en les modificacions que s'han fet en les muntatges i en la introducció d'algorismes per processar la informació a correlacionar. En el primer grup cal destacar les variacions que han sofert els correladors de VanderLugt per aconseguir disminuir la seva llargària. El primer muntatge proposat per VanderLugt [Van64] utilitzava la posició dels plans focals de les lents per col·locar les imatges amb la qual cosa la longitud total del sistema era força gran. Una primera simplificació d'aquesta arquitectura va ser proposada per Taylor i Lipson el mateix any [TL64], basant-se en la utilització de difractòmetres convergents, és a dir eliminant el requeriment de la il·luminació paral·lela. Aquest nou sistema rep el nom de correlador convergent de VanderLugt i redueix aproximadament a la meitat la llargària del muntatge clàssic.

¹Joint Transform Correlator

²Joint Power Spectrum

Al 1982, Joyeux i Lowenthal [JL82] comparen ambdues arquitectures i arriben a la conclusió que el correlador convergent és millor que el 4f tant per la simplificació en el muntatge com pels resultats que s'obtenen. Posteriorment, es varen presentar diversos muntatges que utilitzaven teleobjectius en lloc de lents convergents simples [FBLC86, DWB⁺89, BCG90, JVB92] amb els quals s'escurçava encara més el sistema òptic tot i perdre una quantitat important de llum. La miniaturització dels correladors sempre ha estat un dels objectius per aconseguir incorporar aquests sistemes òptics en aplicacions industrials [BCG90, CGC91, KMS⁺94, KMR⁺97, CMDM98].

Una altra modificació molt important en els muntatges ha estat el canvi de suport per mostrar les imatges. Inicialment s'utilitzava l'enregistrament fotogràfic o hologràfic per visualitzar les imatges emprades en els correladors, el que produïa que els processos de reconeixement s'alentissin. Amb l'aparició dels moduladors espacials de llum (SLM³) el processat òptic d'informació va fer un gran avanç ja que aquests elements permeten controlar la transmissió complexa de la llum que els travessa o s'hi reflecteix, a més d'aconseguir que les imatges es visualitzin a gran velocitat assolint processos de reconeixement a "temps real". D'entre la gran varietat d'aquests dispositius [NAL90, Efr95], cal destacar els que es basen en les propietats dels cristalls líquids, com per exemple les pantalles que es poden trobar en aparells electrònics com els videoprojectors o els televisors de butxaca. Són moduladors que es controlen electrònicament i la facilitat d'accés a aquests dispositius ha fet que el seu ús en muntatges òptics s'hagi estès ràpidament. El principal desavantatge d'utilitzar aquest tipus de moduladors extrets d'aparells comercials és que han estat fabricats per a unes determinades condicions i per tant, a vegades no ofereixen les prestacions que es requereixen per mostrar les imatges en alguns dels processos de reconeixement. Tanmateix, avui és possible disposar de moduladors fabricats especialment per a aquest camp de recerca amb la incorporació d'altres prestacions com per exemple pixelats de poques micres i velocitats de mostreig per sobre de les mil imatges per segon [SSS⁺95, LL00].

Al 1977 es varen començar a introduir els dispositius de cristall líquid en els muntatges de correlació [Gar77]. Es tractava d'una vàlvula (LCLV⁴) col·locada en un correlador de VanderLugt. Aquest dispositiu, que està controlat òpticament, havia estat inventat pocs anys abans [GJB⁺75] per substituir el suport fotogràfic o hologràfic i evitar l'alentiment del procés de reconeixement. Posteriorment varen aparèixer les

³Spatial Light Modulator

⁴Liquid Crystal Light Valve

pantalles de cristall líquid (LCD⁵), el control de les quals és electrònic. Al principi aquestes pantalles eren extretes dels primers televisors de butxaca i rebien el nom genèric de LCTV⁶. Aquests dispositius es varen incorporar en molts dels sistemes de correlació dels anys vuitanta que varen suposar la reactivació del reconeixement òptic com a camp de recerca [LDL85, Gre86, YJLG87]. A la dècada dels noranta l'accés a aquest tipus de moduladors encara va ser més fàcil amb la proliferació dels video-projectors els quals incorporen tres LCDs en cadascun dels aparells. La utilització d'aquests dispositius es va generalitzar degut al seu baix cost i el seu bon comportament com a moduladors de la llum en els correladors [OO93, PDP97, KGDS98, SSG98]. El fet d'emprar les pantalles de cristall líquid va fer que aparegués una línia de recerca paral·lela que es dedicaria a modelitzar i caracteritzar aquests dispositius per poder preveure el comportament en la visualització de les imatges [YY84, LS90, KGTJ92, PC93, SL94, YE95a, CZGM96, DMT98, KGDS98, MDDA98, FPMB⁺00]. Actualment, la utilització d'aquests dispositius provinents d'aparells comercials tendeix a disminuir ja que ha aparegut una nova generació de pantalles amb més prestacions que s'adapten millor als requeriments de les possibles aplicacions com són la velocitat de mostreig i la miniaturització [KMS⁺94, KMR⁺97, CMDM98, CRPC98, CRP98, SNWH98]. Tot i així encara s'utilitzen les LCDs provinents de videoprojector per a prototipus de laboratori i per aplicacions on la velocitat no sigui necessària i en canvi calgui un nombre de píxels important com per exemple en els problemes d'àrea extensa [JK95].

