

ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

Analyse d'images : filtrage et segmentation

Ouvrage collectif coordonné par :
J.-P. COCQUEREZ et S. PHILIPP

Préface de H. MAÎTRE



MASSON 

Table des matières

(See contents p.XIX)

| | |
|---|----------|
| Préface | VII |
| Table des matières | IX |
| Notations | XXI |
| I — IMAGE ET SEGMENTATION | 1 |
| II — ATTRIBUTS DE REGION | 7 |
| 1 TEXTURE | 8 |
| 2 ATTRIBUTS STOCHASTIQUES D'UNE IMAGE | 9 |
| 3 MOMENTS ET MOYENNES D'ESPACE D'UNE REGION | 10 |
| 4 MATRICES DE COOCCURRENCE | 13 |
| 4.1 Matrices de cooccurrence et indices de texture du second ordre | 13 |
| 4.2 Périodes calculées à partir des cooccurrences | 17 |
| 4.3 Matrices de cooccurrence généralisées | 18 |
| 5 LONGUEURS DE PLAGE (OU ISOSEGMENTS) | 20 |
| 6 SPECTRE | 21 |
| 6.1 Densité spectrale de puissance | 22 |
| 6.2 Périodes calculées à partir du spectre | 23 |
| 7 CONTRASTE ASSOCIE A UNE REGION | 24 |
| 8 ATTRIBUTS FRACTALS | 26 |
| 8.1 Éléments de théorie fractale et multifractale | 26 |
| 8.1.1 Dimension fractale | 27 |
| 8.1.2 Dimension fractale généralisée | 27 |
| 8.1.3 Spectre multifractal | 27 |
| 8.1.4 Lien entre dimension fractale généralisée et spectre multifractal | 28 |
| 8.1.5 Lacunarité | 28 |
| 8.2 Calcul d'attributs fractals | 29 |
| 8.2.1 Calcul de la dimension fractale : la méthode des boîtes | 29 |
| 8.2.2 Calculs du spectre multifractal | 31 |
| 8.2.3 Calcul des dimensions fractales généralisées | 32 |
| 8.2.4 Lacunarité | 32 |
| 9 ATTRIBUTS SURFACIQUES | 33 |
| 9.1 Courbures | 33 |
| 9.2 Quadriques | 34 |
| 10 ATTRIBUTS GEOMETRIQUES | 36 |
| 11 ATTRIBUTS INTER-REGIONS | 37 |
| 12 CONCLUSION | 38 |

