

令和3年度 卒業研究報告書

題目

**柔軟触覚センサを搭載した物体搬送
ロボット群：COOP-FLEETSの開発**

指導教員

大須賀 公一 教授
杉本 靖博 准教授
末岡 裕一郎 助教

大阪大学 工学部 応用理工学科
学籍番号 08B17128

張 怡

2022年2月10日

概要

本研究では、様々なサイズ物体や、関節を有する物体の協調搬送にどのようなマルチロボットシステムが必要なのか議論する。そのために、人の協調搬送をヒントにし、リーダフォロワ型協調搬送を採用し、力覚情報を用いて搬送行動を制御する方法を提案する。これまでにも力覚情報を利用した搬送行動は提案されているが、主に硬い力覚センサを採用している。本研究では接触部に柔軟素材を用い、力覚情報を取得することで、搬送対象に無理な力をかけずに搬送できることが期待される。また、従来の研究では搬送される物体として、剛体がほとんどであり、多関節物体に関する研究はまだ少ない。本論文では、物体との接触面において3軸方向の力を計測できる柔軟な接触センサを用いた協調搬送を提案した。また、移動ロボット上に装着した柔軟な接触センサにおいて、信頼性のある力覚情報を取得できることを確認した。さらに、剛体だけでなく、剛体を柔軟な棒でつなげた多関節物体の運搬における協調搬送システムの妥当性を検証した。最後に、柔軟な表面をもつ人体模型の搬送を試み、人間のような柔軟かつ多関節な物体を群ロボットで、不整地の多い災害現場において搬送するにあたって、システムやロボットの構造に求められる改善を指摘した。

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景および目的	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	柔軟接触センサを搭載したオムニホイールロボットの開発と制御則の設計	3
2.1	柔軟接触センサの製作と力覚情報の取得方法	3
2.2	柔軟接触センサを搭載したロボットの設計	5
2.3	リーダ・フォロワ型を用いたロボットの行動制御則の設計	7
2.4	動作試験：ロボットの移動実験を通じた柔軟接触センサの評価	8
第 3 章	協調搬送の実機実験	12
3.1	剛体の直進搬送実験と評価	12
3.2	剛体の旋回搬送実験と評価	13
3.3	多関節物体として 2 つの剛体を柔軟素材で連結した物体の協調搬送と評価	16
3.4	ハーフサイズの人間模型の協調搬送実験と評価	18
第 4 章	結言	25
参考文献		27

図目次

2.1	Cross-sectional view of flexible tactile sensor's deformation	4
2.2	Coil position indexing for force related values' calculation	4
2.3	Flexible tactile sensor mounted on the robot	4
2.4	Mechanical structure of the developed robot	5
2.5	Velocity indexing of the omni-directional robot	5
2.6	Overview of the experimental instruments	6
2.7	Cooperative transportation using leader follower model	7
2.8	Statistics of sensor reading when robot is in a stationary state	9
2.9	Sensor reading's standard deviation (without acrylic plate on top)	10
2.10	Sensor reading's standard deviation (with acrylic plate on top)	10
3.1	Leader follower cooperative transportation experiment setup using a plastic box	13
3.2	Process of the cooperative transportation of a plastic box	14
3.3	Speed graph of the leader and follower robot	14
3.4	Cooperative transportation situation with curved path	15
3.5	Mechanical structure that release the torque applied to the flexible tactile sensor and robot in a curved path scenario	15
3.6	Process of the cooperative transportation experiment with a plastic box using three robots	17
3.7	Overview of the information collecting system using ROS	18
3.8	Process of the cooperative transportation experiment with multi-joint-object which two plastic boxes are connected with a flexible stick printed using TPU .	19
3.9	Robots' positioning under the mannequin made with a skeleton model and sand packs	20

3.10	Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin using four robots	21
3.11	Same sensor readings whether it is by the object being positioned biased or it is by the force exerted by the leader through the object	22
3.12	Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin when there exists an unstable robot which receives noise in sensor reading	23
3.13	Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin when external force is applied to the mannequin	24