Pel que fa als algorismes els podem dividir en dos grans grups, els que afecten als muntatges del tipus JTC i els dels correladors de VanderLugt. Els primers es basen principalment en modificar el JPS per aconseguir millorar el resultat final del procés de correlació amb la introducció de no-linealitats [Jav89, VJC92]. També és possible intervenir en el pla d'entrada ja sigui preprocessant l'objecte a reconèixer [VCMBJ95] o utilitzant determinades configuracions en el modulador d'entrada [LY96, EGH96, LICY98]. Un dels principals inconvenients del JTC és el desplaçament del pla de correlació respecte el centre així com l'aparició d'un ordre zero que pot arribar a emascarar la detecció. Per aquesta raó s'han proposat diversos mètodes per eliminar aquest terme central [TJ93, LZWY97, MBCJV97, LYY98].

El principal objectiu dels algorismes aplicats en muntatges d'arquitectura VanderLugt ha estat l'estudi dels filtres per millorar el rendiment del correlador pel que fa al seu resultat final en el reconeixement del motiu a detectar. Des que VanderLugt va

⁵Liquid Crystal Display

⁶Liquid Crystal Television

proposar el seu filtre clàssic adaptat [Van64] l'evolució en la generació dels filtres ha anat en paral·lel amb l'evolució en els sistemes de visualització de les imatges fins arribar a funcions que s'ajusten a les propietats dels moduladors i minimitzen una sèrie de paràmetres del pla de correlació determinats a priori [Jud93]. Els primers filtres que varen aparèixer després de l'adaptat van ser modificacions d'aquest mitjançant l'eliminació o modificació de l'amplitud que s'introduïa, d'aquesta manera aparegueren els filtres de fase [HG84], els inversos [AKJ90, KH90] o els d'amplitud compensada [MWW88]. Tots aquests filtres es poden agrupar en un únic grup, els filtres de freqüència fraccionària (FPF⁷) [KH90]. Els FPF es generen a partir de la transformada de Fourier conjugada de l'objecte a reconèixer i cadascun té unes propietats característiques que fan que en el pla de correlació apareguin termes de detecció més o menys lluminosos i més o menys puntuals. Un altre enfocament a l'hora de crear filtres va ser el de generar-los per detectar un determinat objecte però que a la vegada optimitzessin alguns paràmetres del pla de sortida com poden ser el quocient senyal-soroll o l'energia del terme de correlació o la de tot el pla. Aquest tipus de funcions complexes reben el nom de filtres òptims [Réf91, Jud93, MUCJ95], i amb la inclusió dels moduladors com a suport per visualitzar-los, no tan sols es creen per optimitzar paràmetres sinó que s'ajusten a les condicions de treball d'aquests dispositius. El camp de la generació de filtres és molt gran i es troba en contínua renovació ja que sempre es pot intentar buscar una funció millor que permeti detectar un o diversos objectes a l'hora o que pugui reconèixer el mateix objecte en diverses escales i posicions.

1.2 Motivació i objectius del treball

Com s'ha dit al principi, aquest treball està emmarcat en una de les línies de recerca del nostre grup i és la continuació d'altres que s'han desenvolupat al llarg del temps. En el camp del reconeixement òptic, inicialment es varen fer estudis per millorar els muntatges de VanderLugt amb la introducció dels teleobjectius [BVJFM92, JVB92], o la utilització de nous mètodes de codificació hologràfica [VBJR86]. Amb l'aparició dels primers moduladors el grup es va centrar en els muntatges del tipus JTC [Car93, MB98], amb l'anàlisi de nous mètodes per millorar la correlació final mitjançant la introducció de fenòmens no lineals en el JPS. Simultàniament s'estudiaven nous algorismes per a la creació de filtres per detectar un únic motiu o diversos a l'hora [MU95].

⁷Fractional Power Filters

A més, s'iniciava la caracterització de dispositius com les pantalles de cristall líquid o les càmeres CCD [MB98]. Posteriorment, amb el bagatge adquirit amb la utilització de correladors de VanderLugt amb suport fotogràfic, vàrem introduir les LCDs en aquesta arquitectura [Lab97]. En aquest punt ens vàrem plantejar la idea de construir un processador òptic ràpid, compacte i miniaturitzat que combinés les dues arquitectures típiques de correlació. Per arribar a aquest objectiu final primer ha calgut dissenyar i crear un correlador que opera a velocitat de vídeo però que combina el sistema VanderLugt i el JTC, a més de tenir una longitud força reduïda respecte les dimensions de les imatges utilitzades. El disseny i construcció d'aquest correlador de primer nivell ha estat l'objectiu final d'aquest treball.

