

Table des matières

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction | 1 |
| Corinne FOURNIER et Olivier HAEBERLÉ | |
| | |
| Chapitre 1. Microscopie quantitative de phase par analyse de front d'onde | 7 |
| Serge MONNERET, Julien SAVATIER et Pierre BON | |
| 1.1. Introduction | 7 |
| 1.2. Description des principes utilisés en imagerie de phase | 8 |
| 1.3. L'interférométrie à décalage quadrilatéral pour l'analyse de front d'onde à haute résolution spatiale | 11 |
| 1.3.1. Génération des répliques du champ incident | 12 |
| 1.3.2. Détermination du front d'onde incident | 13 |
| 1.3.3. Réalisation des analyseurs de front d'onde | 17 |
| 1.4. Utilisation d'un analyseur de front d'onde en microscopie | 17 |
| 1.4.1. Approximations nécessaires | 17 |
| 1.4.2. Montage expérimental | 18 |
| 1.5. Applications à l'imagerie biologique | 20 |
| 1.5.1. Imagerie à fort contraste sans marquage | 20 |
| 1.5.2. Mesure de la masse sèche de cellules biologiques vivantes | 21 |
| 1.5.3. Imagerie rapide de phénomènes biologiques | 24 |
| 1.5.4. Imagerie corrélative de phase quantitative et de fluorescence | 26 |
| 1.6. Imagerie de retardance optique | 28 |
| 1.7. Autres applications et nouveaux développements | 32 |
| 1.8. Bibliographie | 32 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Chapitre 2. Holographie | 35 |
| Michel GROSS et Nicolas VERRIER | |
| 2.1. Introduction | 35 |
| 2.2. Principe de l'holographie | 38 |
| 2.3. La sélection de l'ordre + 1 | 40 |
| 2.3.1. L'holographie hors axe | 40 |
| 2.3.2. L'holographie à décalage de phase | 44 |
| 2.4. Reconstruction holographique | 47 |
| 2.4.1. Reconstruction à une transformée de Fourier | 48 |
| 2.4.2. Reconstruction à deux transformées de Fourier (spectre angulaire) | 53 |
| 2.4.3. Reconstruction à deux transformées de Fourier avec <i>zero padding</i> | 55 |
| 2.4.4. Reconstruction à deux transformées de Fourier avec ajout d'une lentille numérique | 55 |
| 2.5. Configurations d'holographie et applications associées | 56 |
| 2.5.1. Holographie en ligne | 56 |
| 2.5.2. Holographie hors axe | 59 |
| 2.5.3. Microscopie holographique et imagerie quantitative de phase | 62 |
| 2.6. Conclusion | 65 |
| 2.7. Bibliographie | 67 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Chapitre 3. Les problèmes inverses pour la reconstruction d'image en holographie | 71 |
| Ferréol SOULEZ et Éric THIÉBAUT | |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Introduction | 71 |
| 3.1.1. Notations | 72 |
| 3.2. Modèle direct | 72 |
| 3.3. Application expérimentale | 74 |
| 3.4. Approche du maximum de vraisemblance | 76 |
| 3.4.1. Expression formelle | 76 |
| 3.4.2. Statistique du bruit et vraisemblance | 76 |
| 3.4.3. Rétropropagation | 77 |
| 3.4.4. Méthodes itératives pour l'estimation du maximum de vraisemblance | 78 |
| 3.4.5. Extrapolation du champ de vue | 79 |
| 3.5. La reconstruction de phase : un problème non linéaire | 81 |
| 3.6. Méthodes de projections alternées | 85 |
| 3.6.1. De la projection alternée à la minimisation d'un critère | 85 |
| 3.6.2. Élaborer la bonne mesure de vraisemblance | 86 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7. Améliorations par rapport au maximum de vraisemblance | 88 |
| 3.7.1. Maximum de vraisemblance pénalisé | 88 |
| 3.7.2. Interprétation bayésienne : le maximum <i>a posteriori</i> (MAP) | 88 |
| 3.8. Fonctions de régularisation et <i>a priori</i> | 89 |
| 3.8.1. Régularisation quadratique | 89 |
| 3.8.2. Lissage avec préservation de bords | 90 |
| 3.8.3. Parcimonie | 91 |
| 3.8.4. Parcimonie jointe | 92 |
| 3.8.5. Variation totale | 93 |
| 3.8.6. Régularisation <i>plug and play</i> | 94 |
| 3.9. Choix de l'algorithme d'optimisation pour la résolution du problème inverse | 94 |
| 3.10. Exemples pratiques | 96 |
| 3.10.1. Problème non contraint et différentiable | 96 |
| 3.10.2. Problèmes sous contraintes | 97 |
| 3.11. Bibliographie | 100 |