第1章 緒言

1.1 研究背景および目的

日本は自然災害の多い国である [1–4]. 肉体的・精神的ストレスの多い災害現場 [5]において、力仕事をロボットに任せることで作業員の負担を軽減することができる。近年、災害現場におけるロボットによる救助活動が期待されているが、現実には様々な課題があり、ロボットは十分に活用されているとは言えない [6, 7]. このような背景から、整備されていない環境において、物資や怪我人を搬送するロボットシステムが求められている。

人や物資の搬送には様々なサイズのものが存在するため、ロボットのモジュール化による拡張性を狙った、群ロボットシステムやマルチロボットシステムの研究分野が発展してきた [8–10]. ここで、搬送をターゲットとしたマルチロボットシステム [11–13] の先行研究を紹介する。先行研究では、Pushing-only, Grasping, Caging など様々な搬送方法が提案されてきたが、搬送対象は剛体または布のような柔らかいもののみや形状の制限があるなど、対象がかなり限定されていた。すなわち、人体のような多関節物体のマルチロボット搬送にどのような問題があるのかほとんど議論されていない [14, 15]. 例えば、物体の一部をロボットが動かした場合に、関節を通じて他の部分の搬送状態にどのような影響を与えるのかなどである。すなわち、ロボットの身体構造や機能をそもそもどのように設計すべきのか、さらにはロボットの行動制御則をどのように設計すべきなのかを考えなければならない。

本研究論文では、様々なサイズ、さらには関節を有する物体の協調搬送にどのようなマルチロボットシステムが必要なのか議論する。まず、搬送方法に関しては、リーダ・フォロワ方式を採用する。そして、人の協調搬送をヒントに、力覚情報を基に搬送行動の制御を行っていく方法を採用する。力覚情報を用いたロボットの協調搬送システムは、[16–19] のように先行研究は存在するが、人のような多関節のものを協調搬送しているわけではない点、および硬い素材のセンサを採用している点が本研究とは異なる。このように力覚情報をロボットの行動制御に用いる利点としては、以下が挙げられる。協調搬送に際し、物体と接触する部分から力覚情報を取得することで、搬送状態をモニターし、物体に無理な力をかけずに搬送できる。これは

デリケートな物体や人間搬送において特に重要だと考えられる。柔軟な接触センサを利用することで、優しく物体を扱うことが可能となる。さらに、柔軟さを用いて、将来的にセンサの形を改善することで、物体とロボットの間を滑りにくくする工夫や、多様な物体の形状に沿い摩擦力を増す工夫を行うこともできる。今回の研究で用いたセンサの接触部分がエラストマでできているため、ある程度難に物体をセンサの上においても材料の柔軟さによって衝撃が吸収されるので、壊れることなく、物体を傷つけることが少ない。接触部分が老朽化しても簡単に取り替えることができる。さらに、鉄粉の量、接触部分の材料の柔らかさ、高さを調節することで感度を調節できるため、重さが大きく異なる2つの搬送物体による力を測定する場合に、センサ自体を交換することなく、接触部分の鉄粉入りエラストマを交換するだけで両方の重さに対応することができるのもこのセンサのメリットである。

本研究では、3軸方向の力を計測できる人間の皮膚のような材質とした柔軟な接触センサの利用および、その情報を適切に活用する協調搬送システムを構築する。そして、人のような多関節を持つ物体を安定して運ぶ実験を行い、評価を行う。本研究では、災害現場の搬送を想定し、ロボット上に物体を固定せず置くだけで協調搬送し、物体を地面に置いて押すシステムではなく、地面状況によらず搬送を行うことができるシステムの可能性を示す。

本論文では、柔軟接触センサを搭載した協調搬送システム：COOP-FLEETS（COoperative Object transPortation with robots equipped with FLEXible Tactile Sensors）の実機開発と制御則設計を示す。その後、柔軟接触センサの移動ロボットにおいての使用可能性を示す。さらに、剛体と多関節物体を含む様々な形状の物体において協調搬送の実現可能性を示す。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は、以下の通りである。まず、2章では開発した柔軟な接触センサを搭載した全方向移動可能なロボットと協調行動のための制御則の設計について述べる。3章で製作したロボットを用いて協調搬送実験を行い、実験結果と評価について述べる。最後に、4章で本論文をまとめる。