| | |
|--|-----------|
| III — STRUCTURES DE DONNEES ET ALGORITHMES ASSOCIES | 39 |
| 1 INTRODUCTION | 39 |
| 2 PARTITIONS ELEMENTAIRES D'UNE IMAGE ET STRUCTURES ASSOCIEES | 40 |
| 2.1 Partitions élémentaires | 40 |
| 2.1.1 Pavage, maillage d'une image | 40 |
| 2.1.2 Voisinages et métriques associées | 41 |
| 2.2 Partitions irrégulières | 43 |
| 2.2.1 Graphes d'adjacence de régions | 43 |
| 2.2.2 Diagramme de Voronoï | 45 |
| 3 STRUCTURES HIERARCHIQUES POUR LA DECOMPOSITION D'UNE IMAGE | 48 |
| 3.1 Arbre quaternaire ou « quadtree » | 48 |
| 3.1.1 Principe de base | 48 |
| 3.1.2 Le quadtree linéaire | 49 |
| 3.1.3 Discussion | 51 |
| 3.2 Les pyramides : modèles rigides et généralisations | 52 |
| 3.2.1 La structure pyramidale | 52 |
| 3.2.2 Pyramides rigides et pyramides stochastiques adaptatives | 52 |
| 3.2.3 Discussion | 52 |
| 4 CODAGE DE CONTOURS | 53 |
| 4.1 Code de Freeman | 54 |
| 4.2 Codage de la frontière d'un objet en 8-connexité | 55 |
| 4.3 Approximations polygonales | 56 |
| 4.3.1 Approximation par découpage récursif | 57 |
| 4.3.2 Approximation itérative | 59 |
| 5 ETIQUETAGE EN COMPOSANTES CONNEXES | 61 |
| IV — PRETRAITEMENTS | 65 |
| 1 MODIFICATION D'HISTOGRAMME | 65 |
| 1.1 Expansion de dynamique | 66 |
| 1.2 Egalisation d'histogramme | 66 |
| 1.3 Spécification d'histogramme | 69 |
| 2 REDUCTION DE BRUIT | 70 |
| 2.1 Modèles de bruit d'image | 71 |
| 2.2 Filtrés linéaires stationnaires | 72 |
| 2.2.1 Cas continu | 72 |
| 2.2.2 Exemples de filtres réducteurs de bruit | 73 |
| 2.2.3 Cas discret | 75 |
| 2.2.4 Problèmes liés à l'implantation des opérateurs | 77 |
| 2.3 Filtrés non-linéaires stationnaires | 79 |
| 2.3.1 Filtrés d'ordre | 79 |
| 2.3.2 Filtrés homomorphiques | 85 |
| 2.3.3 Filtrage morphologique | 87 |
| 2.4 Filtrés adaptatifs | 88 |
| 2.4.1 Moyennes adaptatives | 89 |
| 2.4.2 Filtre de rang adaptatif | 90 |
| 2.4.3 Moyenne tronquée adaptative | 91 |
| 2.4.4 Filtrage par fractionnement de la fenêtre d'analyse | 94 |
| 2.4.5 Remarques | 94 |
| 2.5 Bruit multiplicatif | 95 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-----|
| 2.5.1 | Algorithme de Lee | 96 |
| 2.5.2 | Filtrage homomorphique | 96 |
| 2.6 | Commentaires | 97 |
| 3 | REHAUSSEMENT DE CONTRASTE | 97 |
| 3.1 | Méthodes linéaires | 98 |
| 3.1.1 | Méthodes basées sur le laplacien | 98 |
| 3.1.2 | Méthodes inverses | 101 |
| 3.2 | Filtrage homomorphique | 101 |
| 3.3 | Filtrage d'ordre adaptatif | 102 |
| 3.4 | Méthodes morphologiques | 104 |
| 3.5 | Observations | 106 |
| 4 | CONCLUSION | 106 |

V — APPROCHE FRONTIERE : METHODES DERIVATIVES,

| | | |
|-------|--|-----|
| | SURFACIQUES, MORPHOLOGIQUES | 107 |
| 1 | METHODES DERIVATIVES | 108 |
| 1.1 | Généralités | 108 |
| 1.2 | Principes généraux d'utilisation des méthodes dérivatives | 112 |
| 1.3 | Approches dérivatives appliquées aux images numériques | 112 |
| 1.4 | Opérateurs dérivatifs du premier ordre | 113 |
| 1.4.1 | Opérateurs de Prewitt et de Sobel | 114 |
| 1.4.2 | Opérateurs de gradients directionnels de Kirsh | 115 |
| 1.4.3 | Opérateurs MDIF et NAGDIF | 116 |
| 1.5 | Opérateurs dérivatifs du deuxième ordre | 118 |
| 1.5.1 | Opérateur laplacien sur voisinage réduit | 118 |
| 1.5.2 | Opérateur de Marr et Hildreth | 118 |
| 1.5.3 | Opérateur de Huertas-Médioni | 119 |
| 1.6 | Approches par filtrage optimal | 120 |
| 1.6.1 | Approche de Canny | 120 |
| 1.6.2 | Opérateur monodimensionnel de Deriche | 125 |
| 1.6.3 | Opérateurs bidimensionnels de dérivation et de lissage de Deriche | 126 |
| 1.6.4 | Opérateurs monodimensionnels de Shen | 130 |
| 1.6.5 | Opérateurs bidimensionnels de Shen | 133 |
| 1.7 | Comparaison des performances théoriques de quelques opérateurs de dérivation | 134 |
| 1.7.1 | Critères continus de comparaison | 136 |
| 1.7.2 | Critères discrets de comparaison | 137 |
| 2 | MODELE SURFACIQUE | 141 |
| 2.1 | Opérateur de Hueckel | 141 |
| 2.2 | Opérateur de Haralick | 142 |
| 2.2.1 | Rappel sur l'approximation polynômiale | 142 |
| 2.2.2 | Polynômes monodimensionnels discrets de Tchebycheff | 142 |
| 2.2.3 | Approximation polynômiale bidimensionnelle | 143 |
| 2.2.4 | Exemple de calcul de masques pour l'opérateur d'Haralick | 144 |
| 2.2.5 | Estimation de la direction du gradient | 145 |
| 3 | MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE | 146 |
| 3.1 | Gradient morphologique | 146 |
| 3.2 | Ligne de partage des eaux | 147 |