Chapitre 4. Reconstruction d'échantillons en microscopie holographique numérique en ligne 103

Fabien MOMEY, Thomas OLIVIER et Corinne FOURNIER

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Introduction | 103 |
| 4.2. De la microscopie classique à l'holographie numérique dans le domaine biomédical | 104 |
| 4.3. Montages de microscopie holographique en ligne | 106 |
| 4.3.1. Configurations d'imagerie, avec ou sans lentille | 106 |
| 4.3.2. Cohérence et mise en forme de l'illumination | 108 |
| 4.4. Méthodologie problèmes inverses types pour la reconstruction d'hogrammes en ligne | 111 |
| 4.4.1. Cas expérimental : hogrammes en ligne d'objets micrométriques déphasants | 113 |
| 4.4.2. Modèle de formation d'hogrammes en ligne | 115 |
| 4.4.3. Reconstructions numériques | 120 |
| 4.5. Apport étendu des approches problèmes inverses : super-résolution numérique et extension de champ | 132 |
| 4.5.1. Problème direct | 134 |
| 4.5.2. Critère à minimiser | 134 |
| 4.5.3. Algorithme de reconstructions alternées | 135 |
| 4.6. Pour aller plus loin | 137 |
| 4.6.1. Raffinement du modèle et auto-étalonnage | 137 |
| 4.6.2. Reconstruction de données multivariées | 138 |

| | |
|---------------------------------------------|-----|
| 4.6.3. Vers une reconstruction 3D | 138 |
| 4.7. Bibliographie | 139 |

Chapitre 5. Microscopie tomographique diffractive en transmission 143

Nicolas VERRIER, Matthieu DEBAILLEUL, Bertrand SIMON
et Olivier HAEBERLÉ

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Introduction | 143 |
| 5.2. Microscopie holographique : intérêt et limitations | 144 |
| 5.3. Lien entre champ diffracté et distribution d'indice | 145 |
| 5.3.1. Principe | 145 |
| 5.3.2. Équation de Helmholtz en milieu faiblement inhomogène | 146 |
| 5.3.3. Approximation de Born | 148 |
| 5.3.4. Support spectral dans l'espace de Fourier 3D | 151 |
| 5.3.5. Algorithme en holographie | 152 |
| 5.4. De l'holographie à la tomographie | 153 |
| 5.4.1. Rotation de l'illumination | 153 |
| 5.4.2. Rotation de l'échantillon | 156 |
| 5.4.3. Rotation de l'échantillon et de l'illumination | 158 |
| 5.5. Implémentations pratiques | 159 |
| 5.5.1. Techniques de rotation de l'échantillon | 159 |
| 5.5.2. Techniques de balayage de l'illumination | 161 |
| 5.6. Reconstruction sous hypothèse de Born | 164 |
| 5.6.1. Exemples de systèmes commerciaux | 165 |
| 5.7. Conclusion | 166 |
| 5.8. Bibliographie | 169 |