第2章 柔軟接触センサを搭載した オムニホイールロボットの開発と制 御則の設計

本章では、柔軟な接触センサとオムニホイールを用いた全方向移動ロボットの設計、協調搬送のための制御則設計について述べる。まず、柔軟な接触センサの製作と力覚情報の取得方法について述べる。次に、オムニホイールを用いた全方向移動ロボットの構造について述べる。そして、協調搬送に用いるリーダフォロワ型行動とそれぞれの制御則について述べる。最後に、柔軟接触センサがロボットのモータや各電子機器から受けるノイズの影響を調べ、ノイズの影響が少ないことを確認する。

2.1 柔軟接触センサの製作と力覚情報の取得方法

三軸方向の力を測れる接触センサとして川節らが開発した三軸柔軟接触センサ [20] を選定した。このセンサは主に二つの部分で構成されている。実際に与えられる力によって変形される中央に磁気粘性エラストマを持つ柔軟な接触部分と、4 チャンネルのインダクタンスデジタルコンバータ (LDC) (TEXAS INSTRUMENT 製) 部分である。

柔軟な接触部分ではゴム弾性を有する工業用材料であるエラストマと磁気粘性エラストマ(中央の黒い部分)に分けることができる。エラストマの材料として Smooth-On 製の Ecoflex 00-20 (シリコンゴム) を使用した。磁気粘性エラストマの方では、エラストマに砂鉄を混ぜて固めたものを使用した。

磁気粘性エラストマ部分の変形 (**Fig. 2.1**) によって、4 つのコイル (**Fig. 2.2**) のインダクタンスの値 L_i が変化するが、この変化を用いて三軸方向の力に線形的に対応する値 L_x , L_y と L_z を **eq. (2.1)** のように求めることができる。