| | |
|---|------------|
| 4 LOCALISATION DES CONTOURS ET SEUILLAGE | 149 |
| 4.1 Extraction des maximums locaux de la norme du gradient | 149 |
| 4.2 Seuillage par hystérésis | 150 |
| 4.3 Suivi de ligne de crête | 150 |
| 5 CONCLUSION..... | 152 |
| | |
| VI — FERMETURE DE CONTOURS, CONTOURS VIRTUELS | 153 |
| 1 FERMETURE DES CONTOURS | 153 |
| 1.1 Recherche du meilleur chemin entre 2 extrémités..... | 153 |
| 1.2 Recherche du meilleur chemin à partir d'une extrémité | 155 |
| 1.2.1 Identification des extrémités | 155 |
| 1.2.2 Algorithme de fermeture..... | 156 |
| 2 APPROCHE NEUROMIMETIQUE DE LA VISION..... | 158 |
| 2.1 Modèles de réseaux de neurones pour la vision de bas-niveau..... | 158 |
| 2.1.1 Système d'analyse d'images par réseau de neurones..... | 158 |
| 2.1.2 Masques orientés pour l'extraction de contours..... | 160 |
| 2.1.3 Premier niveau de compétition..... | 162 |
| 2.1.4 Deuxième niveau de compétition | 164 |
| 2.1.5 Coopération orientée..... | 167 |
| 2.1.6 Rétroaction | 169 |
| 2.2 Réalisation d'un système d'extraction et de fermeture des contours avec rétroaction..... | 169 |
| 2.2.1 Description de l'implantation | 169 |
| 2.2.2 Conclusion..... | 171 |
| 3 EXTRACTION DE POINTS CARACTERISTIQUES | 171 |
| 3.1 Utilisation de la diffusion pour l'extraction de points caractéristiques | 173 |
| 3.2 Détection des points caractéristiques grâce à des cellules Center-Off | 175 |
| 4 CONCLUSION..... | 176 |
| | |
| VII — APPROCHE FRONTIERE : METHODES MARKOVIENNES | 177 |
| 1 INTRODUCTION | 177 |
| 2 RESTAURATION ET DETECTION DE BORDS | 178 |
| 2.1 Premier modèle..... | 179 |
| 2.2 Deuxième modèle..... | 180 |
| 2.3 Troisième modèle..... | 182 |
| 3 DEUX ALGORITHMES DETERMINISTES..... | 182 |
| 3.1 GNC (Graduated Non Convexity) | 182 |
| 3.2 Recuit par champs moyens (MFA) | 186 |
| | |
| VIII — APPROCHE FRONTIERE : METHODES VARIATIONNELLES | 191 |
| 1 DETECTION DE CONTOURS : APPROCHES GLOBALES..... | 191 |
| 2 MODELE DE CONTOURS ACTIFS (OU SNAKES)..... | 193 |
| 2.1 Présentation du modèle du contour actif..... | 194 |
| 2.2 Résolution par une approche de type modèle stationnaire | 197 |
| 2.3 Aspects numériques | 199 |
| 2.4 Modèle évolutif et formulation variationnelle | 201 |
| 2.5 Approche numérique et évolution de la courbe | 203 |

