マイクロハンドによるミクロ世界との遭遇ロボット

「みゅーたん」に関する研究の展開

Development of μ TAN as a close encounter robot with the micro world.

○学 楠田 晋也(立命館大学), Jeong OK Chan(立命館大学), 学 榊原 毅(立命館大学),
学 栗山 美由紀(立命館大学), 学 津々美 秀敏(立命館大学),
野方 誠(立命館大学), 正 小西 聡(立命館大学)
Shinya Kusuda, Jeong OK Chan, Tsuyoshi Sakakibara, Miyuki Kuwayama,
Hidetoshi Tsutsumi, Makoto Nokata, Satoshi Konishi (Ritsumeikan University)

This paper presents μ TAN as a flexible micro manipulation system, which consists of a micro hand with a guide robot and a virtual reality (here after VR) human interface system. We can control the micro hand and guide robot by data glove as VR systems. The micro hand is composed of five pneumatic PDMS micro fingers and connected to the guide robot. The micro hand is designed in the image of hand of human begins for visceral control. The micro hand is driven operator's hand. The micro hand is positioned by the guide robot using parallel link mechanism. We did demonstration of soft manipulation of a rhinestone (ϕ 1mm) and a eyelash (ϕ 100 μ m) at Expo Aichi. Now we are working on the performance improvement of the micro hand and robot, and the addition of the sensor performance.

Key words: Micro Hand, Pneumatic Balloon Actuator, Flexible actuator, Flow rate sensor device, Parallel Link Robot

1. はじめに

みゅーたんは、五本のマイクロフィンガーからなるマイクロハンドをガイドロボット(位置決めロボット)に搭載し、VR(Virtual Reality)技術により人間がマスタスレーブ的に制御するマニピュレーションロボットとして開発され、愛知万博に出展された。技術的には、新規ロボティクス技術であるマイクロマシン技術をコア技術とし、ガイドロボット技術、VR技術と組み合わせることにより、非常に小さな作用部をもつマイクロマニピュレーションシステムを実現している。長期的には、胎児治療などの先端医療への応用を目標として研究が進められ、短期的には教育・エンターテインメント、中期的には理美容という目標設定を行い、愛知万博では、化粧パーツの操作やまつ毛パーマのためのまつ毛操作といったデモンストレーションを行った。ミクロ世界(微小空間)との遭遇を可能とするロボットみゅーたんの愛知万博での10日間に及ぶ展示・デモンストレーションを通して得た知見に基づき、さらにロボットみゅーたんは進化を続けている。本稿では、みゅーたんに関する現在の課題とその対策、さらには今後の展望を述べる。

2. 「みゅーたん」の概要

みゅーたんはマイクロハンド、ガイドロボット、VRヒューマンインターフェースシステムより構成されるマイクロマニピュレーションシステムである。以下、各要素について説明する。

2.1 マイクロハンド

図1にマイクロハンドの構造図を示す。マイクロハンドは柔軟で生体適合性を有する材料であるシリコン樹脂(Polydimethylsiloxane: 以下PDMS)の薄膜により構成されている。マイクロハンドは五本のマイクロフィンガーを持ち、マ

イクロフィンガーにはそれぞれ駆動関節が内蔵されており、人の手の動きを再現することができる。関節部分の薄膜中にはマイクロバルーンと呼ばれる空気層が形成されており、比較的低い(150kPa程度)圧力を印加し薄膜を膨張させることにより関節の屈曲動作を実現する(図2)。マイクロハンドにはその特徴として、柔軟・低圧駆動による高い安全性、水中駆動可能、バッチプロセスによる大量生産性などが挙げられる。

Fig.1 Schematic view of the micro hand

Fig.2 Working principle of micro finger

2.2 ガイドロボット

臨床使用を想定した場合、電気電子デバイスを体内へ挿入せず、また使用後の滅菌・滅菌が確実にできるなど、高安全なロボットが必要である。みゅーたんに用いたガイドロボットは、人間の腕と手首に相当する能動多自由度関節と液体中駆動を実現する操作伝達機構を備えており、マイクロハンドを水槽内や血液・羊水が充満した生体内にある対象物体へと導く役割を担う。本ガイドロボットは、駆動源をすべて根元に配備したマイクロパラレルリンク機構の採用により、マイクロフィンガーの高精度位置決めを可能とし、特徴としてアーム断面 $\phi 10\text{mm}$ 程度の細腕構造、先端位置と姿勢の 5 自由度駆動、液体内作業(水や血液内使用、滅菌処理)などが挙げられる。

