

collection automatique

Les micromachines

Patrice Minotti
Antoine Ferreira

HERMES

Table des matières

Préface	13
Chapitre 1. La naissance des micromachines	17
1.1. Machines et micromachines : similitudes et différences.....	17
1.2. Origines des micromachines.....	20
1.2.1. L'invention du transistor.....	20
1.2.2. Les visions de Feynman.....	20
1.3. Enjeux scientifiques des micromachines.....	22
1.3.1. Situation des micromachines dans l'univers.....	22
1.3.2. Limites des procédés de fabrication conventionnels.....	24
1.3.3. Tolérances de fabrication à l'échelle atomique.....	25
1.3.4. Tribologie des micromécanismes.....	26
1.3.5. Lois d'échelle intrinsèques à la miniaturisation des machines.....	28
1.3.6. L'échelle ultime.....	29
1.4. Orientations actuelles des micromachines et situation de l'ouvrage.....	29
Chapitre 2. Aperçu de la motorisation des micromachines	33
2.1. Introduction.....	33
2.2. Conséquences de la réduction d'échelle des machines.....	34
2.3. Approches potentielles de la motorisation des micromachines.....	34
2.3.1. Micromoteurs électromagnétiques.....	35
2.3.2. Micromoteurs électrostatiques.....	36
2.3.3. Micromoteurs thermiques.....	37
2.3.4. Micro-actionneurs à base d'alliages à mémoire de forme.....	37
2.3.5. Micromoteurs à base de matériaux actifs.....	38
2.4. Promesses et limites des premières réalisations à base de silicium.....	38
2.5. Orientations actuelles de la recherche.....	40
2.5.1. Position du problème.....	40
2.5.2. Coopération et coordination d'une colonie de micro-actionneurs...	41

2.5.3. Architecture matérielle des micromachines à actionneurs distribués	42
2.5.4. Deux réalisations exemplaires.....	44
2.6. Objectifs de l'ouvrage.....	49
Chapitre 3. Micromoteurs à interaction de champs magnétiques	53
3.1. Introduction	53
3.2. Analyse de la miniaturisation des moteurs électromagnétiques.....	55
3.2.1. Définition du facteur d'échelle.....	55
3.2.2. Caractéristiques générales des convertisseurs à interaction de champs magnétiques soumis à une réduction d'échelle	56
3.3. Limites physiques à la miniaturisation des moteurs à interaction de champs magnétiques liées aux effets d'échelle.....	63
3.3.1. Définition	63
3.3.2. Micromoteurs réluctants.....	63
3.3.3. Micromoteurs polarisés.....	69
3.4. Performances limites des réalisations actuelles	74
3.4.1. Réalisations par usinage mécanique de précision	74
3.4.2. Premières réalisations centrées sur le micro-usinage de surface du silicium	79
3.5. Les applications en micromachines	89
3.6. Conclusion	91
Chapitre 4. Micromoteurs à interaction de champs électriques	95
4.1. Situation du sujet	95
4.2. Caractéristiques générales des convertisseurs à interaction de champs électriques sous l'effet d'une réduction d'échelle	98
4.2.1. Forces issues d'une interaction de champs électriques	98
4.2.2. Evolution de la tension disruptive entre deux armatures portées à des potentiels différents	102
4.2.3. Evolution des pertes électriques.....	103
4.2.4. Discussion	104
4.3. Limites physiques à la miniaturisation des moteurs électrostatiques	106
4.3.1. Micromoteurs à réluctance diélectrique variable	106
4.3.2. Micromoteurs à induction diélectrique.....	114
4.4. Performances limites des réalisations actuelles	120
4.4.1. Micromoteurs électrostatiques à champs axial (<i>Top-Drive</i>) et radial (<i>Side-Drive</i>).....	120
4.4.2. Micromoteurs électrostatiques à structure interdigitée (<i>Comb-Drive</i>)	129
4.4.3. Micromoteurs électrostatiques à capacités parallèles.....	134
4.5. Les applications en micromachines	138
4.5.1. Biotechnologies.....	138

4.5.2. Microscopie à sonde locale	140
4.5.3. Imagerie optique	141
4.6. Conclusion	144
Chapitre 5. Micromoteurs oscillants à mouvement harmonique	145
5.1. Situation du sujet	145
5.2. Miniaturisation des moteurs électrostatiques à mouvement harmonique	149
5.2.1. Concept général.....	149
5.2.2. Couple moteur théorique.....	150
5.3. Performances limites des réalisations actuelles	151
5.3.1. Micromoteurs électrostatiques réalisés à partir de procédés d'élaboration bidimensionnels	151
5.3.2. Micromoteurs harmoniques réalisés par hybridation de composants.....	157
5.4. Les applications en micromachines	159
Chapitre 6. Micromoteurs à interactions de contact	161
6.1. Introduction	161
6.2. Propriétés caractéristiques des moteurs à interactions de contact.....	162
6.2.1. Caractéristiques en charge.....	162
6.2.2. Précision de positionnement	164
6.2.3. Micromoteurs multidegrés de liberté à interactions de contact.....	165
6.3. Principes généraux des moteurs à interactions de contact	166
6.4. Architecture mécanique des moteurs à interactions de contact	170
6.4.1. Conversion d'énergie électromécanique	170
6.4.2. Conversion d'énergie mécanique	170
6.5. Enjeux de la modélisation des moteurs à interactions de contact	178
Chapitre 7. Moteurs à onde progressive.....	181
7.1. Introduction	181
7.2. Principes de fonctionnement.....	182
7.2.1. Aspect mécanique	182
7.2.2. Aspect électromécanique	183
7.3. Notations.....	185
7.4. Mécanisme d'entraînement du rotor	186
7.4.1. Modélisation cinématique et dynamique du stator	186
7.4.2. Tribologie du contact à l'interface stator/rotor.....	189
7.4.3. Vitesse linéaire de corps rigide communiquée au rotor	191
7.5. Modélisation bidimensionnelle de la conversion d'énergie mécanique à l'interface stator/rotor	193
7.5.1. Découplage des modèles normal et tangentiel de l'interface	193
7.5.2. Distributions théoriques des réactions de contact normales.....	193