| | |
|---|------------|
| 3 MODELE DISCRET DE LA BULLE | 204 |
| 4 CONCLUSION..... | 208 |
| IX — COMPARAISON DES EXTRACTEURS DE CONTOUR..... | 211 |
| 1 DESCRIPTION DES METHODES D'EXTRACTION DE CONTOUR TESTEES..... | 211 |
| 2 COMPARAISON SUR IMAGES DE SYNTHESE | 213 |
| 2.1 Génération des images de test | 213 |
| 2.2 Définitions des critères de comparaison..... | 215 |
| 2.3 Paramètres de réglage des différents opérateurs..... | 218 |
| 2.4 Analyse des résultats | 220 |
| 3 RESULTATS SUR LES IMAGES REELLES | 227 |
| 3.1 Description des images..... | 227 |
| 3.2 Paramètres de réglage des différents opérateurs..... | 228 |
| 3.3 Analyse des résultats | 229 |
| 3.4 Conclusion..... | 231 |
| X — METHODES DE CLASSIFICATION | 239 |
| 1 METHODES MONODIMENSIONNELLES | 240 |
| 1.1 Seuillage global..... | 241 |
| 1.1.1 Recherche des seuils inter-modes | 241 |
| 1.1.2 Recherche des modes | 241 |
| 1.2 Méthodes locales itératives et adaptatives..... | 247 |
| 1.2.1 Méthode itérative de classification bayésienne..... | 247 |
| 1.2.2 Méthode de relaxation-gradient | 251 |
| 1.3 Méthodes de seuillage dynamique intégrant des informations de localisation..... | 252 |
| 1.3.1 Méthode de Nakagawa | 252 |
| 1.3.2 Utilisation du laplacien | 256 |
| 1.3.3 Méthode de Hertz : coopération contour/multiseuillage | 257 |
| 1.4 Discussion..... | 258 |
| 1.5 Conclusion..... | 258 |
| 2 METHODES MULTIDIMENSIONNELLES | 259 |
| 2.1 Classification non supervisée | 260 |
| 2.1.1 Nuées dynamiques | 260 |
| 2.1.2 Classification ascendante hiérarchique..... | 263 |
| 2.2 Classification supervisée | 266 |
| 2.2.1 Construction d'une fonction discriminante | 266 |
| 2.2.2 Construction d'un sous-espace discriminant | 271 |
| 2.3 Méthodes de sélection des attributs..... | 276 |
| 2.3.1 Définition des critères de sélection | 276 |
| 2.3.2 Procédure de sélection des attributs..... | 278 |
| 2.4 Procédure de validation | 278 |
| 3 CONCLUSION..... | 279 |
| XI — APPROCHE REGION : METHODES MARKOVIENNES | 281 |
| 1 REGULARISATION | 281 |
| 1.1 Introduction | 281 |
| 1.2 Un algorithme supervisé de segmentation d'images texturées | 282 |
| 1.2.1 Modèle de texture | 282 |

| | |
|---|------------|
| 1.2.2 Loi jointe | 283 |
| 1.2.3 Estimateur du MAP | 285 |
| 1.3 Segmentation et détection de contours sur des images texturées | 285 |
| 1.3.1 Modèle de contours | 285 |
| 1.3.2 Modèle de segmentation | 287 |
| 2 RELAXATION | 289 |
| 2.1 Introduction | 289 |
| 2.2 Champ de Markov caché et segmentation non-supervisée | 289 |
| 2.3 Un algorithme non supervisé de segmentation | 293 |
| 2.3.1 Formation automatique de germes de base | 293 |
| 2.3.2 Croissance de régions de bas niveau | 294 |
| 2.3.3 Croissance de régions de haut niveau | 295 |
| 2.4 Un algorithme semi-supervisé de segmentation d'images texturées | 297 |
| 2.4.1 Modèle | 297 |
| 2.4.2 Définition de Ω' | 298 |
| 2.4.3 Energie U_1 | 299 |
| 2.4.4 Système de voisinages | 300 |
| 2.4.5 Caractéristiques de textures et seuils | 301 |
| 2.5 Un algorithme supervisé de segmentation d'images non-texturées | 301 |
| 2.5.1 Modèle | 302 |
| 2.5.2 Choix du paramètre β | 302 |
| 2.5.3 Fonction énergie | 303 |
| 2.5.4 Relaxation | 303 |
| XII — APPROCHE REGION : METHODES STRUCTURALES | 305 |
| 1 INTRODUCTION | 305 |
| 2 AGREGATION DE PIXELS | 306 |
| 2.1 Algorithme général | 306 |
| 2.2 Détail de la croissance de régions | 307 |
| 2.3 Convergence | 309 |
| 2.4 Commentaires | 309 |
| 3 SEGMENTATION PAR CORRELATION D'HISTOGRAMMES LOCAUX | 309 |
| 3.1 Généralités | 309 |
| 3.2 Principe | 312 |
| 3.3 Croissance de régions | 313 |
| 3.3.1 La relaxation | 313 |
| 3.3.2 La propagation | 315 |
| 3.3.3 Choix des seuils | 318 |
| 4 DIVISION ET FUSION GUIDEES PAR LES STRUCTURES | 318 |
| 4.1 Présentation générale | 318 |
| 4.1.1 Algorithme général de segmentation par division et fusion | 318 |
| 4.1.2 Remarques sur la convergence et la complexité | 320 |
| 4.2 Fusion de régions dans un graphe | 320 |
| 4.3 Méthode de fusion multicritère | 322 |
| 4.4 Partitionnement de Voronoï | 323 |
| 4.5 Arbre quaternaire (« quadtree ») | 325 |
| 4.6 Approches pyramidales | 329 |
| 4.6.1 Pyramides de graphes | 330 |
| 4.6.2 Compléments sur la stratégie de fusion | 333 |