Chapitre 6. Microscopie interférométrique 177

Rémy CLAVEAU, Sébastien MARBACH, Stéphane PERRIN, Amir NAHAS,
Manuel FLURY et Paul MONTGOMERY

| | |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 6.1. Introduction | 177 |
| 6.2. Principe et théorie | 179 |
| 6.2.1. Interférences | 179 |
| 6.2.2. Cohérence de la lumière | 180 |
| 6.3. Algorithmes | 182 |
| 6.3.1. Microscopie à décalage de phase | 182 |
| 6.3.2. Interférométrie à balayage de cohérence | 183 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.4. Instrumentation | 185 |
| 6.5. Performances et limites physiques | 187 |
| 6.5.1. Résolution latérale | 187 |
| 6.5.2. Résolution axiale | 188 |
| 6.5.3. Échantillonnage spatial | 189 |
| 6.5.4. Sources d'erreurs de mesure | 189 |
| 6.6. Applications | 190 |
| 6.6.1. Mesure de la rugosité | 190 |
| 6.6.2. Mesure de surfaces statiques | 191 |
| 6.6.3. Mesure de surfaces en mouvement | 192 |
| 6.7. Récentes avancées | 193 |
| 6.7.1. Tomographie par cohérence optique plein champ | 193 |
| 6.7.2. Spectroscopie locale | 195 |
| 6.7.3. Microscopie interférométrique assistée par microsphères | 198 |
| 6.8. Conclusion | 199 |
| 6.9. Remerciements | 200 |
| 6.10. Bibliographie | 200 |

Chapitre 7. Imagerie endoscopique multimodale et multispectrale à champ de vue étendu 207

Christian DAUL et Walter BLONDEL

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Introduction à l'endoscopie conventionnelle | 207 |
| 7.1.1. Principe et applications médicales de l'endoscopie | 207 |
| 7.1.2. Intérêts et limites de l'endoscopie conventionnelle | 208 |
| 7.1.3. Objectifs et contenu du chapitre | 210 |
| 7.2. Fonctionnement des endoscopes | 211 |
| 7.2.1. Éléments constitutifs d'un système endoscopique | 211 |
| 7.2.2. Modèle sténopé d'une caméra | 213 |
| 7.2.3. Modélisation et correction des distorsions | 215 |
| 7.2.4. Modélisation et correction du vignettage | 217 |
| 7.3. Cartographie 3D de scènes endoscopiques | 219 |
| 7.3.1. Recalage des données de deux points de vue | 219 |
| 7.3.2. Approches de cartographie 3D | 227 |
| 7.4. Systèmes d'imagerie endoscopique multimodaux et multispectraux | 234 |
| 7.4.1. Introduction | 234 |
| 7.4.2. Systèmes d'imagerie avec marquage chimique | 234 |
| 7.4.3. Systèmes d'imagerie sans marqueur exogène | 238 |
| 7.5. Conclusion | 242 |
| 7.6. Bibliographie | 242 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chapitre 8. Une introduction à l'imagerie computationnelle monodétecteur | 247 |
| Nicolas DUCROS | |
| 8.1. Introduction | 247 |
| 8.1.1. Formulation mathématique | 249 |
| 8.1.2. Mise en œuvre expérimentale | 249 |
| 8.2. Optique par transformée de Hadamard : les origines (1970-1980) | 251 |
| 8.3. <i>Compressed sensing</i> : le renouveau (2006-2016) | 254 |
| 8.3.1. Acquisition sous-échantillonnée | 254 |
| 8.3.2. Principe général du <i>compressed sensing</i> | 255 |
| 8.3.3. Choix des motifs d'acquisition | 257 |
| 8.4. Reconstruction par apprentissage profond | 258 |
| 8.4.1. Principe général | 258 |
| 8.4.2. Architecture du modèle | 260 |
| 8.4.3. Entraînement | 262 |
| 8.4.4. Lien simple avec les méthodes classiques | 264 |
| 8.4.5. Meilleur estimateur linéaire : complétion bayésienne | 265 |
| 8.4.6. Prise en compte du bruit | 268 |
| 8.5. Conclusion | 271 |
| 8.6. Remerciements | 272 |
| 8.7. Bibliographie | 272 |
| | |
| Glossaire | 275 |
| | |
| Liste des auteurs | 285 |
| | |
| Index | 287 |