

審査の結果の要旨

氏 名 孫 堯

本論文は「Study on Diffusion-Based Molecular Communication (拡散型分子通信に関する研究)」と題し、体内のナノマシン間の通信など、無線通信が不可能な環境下でのデバイス間の近接通信の手法として注目されている分子通信のなかで拡散型通信について研究を行ったものであり、全六章から構成されている。

第一章は「Introduction (序論)」であり、ナノマシンの歴史と現状について概観している。また、その大きさの制約から単体のマシンではなく、複数のマシンの連携によりタスクを実行することが現実的であるためナノマシン間の通信が重要であることを指摘している。また特に体内での利用を想定する、マシン自身の大きさと波長の関係・体内電磁波の健康リスク・体内の電波減衰などの要因から、従来の無線通信の利用は不可能であり分子通信が有力な手法であることを述べている。

第二章は「Overview of Molecular Communication (分子通信の概観)」と題し、後続の章の準備として要素技術の概観を行っている。まず、変調手法として送信する分子の数を制御する Concentration Shift Keying (CSK), 異なる種類の分子を用いる Molecule Shift Keying (MoSK), 位相シフトキーイングと類似の Timing-Based Modulation, DNA シーケンスに情報を乗せる Structure-Based Modulation を紹介している。次に、信号伝搬の手法として拡散を利用する diffusion-based molecular communication (DBMC), ギャップ結合を利用する手法, バクテリアに情報を伝搬させる手法, 分子モーターを利用する手法を紹介している。この中で DBMC では拡散は媒体中で自発的に生じるのでスイッチなどの制御機構が不要でありかつ伝搬のためのエネルギーが不要なこと等の利点があることから本論文の研究対象としたことを述べている。更に拡散分子通信の解析のために必要となる拡散方程式など数学的な基礎理論の紹介を行っている。

第三章は「Communication Distance Measurement in Diffusion-based Molecular Communication (DBMC のための通信距離測定)」と題し、DBMC においては位置同定や CSK における分子の数の決定など様々な場面でノード間距離を測定することが重要であることを指摘し、距離測定時に生じるノイズの原因とそのモデル化を行っている。その上で拡散係数の異なる二種類の分子の伝搬時間の差を利用した arrival time difference (ATD)法の提案を行っている。更に提案ノイズモデルを利用し従来手法と

ATD 法の特徴をシミュレーションによって解明し、ATD は正確な時間計測が必要な往復遅延時間を測定する手法に比べ、ほぼ全ての条件下で距離誤差が少なくなること、また性格な送信分子数の制御と測定機構が必要な到達分子数の減衰を測定する手法に比べても距離誤差が遜色ないことなど良好な特性を示すことを明らかにした。また ATD で選択すべき適切な分子の種類についても検討を行っている。

第四章は「Mitigation of Bit Error Rate caused by Inter-symbol Interference (シンボル干渉によるビットエラーの低減)」と題し、CSK におけるシンボル干渉についての検討を行っている。まずシンボル干渉の数学的モデルを導出した上で、様々な条件下での特性をシミュレーションにより示している。特に、ビット誤り率が、一つのシンボルを送出する時間であるコード幅に対して負の相関、ノード間距離に対して正の相関をもつことを指摘している。一方コード幅が大きいほどビットレートは小さくなるため、距離に応じた適切なコード幅を選択することが重要となる。次に、ドラッグディリバリーシステム等への応用を想定し、ノード間距離が時変である場合に、適応的にコード幅を変化させる Adaptive Code Width プロトコルを考案しその特性をシミュレーションによって示し、固定のコード幅を用いた場合に比べ良好な特性となることを示している。

第五章は「Diffusive DNA based Molecular Communication (DNA ベースの拡散型分子通信)」と題し、DNA に直接情報を乗せる拡散分子通信の提案を行っている。まず、従来の DNA ベース分子通信にと DNA storage について概観した上で、塩基対を直接 1, 0 の情報シンボルとして用い、DNA をデータパケットとする手法を提案している。次に DNA パケットの到着順序の逆転を検出する手法を提案した上で、DNA の誤書き込み、変異、誤転写などを加味した上でチャネル容量などの特性を示している。更に、同一の DNA パケットを多数送信し、受信側で受け取ったパケットの数を数えることによりパケットの順序を判定する multiple duplicated packets and buffer-aided (MDP&BA)法を提案し、その特性を理論とシミュレーションによって解明し、従来手法に比べ良好な特性であることを示している。また適切なバッファの数について議論を行っている。

第六章は「Conclusion & Future Works (結論と今後の課題)」であり、論文の成果と今後の展開をまとめている。

以上これを要するに、拡散型分子通信に対してノード間距離測定手法、シンボル干渉によるビットエラーの低減手法、DNA に直接情報を乗せる手法の提案を行ったものであり、電子情報学上貢献するところが少なくない。よって本論文は博士 (情報理工学) の学位請求論文として合格と認められる。