



Departament de Física Aplicada i Òptica  
Programa de Micro i Optoelectrònica Física  
Bienni 1994-96

DISSENY D'UN PROTOCOL NUMÈRIC PER A LA  
CLASSIFICACIÓ INVARIANT D'IMATGES APLICANT  
TÈCNIQUES MULTIVARIANTS

Memòria presentada per optar al títol de doctor en Ciències Físiques

Directors:  
Dr. Arturo Carnicer González  
Dr. Ignacio Juvells Prades

Jordi-Roger Riba Ruíz  
Barcelona, maig de 2000

## 9. Conclusions

En aquest últim capítol es fa un resum dels resultats del treball, explicant les aportacions noves i les conclusions a què s'ha arribat a partir dels objectius de partida. També es parla de la continuïtat d'aquest treball, ja que hi ha una sèrie de temes molt interessants que sorgeixen com a continuació natural dels resultats obtinguts.

### 9.1. Aportacions noves del treball

En aquest treball s'han desenvolupat una sèrie d'algorismes nous. En quasi totes les fases en què s'ha dividit el procés de classificació hi ha la proposta i el desenvolupament d'algun algorisme nou o la millora d'algun d'existent. A continuació s'exposen les aportacions noves, ordenades segons les fases en què s'ha estructurat el protocol de classificació:

#### **Procés general**

S'ha estructurat un protocol de classificació supervisada per imatges digitalitzades, el qual es divideix en dues parts: el protocol de calibratge i el protocol de classificació (vegeu l'apartat 1.2.). Aquest protocol de classificació té caràcter multidisciplinari i també pot ser aplicat al reconeixement d'objectes de tres dimensions.

### **Característiques discriminants**

En el cas de les característiques discriminants, s'han fet les propostes següents:

- 1.- S'ha proposat un conjunt de característiques invariants extretes d'un disc de radi variable centrat en el CDM de l'objecte. Aquestes característiques es troben explicades en l'apartat 2.5.
- 2.- En el cas dels moments invariants calculats a partir del contorn, en aquest treball se n'ha ampliat l'àmbit d'aplicació a l'esquelet de l'objecte, per a imatges de text o imatges formades per línies. Això es pot trobar en l'apartat 2.9.
- 3.- S'ha proposat un mètode de càlcul de les equacions de l'eix principal d'inèrcia i de l'eix menor d'un objecte. També s'ha definit un conjunt de característiques calculades agafant com a referència aquests eixos. Vegeu els apartats 2.10. i 2.11.
- 4.- S'han fet invariants els moments de les projeccions en referir-los a l'eix principal d'inèrcia i a l'eix menor. Vegeu l'apartat 2.12.

### **Determinació del nombre mínim d'objectes de calibratge**

S'ha proposat un nou mètode *a posteriori* per determinar el nombre mínim d'objectes de calibratge, basat en l'anàlisi del nombre d'errors de classificació dels objectes de calibratge produïts per tècniques ràpides de classificació, com per exemple la LDA i la QDA. Aquesta tècnica es troba explicada en l'apartat 4.2.2.

### **Algorismes de classificació**

Pel que fa als algorismes de classificació, s'han fet les propostes següents:

- 1.- S'ha comparat el comportament d'un nombre elevat de mètodes de predicció i classificació en dos problemes de classificació d'imatges digitalitzades: els segells i les signatures.
- 2.- S'han introduït els mètodes de regressió multivariants (PLS i PCR), molt utilitzats en el camp de la quimiometria, en els problemes de classificació d'imatges digitalitzades. Aquests mètodes es troben explicats en l'apartat 5.1.3.
- 3.- S'ha proposat un nou algorisme de classificació basat a generar, per a cada classe, un paral·lelepípede que contingui les coordenades de tots els objectes de calibratge pertanyents a aquella. Aquesta tècnica es troba explicada en l'apartat 5.2.5.

- 4.- S'ha proposat utilitzar els valors llinars en LDA i QDA donats per les expressions 5.36 i 5.47 que es troben en l'apartat 5.2.1.

## 9.2. Conclusions

Una vegada finalitzat aquest treball, s'ha arribat a les conclusions següents, les quals es presenten agrupades segons les fases en què s'ha estructurat el protocol de classificació:

### Procés general

- S'ha estructurat un protocol de reconeixement de patrons que està constituït per les etapes següents: càlcul de característiques, reducció de dimensions, càlcul del nombre mínim d'objectes de calibratge, calibratge del model matemàtic i classificació d'objectes de test. Aquest protocol s'ha dividit en dues parts diferenciades: el protocol de calibratge del model matemàtic de classificació i el protocol de classificació dels objectes de test.
- Cada problema de classificació d'imatges és un cas particular i, tot i que el protocol descrit en aquest treball sempre serà vàlid, és convenient realitzar un estudi previ dels mètodes més adients per aplicar en cadascuna de les etapes.

### Característiques discriminants

- El càlcul de les característiques discriminants és un pas clau del procés de classificació, segurament el més delicat de tots. Això es deu al fet que són la font més important d'informació del problema, ja que descriuen els objectes i aporten la informació necessària per poder distingir-ne les diferents classes.
- Les característiques que s'han d'escollir depenen del tipus d'imatges tractades (no són el mateix les imatges planes com poden ser els segells, que les imatges lineals, com poden ser les lletres o les signatures, per exemple). Per tant, és necessari que l'operador realitzi, en cada problema concret, un estudi previ del tipus d'imatges que s'han de classificar. Per tant, la tria de les característiques que s'han d'aplicar en cada problema de classificació té un caràcter heurístic.
- Els descriptors de Fourier produeixen molta dispersió de resultats en ser aplicats en imatges digitalitzades. Això es deu al fet que el procés de digitalització varia l'estructura de les freqüències fonamentals dels objectes, fet que pot fer variar molt els resultats de la transformada de Fourier. A més, s'ha comprovat que tenen un cost

computacional molt elevat. Aquest dos factors fan que no sigui recomanable utilitzar els descriptors de Fourier en el reconeixement d'imatges digitalitzades.

