

平成10年度

マイクロマシンの基礎技術の研究

〔 本 編 〕

平成11年 3 月

財団法人 マイクロマシンセンター

平成10年度 マイクロマシンの基礎技術の研究

〔本編〕

発行 財団法人マイクロマシンセンター

東京都千代田区神田司町2-2

新倉ビル5階

電話：03（5294）7131

本 編 目 次

[本 編]

調査研究の目的	G 1
調査研究の実施方法	G 2
第 1 章 高精度アSEMBル技術の調査研究	3
1. 1 緒 言	3
1. 2 電顕環境下における自動アSEMBリ作業	5
1. 2. 1 高精度アSEMBリに関連する従来の研究	5
1. 2. 2 微小物体の一般的な力学的特徴	9
1. 2. 3 電顕環境下における微小物体の挙動	17
1. 2. 4 電顕環境下における微細作業自動化の基本戦略	21
1. 2. 5 実験システム構成	24
1. 3 電顕環境下における対象物位置自動計測手法	30
1. 3. 1 電顕環境下における対象物位置自動計測手法の概要	30
1. 3. 2 走査電顕画像処理による画面内位置計測	35
1. 3. 3 工具先端接触検知による深さ方向位置計測	48
1. 4 電顕環境下における微小物体操作手法	55
1. 4. 1 微小物体操作の力学	55
1. 4. 2 高信頼度・高精度物体操作手法の提案	63
1. 4. 3 高信頼度・高精度物体操作手法の有効性検証実験	69
1. 5 結 言	75
1. 5. 1 本調査研究のまとめ	75
1. 5. 2 今後の展望	77
第 2 章 高精度マイクロ加工技術と微小機構の運動計測法の調査研究	81
2. 1 緒 言	81
2. 2 微細加工における相対精度とその向上法	83
2. 2. 1 マイクロ加工における問題点	83
2. 2. 2 各種加工原理	88
2. 2. 3 被加工材料の影響	88
2. 2. 4 各種加工法の特徴	94

2. 2. 5	加工特性の総括	132
2. 3	微小材料の機械的特性評価	136
2. 3. 1	主な計測手法と測定パラメータ	136
2. 3. 2	計測手法例の紹介	136
2. 3. 3	まとめ	144
2. 4	微小物体の3次元運動計測法	150
2. 4. 1	画像処理法の原理	150
2. 4. 2	問題点と解決方法	156
2. 4. 3	効果の評価	159
2. 4. 4	まとめ	165
第3章	多数のマイクロ機能要素で構成されるシステムに関する調査研究	171
3. 1	緒言	171
3. 1. 1	マイクロ機能要素を多数集めて作るマイクロマシン	171
3. 1. 2	自律分散マイクロマシン	172
3. 1. 3	多数のマイクロ要素からなるシステムやデバイスの例	175
3. 2	分散搬送システム	180
3. 2. 1	物体に作用するマイクロアクチュエータアレイ	180
3. 2. 2	マイクロアクチュエータアレイによる搬送システム	181
3. 2. 2. 1	搬送メカニズム	181
3. 2. 2. 2	マイクロ搬送システムの構成例	183
3. 2. 3	二次元アレイモジュールの分散制御	185
3. 2. 3. 1	自律分散システム	187
3. 2. 3. 2	その他の概念	188
3. 2. 4	セル・オートマトンを利用した搬送制御	189
3. 2. 4. 1	セル・オートマトンの適用	189
3. 2. 4. 2	発展ルールの進化的検索	190
3. 2. 5	展望	192
3. 3	群マイクロロボット	194
3. 3. 1	群ロボットへの期待	194
3. 3. 2	群ロボットの理論的背景	195
3. 3. 2. 1	パターン形成の理論 自己組織化の理論	195