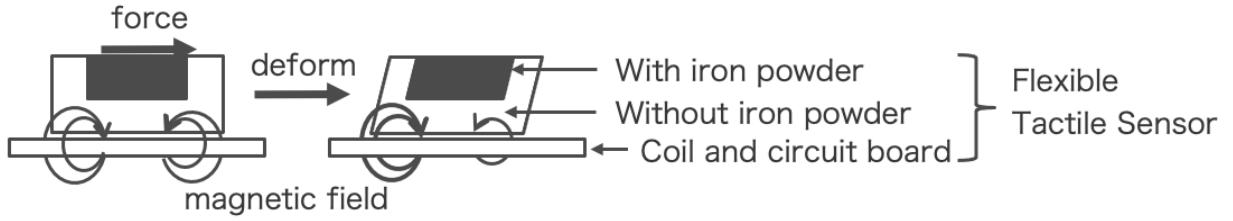


Fig. 2.1: Cross-sectional view of flexible tactile sensor's deformation

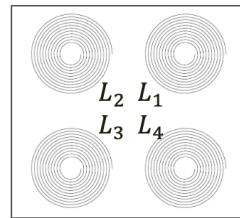


Fig. 2.2: Coil position indexing for force related values' calculation

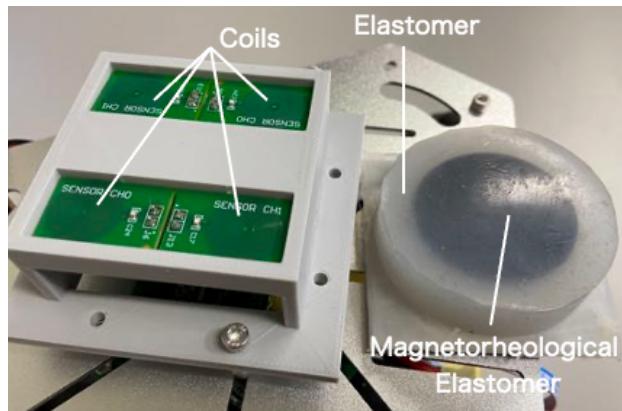


Fig. 2.3: Flexible tactile sensor mounted on the robot

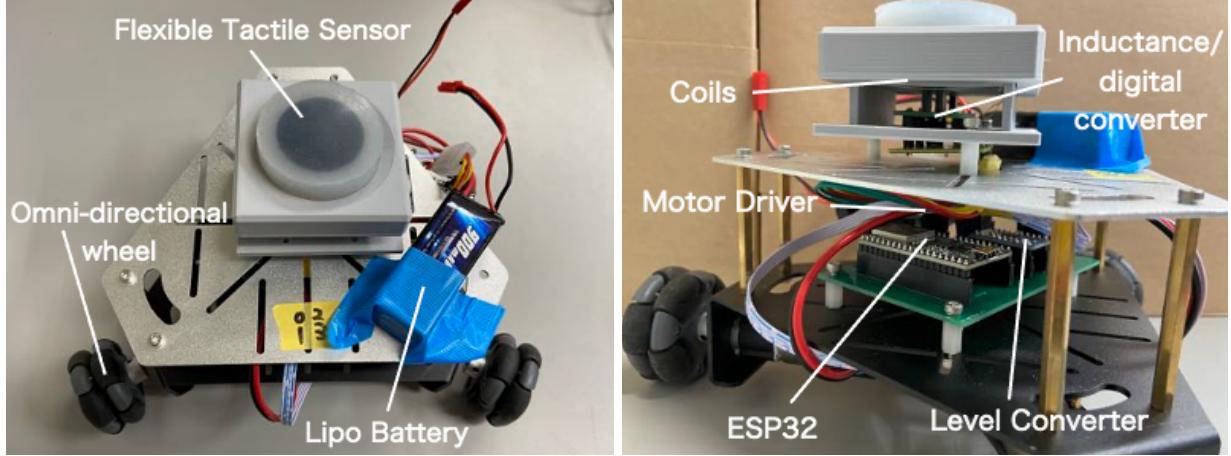
$$L_x = (L_1 + L_4) - (L_2 + L_3)$$

$$L_y = (L_1 + L_2) - (L_3 + L_4) \quad (2.1)$$

$$L_z = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

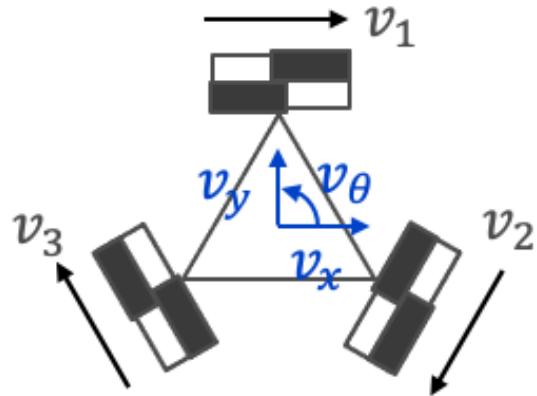
製作した柔軟接触センサを **Fig. 2.3** に示す。

ロボットにセンサを積んだ状態で何も乗せずに、最初に得られるそれぞれのコイルのインダクタンス値を平均が 0 になるように設定する。力をかけた時に、力に比例する 3 つの値を得ることができる。



(a) Top View

(b) Side View

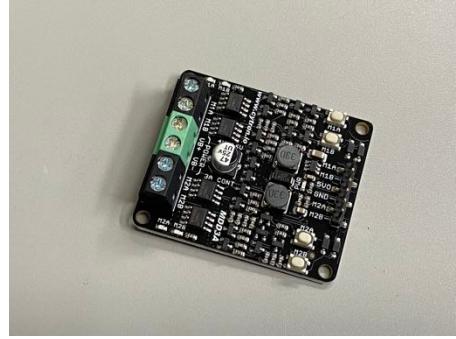
Fig. 2.4: Mechanical structure of the developed robot**Fig. 2.5:** Velocity indexing of the omni-directional robot

2.2 柔軟接触センサを搭載したロボットの設計

前節の柔軟接触センサを搭載した全方向移動ロボットの外観を **Fig. 2.4** に示す。センサ値を最大限利用するために、全方向移動できるロボットの製作において Nexus robot 製の三輪オムニホイールロボットプラットフォームを用いた。各車輪の速度を v_1, v_2, v_3 , ロボットの x 軸, y 軸, θ 軸に対する速度をそれぞれ v_x, v_y, v_θ とし、正の方向を **Fig. 2.5** に示す。三輪オムニホールの逆運動学モデルを **eq. (2.2)** のように求めることができる。



