

近接覚フィードバックを有するバイラテラルマニピュレータによる 狭隘空間作業

○佐藤 圭祐（富山高専） 神田 皆人（富山高専専攻科） 李 知祐（富山高専専攻科）

1. 緒言

我々は遠隔地にいる要救援者を補助する目的で、KINECT モーションセンサを用いた非接触型のマスタースレーブマニピュレータを開発している。視覚情報のみを頼りに遠隔地で作業する場合、カメラの視野の外、あるいはアームの陰になったところで要救援者とアームがぶつかってしまう可能性がある。このマニピュレータは人間が生活する空間で使用されるため、安全のために接触前に力覚情報が伝えられる機構が必要である。

われわれが開発しているシステム [1] では、操縦者の腕をマスターアームとして使用するため、スレーブマニピュレータからの反力を伝えるために、振動モータを用いた圧覚デバイスを開発している。

これまで、本システムを用いて狭隘空間における作業実験を行い、人間の腕と圧覚フィードバックによる疑似的なバイラテラル制御の有効性の確認を行ってきた。従来のシステムでは人間の腕に装着した圧覚デバイスが接近有り無しに対応して ON/OFF のみの 2 値の情報しか伝えることができなかったため、狭隘空間の幅が狭い場合に、複数の近接覚センサが同時に圧覚を与えてしまい、操縦者がどちらの方向へ腕を動かしてよいか、分からなくなるという問題があった。

この問題に対し、我々はこれまでスレーブアーム表面の近接覚センサとして用いてきた赤外線センサを ToF 型の距離センサに置き換え [2]、圧覚デバイスに用いている振動モータの振動パターンを変化させることにより腕に与える圧覚を多段階に変化させる方法を提案 [3] している。

本論文では多段階の圧覚刺激を発生させることができる圧覚デバイスを用いたマスタースレーブマニピュレータを用いて狭隘空間における作業実験を行い、従来開発してきた 2 値の圧覚デバイスに比較してより狭い空間での作業が可能になることを実証するためにシステムを構築し、実験を行う。

2. システム構成

本研究で開発したマスタースレーブマニピュレータシステムの構成を図 1 に示す。

本システムの基本的なコンセプトは操縦者の腕をマスターアームとし、それと同じ動きをするスレーブアームにより作業することにより、誰でも直感的に操縦できるマスタースレーブマニピュレータを構築することである。このため本システムでは操縦者の腕の骨格情報を Kinect v1 深度センサ及び骨格抽出ライブラリで抽出し、腕の関節位置から肩やひじの関節角度を求め、スレーブアームの対応する関節の角度としている。

さらにスレーブアーム表面を距離センサで覆い、障害

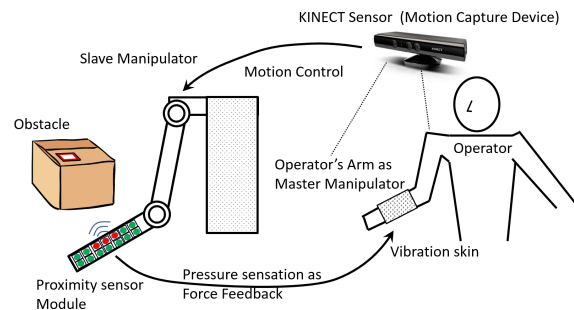


図 1 Concept of the Avator System

物とスレーブアームの距離を測定し、操縦者の腕に取り付けたバイブレーションスキンにより障害物とスレーブアームの距離に応じた圧覚をスレーブアームと同じ位置に与えることができるものである。この操縦者の腕への圧覚フィードバックにより疑似的なバイラテラルマスタースレーブマニピュレータを構成している。

本システムを構成するこれらのデバイスについてはこの後で説明する。

2.1 Kinect による操縦者の骨格情報取得

Kinect v1 は非接触の 3 次元形状センサであるため、これを用いることで操縦者は特殊なコントローラを操作することなく、マニピュレータを制御することができる。Kinect の動作原理は正式には公開されていないが、赤外線プロジェクタからのパターン投影と画像処理によるアクティブステレオ法を用いた 3 次元形状センサであろうと推測されている。