Les principals diferències entre el processador òptic que es presenta en aquest treball i el que es construirà en el futur, són la velocitat de treball i la grandària de les imatges emprades, el que fa que no es pugui parlar d'un correlador ràpid i compacte. No obstant això, amb aquest primer muntatge s'han utilitzat unes pantalles amb el mateix pixelat que els moduladors d'altres prestacions que s'empraran en el futur. S'ha analitzat la viabilitat de combinar les dues arquitectures típiques de correladors amb el repte d'obtenir unes correlacions úniques i centrades a la sortida d'un JTC i aconseguir reduir la llargària total del correlador convergent de VanderLugt. A més, s'ha continuat l'estudi de les pantalles de cristall líquid que s'havia iniciat amb la incorporació en els muntatges clàssics de transformades conjuntes. Els resultats i les conclusions que es derivin d'aquest treball ens seran útils a l'hora de construir el processador òptic compacte i miniaturitzat a altes velocitats.

La memòria del treball es divideix en set parts, la primera de les quals és aquesta introducció. En el Capítol 2 es fa un estudi detallat de les pantalles de cristall líquid. Primer es presenten alguns models teòrics per descriure les propietats de modulació d'aquests dispositius controlats elèctricament. Seguidament s'analitza el funcionament de les pantalles i s'expliquen les diferents configuracions de treball depenents de la polarització de la llum i el voltatge aplicat. Després d'aquesta visió general d'aquest tipus de moduladors es passa a caracteritzar les pantalles utilitzades en aquest treball. Aquesta caracterització es desenvolupa en el Capítol 2, on s'analitzen els dos tipus de pantalles emprades tenint en compte les seves característiques físiques, el seu funcionament general i el seu comportament quan són travessades per llum polaritzada.

Una vegada s'ha analitzat el funcionament dels dispositius optoelectrònics que utilitzarem en els muntatges òptics cal estudiar aquests sistemes, començant per l'arquitectura JTC, de la qual ens ocupem en el Capítol 4. Abans de desenvolupar alguna

tècnica per assolir millores en aquest tipus de correlador, presentem la configuració clàssica del muntatge analitzant-ne el procés de correlació que s'hi esdevé, així com una petita introducció a un mètode àmpliament utilitzat per millorar les prestacions del JTC, com és la binarització de l'espectre de potències. En aquest capítol desenvolupem un parell de mètodes per assolir un únic terme de correlació centrat en el pla de sortida utilitzant aquest tipus d'arquitectura. Finalment per verificar ambdós procediments es presenten els resultats experimentals que s'han obtingut amb els correladors d'aquest tipus que s'han muntat.

En el Capítol 5 s'estudia el segon gran grup de correladors, els d'arquitectura VanderLugt. Es presenta el primer muntatge d'aquest tipus ideat per VanderLugt al 1964, el correlador 4f, i després s'analitza el funcionament de la configuració convergent. Es fa una breu revisió dels filtres clàssics com són l'adaptat, el de fase i l'invers. Un cop s'ha estudiat la teoria d'aquesta arquitectura, s'explica com s'han muntat els correladors amb els dos tipus de pantalla i els problemes que s'han presentat. En un cas s'ha hagut d'idear un procediment per controlar els dos moduladors amb una sola targeta digitalitzadora de 8 bits, mentre que en l'altre s'ha desenvolupat un mètode per utilitzar filtres de fase en pantalles que no ofereixen suficient modulació de fase per arribar a 2π radians. Al final de cada secció es mostren els resultats experimentals que s'han obtingut.

En el capítol següent es desenvolupa el correlador òptic dual que hem dissenyat. Primer es fa una anàlisi matemàtica per tal de trobar les condicions necessàries que ens permetran tenir un muntatge del tipus VanderLugt d'una longitud reduïda. S'obtenen valors teòrics d'una sèrie de paràmetres i es comparen amb les possibilitats que ofereix el material del qual disposem. Quan ja s'ha dissenyat aquest tipus d'arquitectura es passa al seu muntatge i es realitza un procés de correlació per comprovar-ne el funcionament. Finalment s'estudia la implementació del correlador dual que combina les dues arquitectures proposades mantenint unes mides petites. Amb aquest muntatge s'obtenen nous resultats experimentals emprant l'estructura del JTC. Al final d'aquest capítol s'apunta l'aplicació d'aquest correlador dual al reconeixement d'objectes tridimensionals.

Per acabar, es presenten les conclusions del treball desenvolupat i es comenta la feina que queda pendent així com tasques futures a realitzar. Al final de la memòria s'inclouen quatre apèndixs, el primer dels quals presenta una breu explicació de l'anomenada Òptica de Fourier, és a dir la teoria de difracció i les matemàtiques implicades en tots els processos de correlació. En el segon apèndix es pot trobar una petita introducció a la naturalesa electromagnètica de la llum incloent-hi els fenòmens de polar-

ització que són bàsics per entendre el funcionament de les pantalles de cristall líquid que s'utilitzen en els muntatges òptics desenvolupats. El tercer dels quatre apèndixs és un resum de les sigles que apareixen al llarg de la memòria per tal de poder-les consultar en cas de necessitat. Finalment en el darrer apèndix apareix un llistat de les publicacions relacionades amb aquest treball.

En les darreres pàgines de la memòria hi ha uns índexs de figures, taules i analític per facilitar-ne la lectura.