3. 3. 2. 2	ボトムアップ的方法論	196
3. 3. 2. 3	最近の展開 創発システム	197
3. 3. 3	様々な群知能発現モデルとそのシミュレーション	198
3. 3. 3. 1	シナジェティックスによる群制御	198
3. 3. 3. 2	能動機能素子集団としての解析	199
3. 3. 3. 3	群機能の発現	200
3. 3. 3. 4	対流パターンを生成する群ロボット	201
3. 3. 3. 5	免疫系をモデルにした群ロボット制御	203
3. 3. 4	ロボット開発	205
3. 3. 4. 1	CEBOT	205
3. 3. 4. 2	MARS	206
3. 3. 4. 3	自己組立てするユニット機械	207
3. 3. 5	実際の群ロボットによる実験例 群機能に対する構成要素数の 効果	208
3. 3. 6	展 望	211
3. 4	機能紐状システム	213
3. 4. 1	はじめに	213
3. 4. 2	医療用多関節マイクロカテーテル	213
3. 5	流体、音響制御用分布システム	218
3. 5. 1	流体とマイクロマシン	218
3. 5. 2	分布マイクロマシンによる流体抵抗の低減	219
3. 5. 3	飛行機の姿勢制御	222
3. 5. 4	円形ジェットのマイクロアクチュエータによる制御	224
3. 5. 5	分布アクチュエータによる音響制御	227
3. 6	アレイ化マイクロ光学システム	231
3. 6. 1	はじめに –マイクロマシンの光学応用デバイス–	231
3. 6. 2	マイクロミラーアレイとレンズアレイ	232
3. 6. 3	マイクロレンズアレイ	239
3. 6. 4	アダプティブオプティクス・空間光モジュレータ	240
3. 6. 5	光インタコネクション	244
3. 6. 6	光検出器アレイ	248
3. 6. 7	本節のまとめ	249

3. 7	アレイ化アクチュエータ	253
3. 7. 1	人工筋肉アクチュエータ	255
3. 7. 2	分散型静電マイクロアクチュエータ	264
3. 7. 3	スクラッチ駆動アクチュエータアレイ	269
3. 8	結 言	279
第4章 生物の運動メカニズムと制御の調査研究		283
4. 1	緒 言	283
4. 2	生物の協調運動のメカニズムと制御	284
4. 2. 1	はじめに	284
4. 2. 2	ミミズの蠕動運動	285
4. 2. 3	チョウやガの幼虫の腹這い	287
4. 2. 4	ムカデの這行	289
4. 2. 5	ヒトデの起き直り行動と相互制御神経回路モデル	291
4. 2. 6	ヒルの遊泳行動と巡回性抑制神経回路モデル	292
4. 3	多自由度機構を持つ機械	296
4. 3. 1	はじめに	296
4. 3. 2	近年の研究	296
4. 3. 3	多自由度機構のアクチュエーション	301
4. 3. 4	多自由度機構の制御	302
4. 3. 5	多自由度機構の利点	307
4. 3. 6	多自由度機構の欠点	308
4. 3. 7	まとめ	308
4. 4	マイクロテレメトリシステム	310
4. 4. 1	生体信号の計測	310
4. 4. 2	マイクロテレメトリシステムの構成	313
4. 4. 3	小型FM送信機	315
4. 4. 4	マイクロテレメトリシステムの評価と今後の展開	319
4. 5	マイクロテレメトリシステムによる昆虫の飛行の解析とマイクロフライト のメカニズムと制御への応用	324
4. 5. 1	はじめに	324
4. 5. 2	昆虫の飛行について	325