この 3 次元情報をもとに人体の骨格モデルを推測することによってモーションキャプチャを行うことができる。

本研究では、Kinect for Windows SDK を利用してマニピュレータ操縦者の骨格モデルを取得し、腕の各関節の三次元座標から角度を算出してスレーブマニピュレータに腕と同じ動作を行わせている。

この SDK により人間の骨格モデルは 20 個の 3 次元座標として得られ、これらの座標を接続することにより図 2 に示すような人間の骨格を再現することができる。

2.2 スレーブアーム

本研究で用いたスレーブアームの外観を図 3 に示す。本スレーブアームは 2 リンク構成とし、各ジョイントはそれぞれの寸法は 2 つの方向に曲げることができるようになっている。また人間の腕とほぼ同じ大きさとするために 2 つのリンクの長さはどちらも 300mm とした。それぞれの関節はラジオコントロール模型用のサーボモータを用いて駆動している。

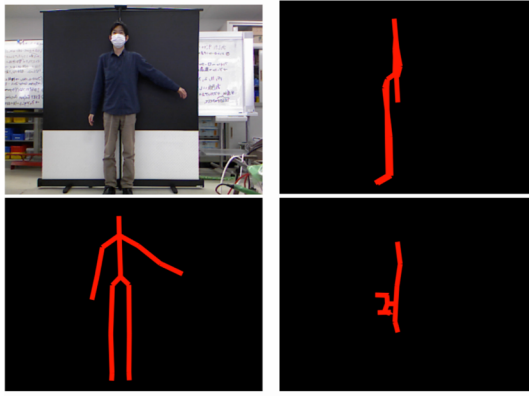


図2 Skelton Model Obtained by Kinect sensor

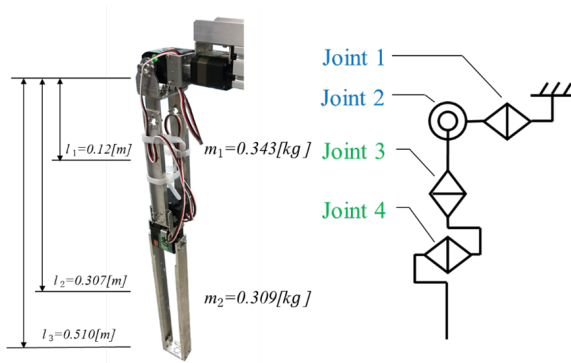


図3 Slave arm geometry

スレーブマニピュレータには多くのセンサーが取り付けられるので、十分なトルクを発生させるためにサーボモータには KO PROPO 製の KRS-9004HV ICS(Max torque 90kgf・cm)を用いており、これらのサーボモータは ICS3.5 規格のシリアル通信回線により PC からコントロールされる。

2.3 センサスキン

本研究ではスレーブアームに接近した物体を検出するためのデバイスとして、ロボットアームの表面を覆うように距離センサを多数装着したデバイスを開発した。本研究ではこのデバイスをセンサスキンと呼称する。センサスキンは障害物との距離を測定するために 8 個の ToF 型距離センサ (ST マイクロエレクトロニクス社製 VL6180X) を搭載した長さ 250mm, 幅 25mm のセンサモジュール 8 枚から構成されている。8 枚のセンサモジュールはスレーブアームの前腕部分に 45° ずつずらして巻きつけるように配置されており、それぞれの距離センサからの距離情報は I2C バス経由でモジュール上の Arduino マイクロプロセッサに集められ無線装置を使って制御用の PC へ送られる。