2.3 VR ヒューマンインターフェースシステム

入力インターフェースとしてデータグローブを使用し、ロボット操作者の入力動作をマイクロフィンガーに伝えることを目的とした VR 技術によるマスタスレーブ制御システムを構築した。図 3 にシステム概要図を示す。本システムにより操作者にとって違和感のない直感的な操作を実現した。

Fig.3 Control system of μ TAN

3. ロボット「みゅーたん」の研究展開

3.1 みゅーたんの発展性

みゅーたんの微小物体把持能力・精密動作を愛知万博においてデモンストレーションするにあたり (図 4 参照)、以下の動作について評価を行った。

- ・ $\phi 1\text{mm}$ 質量 0.01g のラインストーンの把持・移動動作
- ・ $\phi 50\sim 100\ \mu\text{m}$ の睫毛の把持動作

評価実験において、みゅーたんはまつ毛などの $100\ \mu\text{m}$ 程度の微小な対象物に対して、正確に位置決めを履行し、柔軟な把持動作を行うことに成功した。

愛知万博で用いたマイクロハンド用のマイクロフィンガーは、安全性を重視し、低剛性、低圧駆動を迫及した。しかしながら、今後のさまざまな応用展開を考えた場合、マイクロフィンガーの発生力の向上が重要になってくることが予想される。また、マイクロフィンガーへのセンサ機能の搭載によって、さらに高度なヒューマンインターフェース機能をもつシステムへの発展も可能であろう。また、ガイドロボットは、多自由度のリンク機構で操作性と高精度の両面を迫及し、複数個所の部品改良と駆動実験を実施することにより改善を行った。しかし今後の応用展開において、現行の機構では、①関節部のガタや振動の除去に限界があること、②手首の自由度をさらに増やすことが困難である、などの課題がある。そこでガイドロボットの基本構造を見直し、新たな機構の設計製作を行った。

以下、これらのみゅーたんの発展性に関する項目とその対策について述べる。

Fig.4 Demonstration of μ TAN

3.2 マイクロフィンガーの発生力の向上

実証実験においてマイクロフィンガーによる質量 0.01g のラインストーンの把持動作を確認したが、小さな生物や生体の内外組織・器官に触れ、操作するという展開を考えた場合、マイクロハンドには、現状よりも大きな出力が求められる。マイクロフィンガーの発生力は、構造の剛性と駆動圧力に大きく依存する。構造の剛性が低いと、バルーンアクチュエータ以外の受動的な部分で屈曲のための力が吸収されてしまう(図 5)。構造の膜厚を厚くすることにより受動構造の剛性が増し、発生力の伝達ロスの低減が期待できる。今回、膜厚値を愛知万博時の値の $50\ \mu\text{m}$ から $1000\ \mu\text{m}$ に増やすことにより、質量 1g の分銅を持ち上げることが可能なマイクロフィンガーを実現することができた (図 6)。

Fig.5 Necessary reason for rigidity

Fig.6 Lifting a weight (1g)

Fig.7 Generative force-Pressure diagram

3.3 センサ機能をもつマイクロフィンガー

愛知万博を含めこれまでみゆーたんのシステムでは、顕微鏡からの画像情報を見て操作を行っていた。しかしながらより精密な操作を行うためにはマニピュレータとなるマイクロフィンガーの姿勢や操作対象物体との接触、さらには触覚・力覚情報の利用が有効である(図 8)。このようなより詳細な情報のフィードバックによる高度なヒューマンインタフェース機能の実現を目指し、本研究では、マイクロフィンガーへのセンサの搭載を取り上げることにした。マイクロフィンガーの動作や接触情報を検知するためのセンサには、マイクロフィンガーの最大の特徴である柔軟性を損なわないことが求められる。ロボットへの応用を狙った柔軟なセンサがいくつかみられるようになっているが、本研究では、アクチュエータとセンサの整合性を重視し、独自のセンサとして流路抵抗型センサを提案する。バルーンアクチュエータの周囲に配置した流路内の抵抗変化を計測することにより、マイクロフィンガーの動作を検知することができる(図 9)。バルーンアクチュエータと流路抵抗型変形センサの基本構造は同じであることから、製作やシステム構成の面からも非常に整合が良いといえる。図 10 に流路抵抗型センサの概要図を、図 11 にセンサシステムの概要図と等価回路を示す。マイクロフィンガーには、駆動関節となるバルーン周囲に流路を形成し、ガスボンベからレギュレータにより一定圧力に保持された窒素ガスをこの流路内に導入し、最終的には大気開放している。等価回路ではガスボンベは電圧源に、バルーン周辺の流路は可変抵抗に、大気開放孔は接地に相当している。バルーンへの加圧によりマイクロフィンガーが屈曲動作を行うと、流路内における損失エネルギーが増加し内部抵抗が増加する。この結果、流路内に流れる流量が減少する。この流量の変化を計測することにより、マイクロハンドの動作や対象物との接触・力覚情報を検知することができる。図 12 に製作したセンサの評価結果を示す。