4. 5. 3	マイクロテレメトリによる筋電位の測定	332
4. 5. 4	マイクロフライトへの応用	345
4. 6	結 言	350
第5章	微小管路における流れと流体抵抗低減化技術の調査研究	355
5. 1	緒 言	355
5. 2	マイクロマシンにおける微小管路の応用	356
5. 2. 1	流体移動デバイス	356
5. 2. 2	計測デバイス	360
5. 2. 3	作用デバイス	363
5. 2. 4	その他のデバイス	370
5. 2. 5	マイクロマシンにおける微小管路の応用のまとめ	371
5. 3	インクジェットプリンタにおける微小管路の流動形態と損失	374
5. 3. 1	はじめに	374
5. 3. 2	インクジェット方式とノズル形状	375
5. 3. 2. 1	連続噴射型インクジェット技術とノズル	375
5. 3. 2. 2	DOD型インクジェット技術とノズル	380
5. 3. 3	ノズル内流れの流動形態と圧力損失	384
5. 3. 3. 1	Hertz方式連続噴射型インクジェットプリンタ用ノズル	384
5. 3. 3. 2	Sweet方式連続噴射型インクジェットプリンタ用ノズル	388
5. 3. 4	むすび	389
5. 4	微小管路内壁の超はっ水コーティング法	392
5. 4. 1	超はっ水コーティング方法	392
5. 4. 2	微小管路内壁の超はっ水コーティング方法	397
5. 4. 3	超はっ水コーティングの非接触シールとしての応用	398
5. 5	超はっ水材料の物理的性質とその応用	404
5. 5. 1	はじめに	404
5. 5. 2	超はっ水材料の開発	404
5. 5. 3	超はっ水材料の着雪防止アンテナへの応用	408
5. 5. 4	まとめ今後の動向	414
5. 6	超はっ水性円管の抵抗減少効果	416
5. 6. 1	円管内壁で滑りを伴うニュートン流体の管摩擦係数の解析	416

5. 6. 2	超はっ水性円管の圧力損失と速度分布	417
5. 6. 3	結 言	422
5. 7	微小管路における高分子溶液の抵抗減少効果	424
5. 7. 1	高分子溶液の層流微小管路流れ	424
5. 7. 2	乱流域における高分子溶液の抵抗低減効果	427
5. 8	結 言	430
第 6 章	高次複合構造実現のための加工・集積・結合・組立技術に関する調査研究	433
6. 1	緒言	433
6. 2	大変形弾性ヒンジを用いたマイクロメカニズムに関する調査研究	435
6. 2. 1	はじめに	435
6. 2. 2	運動変換機構の提案	435
6. 2. 2. 1	数の総合に基づく機構形式の決定	435
6. 2. 2. 2	運動変換機構の理論解析式	436
6. 2. 3	運動変換機構の理論解析および実験	439
6. 2. 3. 1	理論解析	439
6. 2. 3. 2	実験および検討	440
6. 2. 4	運動変換機構の入出力変位・力特性	441
6. 2. 5	運動変換機構の半導体製作プロセスとマイクロモデルの試作	444
6. 2. 6	最近の国際会議における本分野の動向調査	445
6. 2. 7	おわりに	453
6. 3	大変形弾性ヒンジを用いたマイクロアクチュエータに関する調査研究	456
6. 3. 1	はじめに	456
6. 3. 2	駆動原理	457
6. 3. 3	形状・寸法	459
6. 3. 4	高分子材料を用いた楕円形静電リニアアクチュエータの試作	460
6. 3. 5	実験および結果	462
6. 3. 6	最近の国際会議における本分野の動向調査	464
6. 3. 7	おわりに	466
6. 4	シリコンの結晶異方性エッチングによる 3次元構造形成に関する 調査研究	469
6. 4. 1	はじめに	469

6. 4. 2	シリコンの結晶異方性エッチング特性の測定・評価	470
6. 4. 3	結晶異方性エッチングプロセスシミュレーションシステムの開発	472
6. 4. 4	エッチング面粗さの結晶方位依存性	482
6. 4. 5	最近の国際会議における本分野の動向調査	488
6. 4. 6	おわりに	497
6. 5	平面からの折り曲げによる3次元マイクロ機構の製作に関する調査研究	501
6. 5. 1	はじめに	501
6. 5. 2	折り紙構造を用いた3次元構造	501
6. 5. 3	ローレンツ力を用いた平面の立体組み立て	505
6. 5. 4	自己組み立てによる平面の折り曲げ	508
6. 5. 5	残留応力の差による薄膜の反りを利用した3次元構造	511
6. 5. 6	形状記憶合金薄膜を用いた3次元構造の組み立て	513
6. 5. 7	おわりに	515
6. 6	結言	518