使用している ToF 型距離センサはデータシート上は 0mm から 100mm まで距離を測定することができることになっている。

2.4 圧覚デバイス

本システムではセンサスキンによって検知された情報をマニピュレータの操縦者に伝達するため、扁平形の振

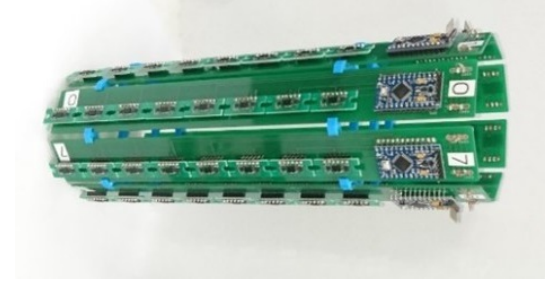


図4 Proximity Sensor Module

動モータを複数個ゴムバンド上に配置し、操縦者の腕に巻いて使用する圧覚デバイスを開発した。

我々が開発した圧覚デバイスには 22 個の振動モータが取付けられており、これらは図 5 に示すようにスレーブアームに取付けられたセンサスキンの距離センサと基本的には同じジオメトリで配置されている。ただし、現在のバージョンの圧覚デバイスでは振動モータのサイズの制限により、腕回り方向では距離センサ 2 つ分を 1 個の振動モータに集約し、腕の長さ方向では、腕上部の方の距離センサ情報を無視している。これらの振動モータは対応した近接センサが反応すると動作するようになっており、ロボット操縦者は自らの触覚でマニピュレータ近傍の物体の存在を認識することができる。

従来のシステムでは障害物とスレーブアームが接近したときに振動モータを回すだけであったが、スレーブアームの作業空間が狭くなってくると、複数の距離センサが同時に反応してしまい、どちらの方向に大きなスペースがあるのか全く分からなくなるという問題があった。この原因は圧覚デバイスである振動モータの駆動を ON/OFF のみで行っているため、スレーブアームと障害物の間の距離がつかめないためである。

この問題を解決するためには圧覚デバイスが腕に与える圧覚を障害物からの距離の応じて多段階に変化させる必要がある。我々は様々な振動モータ駆動方式を用いて圧覚の分解能を調査し、振動モータを短時間に間欠的に駆動し、その駆動間隔を変化させる方法が最も圧覚分解能が大きくなるという結論 [2] を得ている。

この研究結果の基づき、我々は振動モータを図 6 に示すようなパルスで駆動し、圧覚を圧覚なし、弱い刺激、強い刺激の 3 段階で与える方式を採用した。

この方法では振動モータを ON にする時間は 100ms に固定し、OFF 時間を障害物からの距離に応じて変化させる。圧覚刺激に変化を与えるための OFF 時間の長さは表 1 に示すように、障害物からアーム表面までの距離が 50mm 以下の場合には 50ms として強い刺激を、50mm から 100mm までの場合には 200ms として弱い刺激を与えた。

表1 振動モータ駆動パターンによる圧覚の強弱表現

Distance	Stimuli	Interval(t_{off})
100mm < d	no	NA
50mm < d < 100mm	weak	200ms
d < 50mm	strong	50ms

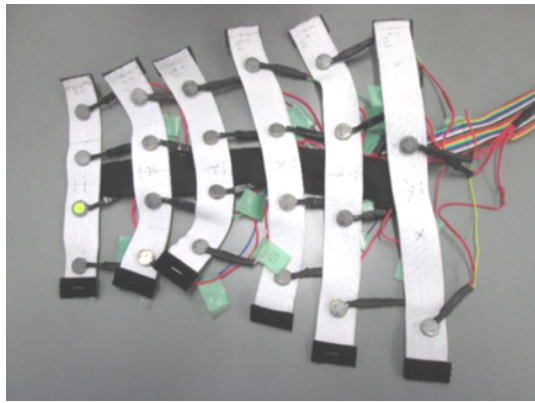


図5 圧覚デバイス

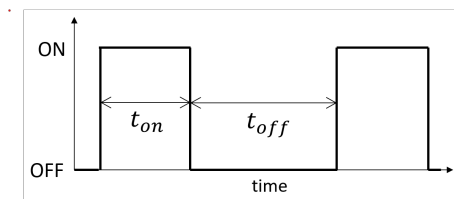


図6 Driving Pattern of Vibration Motor

3. 狭隘空間での操作実験

システムの有用性を検討するため、開発した近接覚提示デバイスを被験者に装着させ、開発したインターフェースの検知位置特定実験と狭隘空間での実験を実施し、開発したシステムによりどの程度の精度で遠隔作業が行えるか、調査を行った。