(a) Microcontroller



(b) Motor Driver



(c) Level Converter



(d) Motor and Encoder



(e) Omni-directional Wheel



(f) Lipo Battery

Fig. 2.6: Overview of the experimental instruments

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & r \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & r \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\theta \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

柔軟な接触センサはロボットの上部に固定する。ロボットに搭載したマイコン、モータドライバ、モータおよびバッテリーの詳細を以下に示す。また、それらの外観を **Fig. 2.6** に示す。

- マイコン (ESP32 ESPRESSIF 製) 1 個

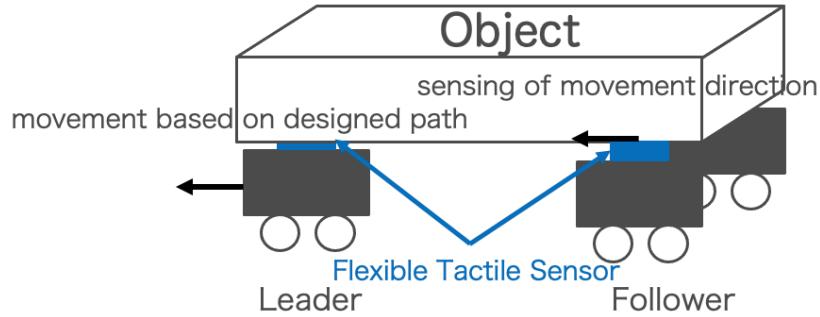


Fig. 2.7: Cooperative transportation using leader follower model

- 2 チャンネルモータドライバ (MDD3A, Cytron 製) 2 個
- レベルコンバータ (Adafruit 製) 1 個
- DC コアレスモータ (オムニホイールロボットプラットフォーム, Nexus robot 製) 3 個
- 光学式エンコーダ (オムニホイールロボットプラットフォーム, Nexus robot 製) 3 個
- オムニホイール (オムニホイールロボットプラットフォーム, Nexus robot 製) 3 個
- リチウムイオンポリマー電池 (11.1V, Zeee 製または) 1 個

2.3 リーダ・フォロワ型を用いたロボットの行動制御則の設計

制御則に関しては、人の協調行動から着想を得て設計した。Fig. 2.7 の状態では、フォロワは物体を通して、リーダが進む方向を感じて、その方向に進めば協調搬送が可能である。柔軟接触センサの値から計算した $(L_{x,follower}, L_{y,follower})^T$ にゲインをかけてフォロワの目標速度 $(v_{des,follower,x}, v_{des,follower,y})^T$ とする (eq. (2.3))。 K は定数とする。

$$\begin{pmatrix} v_{des,follower,x} \\ v_{des,follower,y} \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} L_{x,follower} \\ L_{y,follower} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

リーダの制御に関しては、事前に決定した経路に沿って進行する速度 $v_{default}$ に加えて、取得した力覚情報 $(L_{x,leader}, L_{y,leader})^T$ にゲインをかけた値を目標速度 $(v_{des,leader,x}, v_{des,leader,y})^T$ として入力することでフォロワ側の状態を考慮できるよう設計した (eq. (2.4))。 K' は定数とする。

$$\begin{pmatrix} v_{des,leader,x} \\ v_{des,leader,y} \end{pmatrix} = K' \begin{pmatrix} L_{x,leader} \\ L_{y,leader} \end{pmatrix} + v_{default} \quad (2.4)$$

2.4 動作試験：ロボットの移動実験を通じた柔軟接触センサの評価

これまでの研究において、今回採用した柔軟接触センサを移動ロボットに用いた例が存在しないことから、センサがモータや電子機器類からノイズを受けるかの検証実験を移動ロボットを用いて行った。まず、ロボットが静止状態下において、センサ自体の正確さと精密さを評価し、次に、走行中の移動ロボットに搭載した状態において、モータなどがセンサに与える影響を評価した。そして、物体をセンサに乗せた状態で、ロボットの走行中に発生するセンサの軟質素材部分の振動を評価した。