第7章 化学・生化学分析／合成システムおよび物理化学反応システムの

	マイクロ化に関する調査研究	521
7. 1	緒言	521
7. 2	マイクロフルイディクスとその応用デバイス	523
7. 2. 1	はじめに	523
7. 2. 2	マイクロフルイディクスの研究	523
7. 2. 2. 1	マイクロスケールの流体シミュレーション技術	523
7. 2. 2. 2	低レイノルズ数領域の流れ	525
7. 2. 2. 3	微小流路内の血液の流れ	530
7. 2. 3	マイクロ流体制御素子	532
7. 2. 3. 1	マイクロバルブ	532
7. 2. 3. 2	マイクロポンプ	535
7. 2. 4	非機械式流体制御方式	538
7. 2. 4. 1	流路抵抗温度変化	538
7. 2. 4. 2	表面張力	539
7. 3	マイクロシステムの作製技術	544
7. 3. 1	はじめに	544

7. 3. 2	マイクロチャネル作製法	545
7. 3. 2. 1	マイクロチャネルの分類	545
7. 3. 2. 2	無機材料マイクロチャネル	545
7. 3. 2. 3	有機材料マイクロチャネル	546
7. 3. 2. 4	メタル材料マイクロチャネル	551
7. 3. 3	マイクロチャネル以外のコンポーネントと製作プロセス	551
7. 3. 3. 1	概要	551
7. 3. 3. 2	材料・プロセス	551
7. 3. 3. 3	コネクタ	553
7. 3. 3. 4	ミキサ	554
7. 3. 3. 5	フィルタ	554
7. 3. 3. 6	検出部	557
7. 3. 3. 7	DNAチップ製作法	558
7. 3. 4	おわりに	559
7. 4	バイオ研究への応用	567
7. 4. 1	DNA解析の理論とマイクロチップ・ナノチップ技術開発の戦略	568
7. 4. 2	キャピラリー電気泳動およびキャピラリーアレイ電気泳動の マイクロチップ化	570
7. 4. 3	PCR等の反応と分離の集積化	576
7. 4. 4	マイクロチップ技術と質量分析計との結合	580
7. 4. 5	DNAチップ	581
7. 4. 6	新たな応用分野	581
7. 4. 7	実用化にむけた動き	582
7. 5	合成反応への応用	595
7. 5. 1	遺伝子増幅 (PCR) 反応への応用	595
7. 5. 2	コンビナトリアルケミストリへの応用	604
7. 5. 3	その他の合成反応への応用	614
7. 6	物理化学反応を目的としたマイクロリアクタ	621
7. 7	結 言	623
第 8 章	生物における刺激応答機能とマイクロマシンへの適用に関する調査研究	627
8. 1	緒 言	627

8. 2	原形質流動	630
8. 2. 1	原形質流動とは	630
8. 2. 2	シャジクモ類における原形質流動の機構	632
8. 2. 3	原形質流動の分子機構	633
8. 2. 4	シャジクモの脱膜モデル	635
8. 2. 5	原形質流動の活動電位による制御	639
8. 2. 6	シャジクモ類細胞を用いたミオシン運動の解析	647
8. 2. 7	花粉管におけるアクトミオシン系	651
8. 2. 8	植物のアクチン・ミオシン系	653
8. 2. 9	参考：骨格筋における収縮機構	654
8. 3	傾性反応	657
8. 3. 1	傾性反応 (Nastic response) とは	657
8. 3. 2	傾性反応を引き起こす環境刺激	657
8. 3. 3	傾性反応に関連した植物細胞の構造と生理機能	658
8. 3. 4	環境刺激受容機構	660
8. 3. 5	植物の運動機構	661
8. 3. 6	いろいろな傾性反応	668
8. 3. 7	その他の膨圧運動	682
8. 3. 8	おわりに	682
8. 4	気孔開閉	685
8. 4. 1	マイクロマシンとしての気孔開閉	685
8. 4. 2	気孔の役割の諸相	685
8. 4. 3	気孔開閉のメカニクス	687
8. 4. 4	孔辺細胞におけるイオン輸送	689
8. 4. 5	気孔開口におけるシロ糖の役割	693
8. 4. 6	気孔開閉における細胞小器官の働き	695
8. 4. 7	気孔閉鎖	699
8. 4. 8	植物ホルモンアブシジン酸 (ABA) による気孔閉鎖	702
8. 5	屈性	709
8. 5. 1	屈性とは	709
8. 5. 2	屈性の種類と特性	709
8. 5. 3	屈性機構の解析	713