Fig.8 Schematic view of Sensor Feedback system

Fig.9 Principle of flow sensing system

Fig.10 Micro finger with flow sensor

Fig.11 Equivalent circuit of flow sensing system

Fig.12 proving test of flow sensing system

3.4 新型ガイドロボット

評価実験によって明らかになった、振動と自由度の不足という問題点を解決し、更なる操作性の向上と高精度なガイドロボットを実現するため、下記指針に基づいた新たなガイドロボットを設計製作をおこなった。

- ・高剛性、高速、大変位駆動でき、かつ単一部材成型の実現
- ・多自由度で高速駆動できる部分弾性変形駆動

まず、手首関節の基本的な形状の再設計を行い、リンク関節ではなく材料の弾性により変形し、変位を実現する関節へと変更を行った。これにより、関節ガタが無い状態で、更に手首関節の可動範囲を実現する2自由度の動きを実現した。設計結果を図13に示す。この三角形に配置された関節機構の駆動原理として、図13(b)のように、3辺にそれぞれDCサーボモータを固定し、ネジによる並進運動で押し込み量を調整することにより、底面の角度と方向の制御を行う。3つのうちのひとつが並進することで、他の先端部分に発生する余分なねじりの力に対し、これを軽減させるための切り欠きも加えた(図13(c))。ねじり方向の力はこの切り欠き回りの変形に変えられ、ほかの部分に生じるひずみを軽減することができる。

次に材料の検討を行った。上記の関節機構の動きを実現するために、材料には、高強度、高弾性、高い復元力・疲労強度、高耐久性が要求される。また、今後の医療分野への進展を考慮し、生体適合性があることも視野にいたれた。これらの要求より、超弾性効果をもつチタン合金を使用した。

以上より、材料をチタン合金と仮定して、押し込み量に対する変位の解析を行った。その結果、改良前のガイドロボットの手首の最大屈曲角が35度であったが、この機構では押し込み量1.8ミリで実現できることから、最大屈曲角は75度と十分な屈曲を得られた。

Fig.13 Design of new guide robot

ガイドロボット全体の構成として、図14に顕微鏡下作業を想定した新型ガイドロボットイメージを示す。アーム全体の位置移動には3軸リニアステージを採用する。これにより、要求される自由度を実現しつつ、駆動部と先端の距離が短く、ガイドロボット全体が高剛性となり、手先位置を高精度に駆動することが可能である。

Fig.14 Installation image of new guide robot

4. おわりに

本愛知万博に出展したロボット「みゅーたん」について、その発展性について、また現在進めている研究課題について現状を報告した。みゅーたんのコア要素である、マイクロハンドについては、中長期展望である生体への応用を意識した発生力の向上と、より高度なヒューマンインタフェースを備えたシステムの実現のためのセンサ機能の搭載といった課題に関する取り組みについて述べた。マイクロハンドを正確に位置決めするためのガイドロボットについては、新たな指針に基づき行った新規設計に関して、関節機構と駆動原理、またガイドロボットへの搭載について述べた。

今後、本稿で述べた内容をはじめとする研究の推進によりマイクロマニピュレーションシステムであるロボットみゅーたんを進化させることができれば、より様々な対象物体の操作・把持が行え、かつマイクロ世界の情報を操作者にフィードバックすることも可能となり、さらに直感的な操作も可能となるであろう。

5. 謝辞

本研究はNEDO「次世代ロボット実用化プロジェクト」「プロトタイプ開発支援事業」の助成のもと推進しました。ここに謝意を表します。

文 献

- [1] Jeong, Kusuda, Konishi: "All PDMS PNEUMATIC BALLOON ACTUATORS FOR BIDIRECTIONAL MOTION OF MICRO FINGER", Proc. of IEEE International Conference of MEMS, pp. 407-410, 2005.
- [2] Y.Lu and C.J.Kim.: "Thin flexible end-effector using pneumatic balloon actuator", SENSORS AND ACTUATORS 2001, pp.276-279.
- [3] F.Arai: "Micro Nanomanipulation -Prospect for the next 10 years-", Journal of the Robotics Society for Precision Engineering, Vol.65, No.4, pp.507-511, 1999.
- [4] S.Konishi, F.Kawai, P.Cusin, "Thin flexible end-effector using pneu