- És molt important que els algorismes de càlcul de les característiques siguin al més ràpids i simples possible. Com més complexos siguin, a part de poder requerir un temps de càlcul excessiu, més elevada pot ser la variabilitat que generin en els seus resultats.

### Algorismes de reducció de dimensions

- És important utilitzar algorismes de reducció de dimensions (en particular la CVA): redueixen la dimensionalitat en reduir l'estructura de dades del problema, redueixen el nombre d'objectes de calibratge necessaris, rebutgen la part redundant i de soroll de la informació de les característiques i són molt ràpids en temps d'execució.

### Determinació del nombre mínim d'objectes de calibratge

- És molt important conèixer el nombre mínim d'objectes de calibratge necessaris per entrenar el model matemàtic de classificació. En els casos estudiats s'ha mostrat que el nombre mínim  $n$  d'objectes necessaris és de l'ordre de  $n = 5.m*.c$ , on  $m^*$  i  $c$  són, respectivament, el nombre de variables que descriuen els objectes i el nombre de classes que té definides el problema. Si és possible, s'aconsella utilitzar un nombre d'objectes de calibratge una mica superior, per exemple  $2.n$ .

### Algorismes de classificació

Model	Grau de dificultat	Temps de calibratge	Comportament
PLS	Baix	Alt	Bo
PCR	Baix	Baix	Bo
LDA i QDA	Baix	Baix	Molt bo
SIMCA i DASCO	Baix	Baix	Pobre
$k$ NN	Baix	Baix	Molt bo
Paral·lelepípede	Baix	Baix	Bo
Backpropagation	Alt	Molt alt	Molt bo
Radial Basis	Alt	Molt alt	Molt bo
Lògica difusa	Baix	Alt	Pobre

Taula 9.1

- Després d'haver realitzat dos processos de classificació d'imatges digitalitzades (segells i signatures), s'ha vist que els algorismes de classificació que aporten millors resultats són: la xarxa neuronal *Radial Basis*, el mètode dels  $k$  veïns més propers i els mètodes d'anàlisi discriminant LDA i QDA. En la taula anterior es fa una anàlisi comparativa del comportament dels diferents algorismes de classificació analitzats. La primera columna mostra els mètodes sota anàlisi, la segona columna indica el grau de dificultat d'aplicació de cada un dels mètodes en la fase de calibratge (des del punt de vista de la persona que ha d'executar els algorismes), la tercera compara el temps necessari per calibrar el model i la quarta analitza el comportament dels diferents mètodes, basant-se en la taxa d'errors de classificació. En tots els casos, el temps de classificació d'un objecte de test és molt baix.

### Temps de càlcul

- En els problemes de classificació duts a terme en aquest treball, el procés sencer de reconeixement es pot realitzar pràcticament en temps real, treballant amb ordinadors personals.
- En els casos pràctics de reconeixement d'imatges en els quals s'ha treballat, quasi tot el temps de càlcul s'inverteix en el còmput de les característiques, sent menyspreable el temps necessari per reduir les dimensions del problema, així com el temps de resposta dels algorismes de classificació.

## 9.3. Continuitat del treball

S'ha decidit concloure aquest treball una vegada assolits els objectius inicials, però han quedat molts camps de treball oberts. A continuació es fan una sèrie de propostes de temes que poden ser objecte d'estudi en el futur, molts amb aplicacions reals immediates:

- Optimitzar els codis de tots els programes, amb la finalitat de maximitzar-ne la velocitat d'execució i reduir al màxim el consum de memòria del sistema.
- Afegir imatges afectades per soroll al conjunt de calibratge i veure el comportament dels diferents algorismes de classificació en treballar amb imatges sorolloses.
- Desenvolupar un mètode de reducció de dimensions inspirat en la CVA (és el que produeix millors resultats), però que no suposi iguals matrius de variàncies-covariàncies per a cada classe, sinó que les calculi per a cadascuna d'aquestes.

- Realitzar un estudi detallat de l'evolució del nombre de característiques que s'han de calcular, del nombre de variables que cal retenir i del mínim nombre d'objectes de calibratge en funció del grau de complexitat del problema considerat.
- Estudiar el comportament dels algorismes d'anàlisi discriminant en suposar funcions de densitat de probabilitat més reals que la normal multivariant, és a dir, funcions de densitat de probabilitat calculades "a mida" per cada classe.
- Estudiar altres mètodes de classificació, com ara algorismes de *clustering*, algorismes genètics, etc.
- Treballar en el camp del reconeixement d'objectes parcials, és a dir, objectes que tinguin una part oculta.
- Adaptar, en els casos en què sigui possible, les característiques tractades al cas d'imatges tridimensionals i trobar-ne de noves especialment dissenyades per descriure objectes de tres dimensions.
- Dur a terme casos reals de reconeixement d'objectes tridimensionals.
- Aplicar aquestes tècniques al reconeixement de defectes en superfícies (metalls, pell, tèxtil, plàstic, etc.).