| | |
|--|----------------|
| XIII — COMPARAISON DES RESULTATS : APPROCHE REGION | 335 |
| 1 DEFINITION DES CRITERES DE COMPARAISON..... | 335 |
| 1.1 Une distance entre deux images de régions..... | 335 |
| 1.1.1 Mesure de Vinet | 336 |
| 1.1.2 Une distance entre deux images de régions | 337 |
| 1.2 Utilisation du contraste inter-région | 338 |
| 2 COMPARAISON SUR DES IMAGES DE SYNTHESE | 338 |
| 2.1 Fabrication des images de synthèse | 338 |
| 2.2 Méthodes testées | 340 |
| 2.3 Paramètres de réglage des méthodes..... | 340 |
| 2.4 Analyse des résultats..... | 341 |
| 2.4.1 Images bruitées (analyse quantitative)..... | 347 |
| 2.4.2 Images bruitées (analyse visuelle)..... | 349 |
| 2.4.3 Images de texture..... | 350 |
| 3 COMPARAISON SUR DES IMAGES REELLES | 350 |
| 3.1 Méthodes testées | 350 |
| 3.2 Paramètres des méthodes..... | 350 |
| 3.3 Résultats sur les images de la banque du GDR 134..... | 352 |
| 3.4 Comparaison..... | 364 |
| 3.5 Conclusion..... | 365 |
| EN GUISE DE CONCLUSION | 367 |
| A — ELEMENTS DE THEORIE DES GRAPHS DIAGRAMME DE VORONOI..... | 369 |
| 1 DEFINITIONS GENERALES DE LA THEORIE DES GRAPHS..... | 369 |
| 1.1 Notions de graphe | 369 |
| 1.2 Chaîne, connexité | 370 |
| 1.3 Graphe valué..... | 371 |
| 2 DIFFERENTES APPROCHES POUR LA CONSTRUCTION DU DIAGRAMME DE VORONOI | 371 |
| 2.1 Approches algorithmiques et distance euclidienne..... | 371 |
| 2.1.1 Approche Divide and Conquer..... | 372 |
| 2.1.2 Méthode incrémentale..... | 372 |
| 2.2 Approches algorithmiques et distance discrète..... | 374 |
| B — CHAMPS MARKOVIENS ET SEGMENTATION | 377 |
| 1 DEFINITIONS | 378 |
| 1.1 Champs markoviens..... | 378 |
| 1.2 Mesure de Gibbs et champs markoviens | 379 |
| 1.3 Expression des probabilités conditionnelles..... | 380 |
| 2 APPROCHE MARKOVIENNE DE LA SEGMENTATION | 381 |
| 3 ESTIMATION DE LA CONFIGURATION λ | 383 |
| 4 ESTIMATION DES PARAMETRES | 383 |