8. 5. 4	環境シグナルの受容	717
8. 5. 5	環境シグナルの変換・伝達	723
8. 5. 6	環境シグナルに対する応答	728
8. 5. 7	おわりに	732
8. 6	結 言	738
第9章	マイクロ化効果利用機能システムに関する調査研究	743
9. 1	緒 言	743
9. 2	アトミックマニピュレーション	745
9. 2. 1	緒 言	745
9. 2. 2	STM装置の概略	746
9. 2. 3	電界イオン顕微鏡の原理	747
9. 2. 3. 1	電界イオン化 (Field Ionization)	748
9. 2. 3. 2	電界蒸発 (Field Evaporation)	749
9. 2. 3. 3	結像機構	751
9. 2. 3. 4	像解釈	753
9. 2. 4	アトミックマニピュレーションの操作例	753
9. 3	表面電子物性の計算機シミュレーション	780
9. 3. 1	第一原理による電子状態の計算	780
9. 3. 1. 1	基本的な近似法	780
9. 3. 1. 1 (a)	概説	780
9. 3. 1. 1 (b)	多粒子系の波動関数	780
9. 3. 1. 1 (c)	断熱近似と平均場近似	786
9. 3. 1. 2	バンド理論の骨組み	787
9. 3. 1. 2 (a)	逆格子	787
9. 3. 1. 2 (b)	Blochの定理	788
9. 3. 1. 2 (c)	Brillouin域	790
9. 3. 2	計算理論と計算方法	791
9. 3. 2. 1	密度汎関数法 (Density Functional Theory ; DFT)	791
9. 3. 2. 1 (a)	基礎理論	791
9. 3. 2. 1 (b)	Kohn-Shamの理論	794

9. 3. 2. 1 (c)	局所密度近似 (Local Density Approximation ; LDA)	797
9. 3. 2. 2	擬ポテンシャル法	798
9. 3. 2. 2 (a)	基礎理論	798
9. 3. 2. 2 (b)	ウルトラソフト擬ポテンシャル	800
9. 3. 2. 3	BB-VBプログラム	801
9. 3. 2. 3 (a)	プログラムの構成	801
9. 3. 2. 3 (b)	計算方法	803
9. 3. 3	AIバルク及び(001)清浄表面の計算	807
9. 3. 3. 1	AIの擬ポテンシャルの構築とバルクの計算による評価	807
9. 3. 3. 2	AI(001)清浄表面の電子状態	815
9. 3. 3. 2 (a)	スーパーセルと収束の確認方法	816
9. 3. 3. 2 (b)	緩和構造と表面電子状態	819
9. 3. 3. 2 (c)	表面状態	824
9. 3. 3. 2 (d)	清浄表面の近接場	826
9. 3. 4	吸着・表面欠陥と表面電子状態	828
9. 3. 4. 1	AI(001)表面への酸素吸着と表面電子状態	828
9. 3. 4. 1 (a)	酸素の擬ポテンシャルとスーパーセル	828
9. 3. 4. 1 (b)	酸素吸着によるAI(001)表面電子状態の変化	832
9. 3. 4. 1 (c)	酸素吸着表面の近接場	835
9. 3. 4. 2	点欠点と表面ステップ	838
9. 4	結 言	842