7.5.3. Forces tangentielles d'entraînement communiquées au rotor	194
7.5.4. Vitesse angulaire maximale de l'arbre moteur.....	195
7.5.5. Caractéristiques couple/vitesse théoriques.....	195
7.5.6. Couple statique de maintien à l'arrêt.....	197
7.5.7. Pertes mécaniques dans la direction circonférentielle de l'interface.....	198
7.5.8. Chargement axial théorique optimal	199
7.5.9. Le logiciel CASIMMIRE	199
7.6. Modélisation analytique bidimensionnelle du contact stator/rotor	201
7.6.1. Position du problème.....	201
7.6.2. Hypothèse de conservation de la vitesse vibratoire.....	202
7.6.3. Hypothèse de rigidité en flexion du substrat (rotor massif semi-infini).....	203
7.6.4. Modélisation analytique des effets de flexion du substrat (rotor)	211
7.6.5. Le logiciel CUBIC	213
7.7. Modélisation mécanique tridimensionnelle de l'interface stator/rotor	218
7.7.1. Limites des modèles bidimensionnels.....	218
7.7.2. Conséquences de la miniaturisation des moteurs à onde progressive	218
7.7.3. Optimisation mécanique tridimensionnelle de l'architecture du rotor.....	221
7.8. Miniaturisation des moteurs à onde progressive.....	225
7.9. Limites physiques et technologiques à la miniaturisation des moteurs à onde progressive	229
7.10. Conclusion	231
 Chapitre 8. Micromoteurs électrostatiques annulaires à interactions de contact	
8.1. Introduction	233
8.2. L'entraînement direct à l'échelle du micron	234
8.2.1. Contraintes d'ordre technologique	234
8.2.2. Contraintes d'ordre mécanique	235
8.3. Conception des moteurs électrostatiques à entraînement direct.....	236
8.3.1. Démultiplication de vitesse intégrée	237
8.3.2. Minimisation du jeu mécanique à l'interface stator/rotor	238
8.3.3. Superposition d'une multitude de forces motrices élémentaires	238
8.3.4. Limites du principe de superposition des forces utiles.....	241
8.4. Micro-actionneurs électrostatiques élémentaires à interactions de contact.....	242
8.4.1. Scratch Drive Actuateurs (SDA) et moteurs à onde progressive : similitudes et différences.....	240
8.4.2. Principes de fonctionnement	246

8.4.3. Précision de positionnement	247
8.4.4. Caractéristiques en charge.....	247
8.5. Micromoteurs électrostatiques annulaires à interactions de contact	250
8.5.1. Architecture et principes de fonctionnement.....	251
8.5.2. Mesure de couple intégrée	253
8.5.3. Principes du capteur de couple auto-adaptatif intégré.....	256
8.5.4. Etude expérimentale des caractéristiques en charge	259
8.6. Conclusion	264
Chapitre 9. Micromoteurs électrostatiques tubulaires à interactions de contact	267
9.1. Introduction	267
9.2. Limites de l'approche de type « downsizing »	268
9.3. L'approche « bottom-up »	269
9.4. Fabrication collective et caractérisation de microstructures intégrant une multitude de micro-actionneurs	270
9.4.1. Usinage chimique de feuilles minces actives en polysilicium	270
9.4.2. Evaluation des caractéristiques <i>in situ</i> des feuilles actives en polysilicium.....	272
9.4.3. Limites de transmissibilité des forces utiles au monde extérieur	274
9.5. Moteurs électrostatiques tubulaires de dimension millimétrique.....	277
9.5.1. Conception et principes de fabrication.....	277
9.5.2. Mise en forme automatique de stators flexibles en polysilicium.....	278
9.5.3. Insertion de stators flexibles dans le jeu de fonctionnement d'une liaison mécanique macroscopique.....	282
9.5.4. Blocage du stator flexible par rapport au bâti	284
9.5.5. Principe de rattrapage de jeu automatique à l'interface rotor/bâti.....	284
9.5.6. Caractéristiques attendues	286
9.6. Perspectives d'application	288
9.6.1. Liaisons mécaniques actives à l'échelle millimétrique	288
9.6.2. Microcathéters actifs tridimensionnels.....	289
9.7. Conclusion	292
Chapitre 10. Vers des micromachines tridimensionnelles	295
10.1. Conséquences pratiques de la transition d'échelle macro/micro	295
10.2. Limites de l'approche « tout silicium »	296
10.3. La nécessaire évolution vers les procédés de micro-usinage tridimensionnels.....	297
10.3.1. Le procédé LIGA	297

12 Les micromachines

10.3.2. Procédés de microfabrication conventionnels à base de micro-outils	304
10.4. Les premières micromachines tridimensionnelles à base de silicium	310
10.5. Structures tridimensionnelles élaborées à partir du déploiement de motifs plans.....	311
10.5.1. Formage automatique de microstructures tridimensionnelles élastiques.....	311
10.5.2. Auto-assemblage de microstructures tridimensionnelles articulées	313
Conclusion	323
Bibliographie	327