| | |
|---|------------|
| 5 ALGORITHMES DE SIMULATION | 385 |
| 5.1 Echantillonneur de Gibbs | 385 |
| 5.2 Algorithme de Métropolis | 386 |
| 6 ALGORITHMES D'OPTIMISATION | 386 |
| 6.1 Algorithme ICM (Iterated Conditional Modes) | 387 |
| 6.2 Recuit stochastique simulé | 387 |
| C — ELEMENTS DE MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE | 389 |
| 1 MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE APPLIQUEE AUX IMAGES BINAIRES | 389 |
| 1.1 Erosion et dilatation morphologiques | 390 |
| 1.2 Ouverture et fermeture morphologiques | 391 |
| 1.3 Amincissement et épaissement | 392 |
| 2. MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE APPLIQUEE AUX IMAGES EN NIVEAUX DE GRIS | 395 |
| 2.1 Erosion morphologique | 395 |
| 2.2 Dilatation morphologique | 398 |
| 2.3 Ouverture, fermeture morphologiques | 400 |
| 2.4 Amincissement et épaissement | 403 |
| D — RAPPELS DE TRAITEMENT DU SIGNAL | 405 |
| 1 TRANSFORMEE DE FOURIER | 405 |
| 1.1 Définition | 405 |
| 1.2 Translation | 405 |
| 1.3 Dérivation | 406 |
| 1.4 Théorème de convolution | 406 |
| 1.5 Transformée de Fourier d'une distribution | 406 |
| 1.5.1 Transformée de Fourier de la distribution de Dirac | 407 |
| 1.5.2 Transformée de Fourier d'un signal sinusoïdal | 407 |
| 1.6 Développement en série de Fourier de la fonction peigne | 407 |
| 2 ECHANTILLONNAGE | 409 |
| 2.1 Formule de Poisson | 409 |
| 2.2 Spectre d'une fonction échantillonnée | 409 |
| 2.3 Théorème de l'échantillonnage, formule de Shannon | 410 |
| 3 PROCESSUS ALEATOIRES | 411 |
| 3.1 Statistiques des processus aléatoires | 411 |
| 3.2 Relation d'incertitude | 412 |
| 3.3 Processus stationnaires | 413 |
| 4 FILTRE | 413 |
| 4.1 Filtrage d'un signal aléatoire | 414 |
| 4.2 Filtre adapté | 414 |
| 4.3 Filtre dérivateur | 416 |
| E — IMPLANTATION RECURSIVE DES OPERATEURS DE DERICHE ET SHEN | 419 |
| 1 RAPPELS SUR LA TRANSFORMEE EN Z | 419 |
| 1.1 Définition | 419 |
| 1.2 Quelques propriétés de la transformée en Z | 419 |

| | |
|---|------------|
| 2 IMPLANTATION DES OPERATEURS DE DERICHE ET SHEN..... | 420 |
| 2.1 Implantation des opérateurs monodimensionnels de Deriche..... | 421 |
| 2.1.1 Dérivation..... | 421 |
| 2.1.2 Lissage..... | 422 |
| 2.2 Implantation de l'opérateur gradient bidimensionnel de Deriche..... | 423 |
| 2.3 Implantation des opérateurs monodimensionnels de Shen-Castan..... | 424 |
| 2.3.1 Opérateur de lissage..... | 424 |
| 2.3.2 Opérateur de dérivation..... | 425 |
| 2.4 Implantation des opérateurs bidimensionnels de Shen-Castan..... | 426 |
| 2.4.1 Lissage..... | 426 |
| 2.4.2 Opérateurs de dérivation première..... | 426 |
| | |
| F — DISCRETISATION DES CRITERES DE CANNY..... | 427 |
| | |
| 1 CRITERE DE BONNE DETECTION..... | 428 |
| 2 PROBABILITE DE LOCALISATION EXACTE DU MAXIMUM..... | 428 |
| 3 CRITERE DE FAIBLE MULTIPLICITE DES REPONSES (CD3)..... | 430 |
| 4 CRITERE DE BONNE LOCALISATION..... | 431 |