

# 論文の内容の要旨

論文題目 自律分散型 MEMS コンセプトに基づく  
二次元マイクロ搬送システム

氏 名 安宅 学

自律分散型 MEMS は、マイクロアクチュエータをマイクロセンサやマイクロプロセッシングユニット(MPU)とモノリシックに集積化してマイクロモジュール(セル)を形成し、それを大規模なアレイ状に構成したものである。モジュールの自律性、近傍モジュールとの局所的な相互作用から、「大局的な機能」や「環境適応性」のようなスマートな機能を発現することが期待されているものの、未だ実現されたことのないコンセプトである。

本研究の目的は、このコンセプトをアレイ MEMS の設計原理として採用し、マイクロ搬送システムを対象に、このコンセプトの実現イメージと等価的な簡易システム(エミュレーションシステム)を実際に作製する方法によって、大局的な機能の形成(搬送機能の実現)やスマートな機能(環境適応性、耐故障性など)の発現を工学的に実証し、翻って、自律分散型 MEMS コンセプトの有効性を検証することである。

本論は、以下の8章から成る。

序章では、本論の背景、目的、方法、意義を明らかにし、上記した目的を達成するために必要な実験項目(中間目標)として、次の3点を挙げた：

- ① アレイ MEMS (多数のマイクロアクチュエータの協調動作) による搬送動作の実現
- ② 搬送機能性(直進搬送、斜め搬送、回転、アライメントなど)の実証
- ③ 自律分散型制御の適用可能性の実証

第2章では、本論の採用したマイクロ搬送システムの基本原理、その構成要素となるマイクロアクチュエータの動作原理について記述し、これをアレイ化した一次元マイクロ搬送システムの作製結果（搬送特性）を明らかにした。マイクロ搬送システムは、自律分散型システムが構想された契機と同じく、生体内の機能（繊毛運動）をモデル化した搬送原理をもち、熱駆動型バイモルフ・カンチレバー・アクチュエータのアレイ化によって実現した。このアクチュエータは、二種類の熱膨張率の異なるポリイミドを層状に形成し、その間に金属薄膜からなるヒーター層を挟んだ構造をもつ。ヒーター層を通电加熱することによって、カンチレバー状に加工した構造が上下運動し、その水平変位が搬送動作を実現する。作製した一次元マイクロ搬送システムは、長さは500 $\mu\text{m}$ 、幅100 $\mu\text{m}$ 、厚み6 $\mu\text{m}$ のマイクロアクチュエータを1cm角上に512個集積化（アレイ化）したものであり、1Hz駆動時に27 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 、20Hz駆動時には658 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の搬送速度を得た。

第3章では、第2章で作製した一次元マイクロ搬送システムを拡張した二次元マイクロ搬送システムの設計と作製結果について記述した。この搬送システムは20x20セルで構成され、一つのセルは互いに直交した方向を向く四つのマイクロアクチュエータをもち、セルのピッチは1420 $\mu\text{m}$ 、4cm角の基板上に総計1600個のマイクロアクチュエータが集積化されている。搬送特性は、10Hzの駆動周波数、19~32Vの駆動電圧（12~34mW/actuator、48~136mW/cell）に対し、129~435 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の搬送速度（最小ステップサイズ6~22 $\mu\text{m}$ ）、また27.5Vの駆動電圧、1~100Hzの駆動周波数に対し、35~467 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の搬送速度（最小ステップサイズ2~18 $\mu\text{m}$ ）であった。

以上のように、第2章と第3章の成果によって、上記中間目標の①を実証した。

第4章では、上述した二次元アクチュエータアレイをもちいて自律分散型MEMSのエミュレーションシステム（アクチュエーターセンサーMPU・セルアレイ）を構成するための構成方法を議論した。集中制御方式をトップダウンアプローチとして、分散制御方式をボトムアップアプローチとして位置づけ、前者によってシステムの機能性を評価（中間目標の②）し、後者によって自律分散的制御の適用可能性を評価（中間目標の③）する提案を行った。

このようなエミュレーションシステムの実現にむけて第5章では、センサセルピッチの搬送動作への影響を検証するために、二次元アクチュエータアレイを俯瞰するCCDカメラ、その画像を処理するPC、搬送パターンを生成するCPLD(Complex Programmable Logic Device)をもちいて、フィードバック搬送システムを構築した。センサアレイはPC上でCCDイメージを任意に分割することでエミュレートした。このシステムにより、アクチュエータセルの20%(710 $\mu\text{m}$  x 533 $\mu\text{m}$ )のピッチをもつセンサアレイ、5%(337 $\mu\text{m}$  x 266 $\mu\text{m}$ )のピッチをもつセンサアレイのそれぞれについて、フィードバック搬送を確認した。

これをうけて第6章では、16 x 16セル、1500 $\mu\text{m}$ のピッチを持つ市販のフォトダイオード(PD)アレイにあわせて二次元アクチュエータアレイを改良し、それらを積層化することによって、アクチュエーターセンサ・セルアレイを構築した。それぞれのドライブ回路を自作し、FPGA(Field Programmable Gate Array)をもちいた集中制御方式によって、その機能性を評価した。マニュアル搬送モードでは、直進搬送、斜め搬送、回転搬送のほかに、同一システム面内での二物体の独立搬送を確認した。この際、搬送物直下のアクチュエータに接続されたパッドのみを駆動する局所的フィードバックを用いた。一方オート搬送モードでは、搬送目標位置への自動フィードバック搬送を確認した。その最も安定した搬送例では、駆動電圧 19V、駆動周波数 16Hz 時に、搬送速度 1650 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 、対応する最小ステップサイズ 50 $\mu\text{m}$ を得た。

以上のように、第5章、第6章で上記中間目標の②を検証し、アレイ MEMS の協調動作による機能性を確認した。

第7章では、FPGA 内に MPU セルアレイを実装し、前章のアクチュエーターセンサ・セルアレイに対応させることによって、アクチュエーターセンサ-MPU・セルアレイを構築した。MPUセルの出力決定ロジックには、セルオートマトンの考え方に基づく時間発展ルールを採用し、アライメント搬送パターン、直進・斜め搬送パターン、回転パターンの形成を確認した(自律分散型制御による機能性の確認)。さらに、セルの一部を故障セルに見立てた実験を行い、この場合にも適切な搬送パターンが形成されることを確認した。これによって、このシステムが耐故障性をもつことが確認できた(スマート性の確認)。また搬送実験ではアライメント搬送パターンを形成し、搬送物が搬送パターンに沿って目標位置へと至る自律分散的な搬送動作を確認した。最後に FPGA 内に実装した MPU の回路構成について、その回路規模についての考察を行い、0.13 $\mu\text{m}$  ルールによって作成される CMOS プロセスを使えば、一つのセルあたりおよそ 50 $\mu\text{m}$  角程度の面積で収まることを確認した。

以上のように、第7章で上記中間目標の③を確認した。

このように本論の実験的成果は、自律分散型 MEMS コンセプトを工学的に実証した。第8章(結論)では、これらの実験的成果に基づいて、より実用的で大規模なシステム構成の実現可能性について議論し、システム全体を管理する機能の一部に集中制御方式を取り入れた、集中一分散併用システムによる実現の見通しを得た。併せて近年の MEMS 研究動向に鑑み、自律分散型 MEMS コンセプトが将来の大規模 MEMS (大面積 MEMS やユビキタス MEMS ネットワーク)を構成する指導原理として不可欠であることを明らかにした。