狭隘作業空間での操作実験の概要を説明する。狭隘空間として二つの障害物を立てて図7に示すよう幅 L [mm] の空間を作る。空間の上部は板などで天井を作る。被験者である操縦者は圧覚デバイスを装着して目隠しをした状態で障害物にぶつからないように、この空間にスレーブアームを入れて上部の天井付近まで近づける。操縦者は天井を検出したらスレーブアームを元の位置にゆっくり戻す。スレーブアームを障害物にぶつけないで元の位置に戻ることができれば成功とする。

障害物の間隔を 400mm, 300mm として、3人の被験者に作業を行ってもらった。また比較のため、従来の ON/OFF のみの2値の圧覚情報に基づく作業実験も行った。この2値の圧覚の場合には100mm以内に近づいた時に圧覚を与えた。

また、被験者が振動モータの発する音により障害物を検知する可能性があったので、被験者にはヘッドフォンを装着してもらい、音楽を流して、外の音が聞こえないようにした。

表2に狭隘空間作業実験の結果を示す。

障害物の間隔 f が 400mm の環境では3値の圧覚を与えた場合には3名の被験者全員がタスクに成功した。一方、2値の圧覚では3名中2名が失敗した。

障害物の間隔が 300mm の環境では3値の圧覚を与えた場合には3名の被験者全員がタスクに成功したが、2値の圧覚では3名全員が失敗した。

このことから圧覚の多値化は狭隘空間での作業の成功率の向上に有効であるといえる。

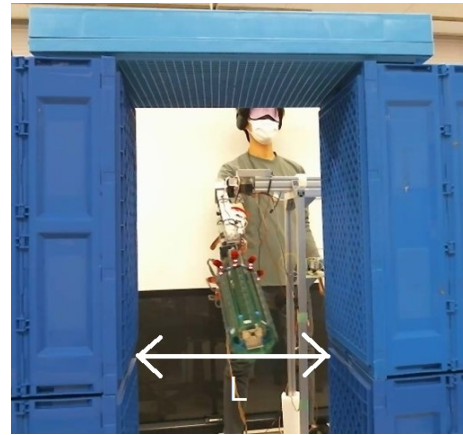


図7 Environment of Narrow Space Operation

表2 狭隘空間作業実験の成功率の差異

隙間間隔	成功率 (被験者 3 名中)	
	2 値 (ON/OFF)	3 値 (OFF/weak/strong)
400mm	1/3	3/3
300mm	0/3	3/3

4. 結論

本研究では操縦者の腕をマスタアームとする疑似的なバイラテラルマスタスレーブマニピュレータを提案し、スレーブアームからの力覚のフィードバックを実現するデバイスとして振動モータを使用した圧覚デバイスを開発した。圧覚デバイスにより多値の圧覚を発生させる方法として振動モータのドライブパターンを変える方法を提案し、狭隘空間における作業実験を行った。実験の結果、提案した多値の圧覚を与える手法を用いた場合は2値の圧覚による方法に比べ、より狭い空間において障害物にぶつかることなく作業できることがわかった。

参考文献

- [1] Keisuke Sato, Yuuhei Sugimori: "Development of a Haptic Interface with Proximity Sensors and Vibration Motors", Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol.5, 377-381,2015 doi: 10.17265/2159-5275/2015.06.007
- [2] 佐藤圭祐, 竹中洋貴, 佐渡諭: "バイラテラルジェスチャコントロールシステムのための近接覚フィードバックデバイスの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017,2P1-006,2017.
- [3] 窪田太一, 佐藤圭祐: "皮膚上に近接覚を与えるハプティクスデバイスのための振動パターン評価", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018,2A1-U04,2019.