2.4.1 実験手順

ロボットの静止状態下におけるセンサの正確性および精密性の評価

ロボットのモータを切って静止した状態で、4つの異なる場所で各コイルのインダクタンスの値に対してそれぞれの平均が0となるように設定した上で、20秒以上センサの値を取った三軸のセンサ読みの結果の平均と標準偏差を計算する。力のかかっていない状態では、真の値は0になる。それぞれの回の平均と標準偏差の平均を取り、センサが真の値からのずれ（正確さ）、そしてばらつき（精密さ）を評価する。

ロボットが移動中にセンサに与える影響の評価

PI制御でロボットに3つの速さ(y方向)に追従させ、走行中にセンサの値がどれほどばらつくかを調べる。それぞれの速度に対して3回以上の実験を行う。

ロボットが物体を搭載して移動中にセンサに発生する振動の評価

アクリル板をロボット上に乗せた状態で2つ目の実験と同じように3つの速さ(y方向)で走行させ、センサの値を取得する。それぞれの速度に対して3回以上の実験を行う。

2.4.2 実験結果

ロボットの静止状態下におけるセンサの正確性および精密性の評価

センサの評価に用いた L_x , L_y の平均と標準偏差の結果をFig. 2.8に示す。真の値から最大で(y軸の方) 0.005 ± 0.02 mHほどずれることがわかった。931 gの箱を用いて協調搬送する

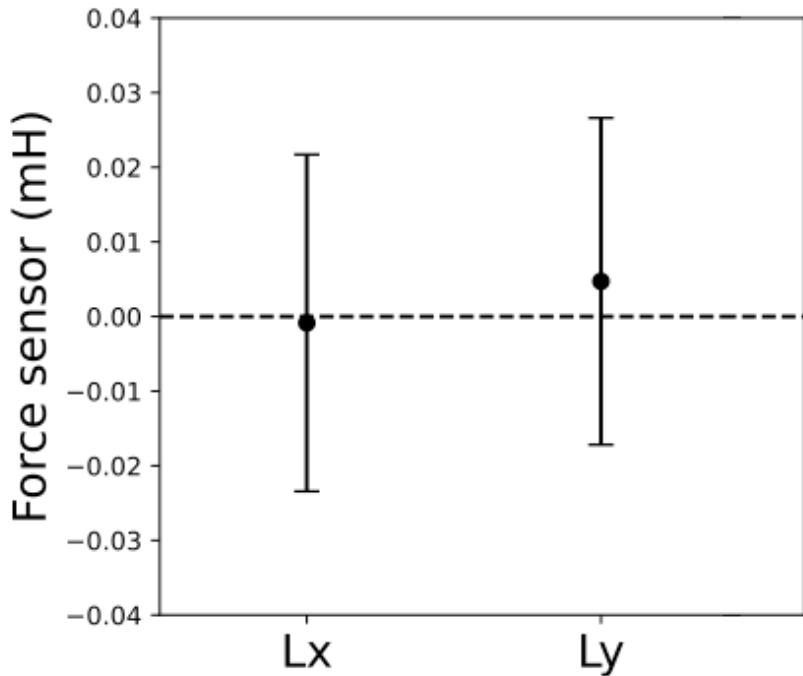


Fig. 2.8: Statistics of sensor reading when robot is in a stationary state

実験では 0.4 mH ほどの値が x と y 軸に出ているため、真の値からのずれが同じように 0.005 とすると、誤差は

$$\frac{0.005}{0.4} \times 100\% \quad (2.5)$$

と計算でき、1.3 %である。より重い物体を乗せたとき、つまりより大きな力がかかった場合でも同程度のずれと分布であると仮定すると、eq. (2.5) の分母が大きくなり、誤差はより小さくなる。実際、1 台のロボットに乗せるものが 450g を超えるので、現時点の使用において、正確さと精密さに基づいて信頼できると判断した。

ロボットが移動中にセンサに与える影響の評価

それぞれの移動速度における 3 回のセンサデータの標準偏差の平均を Fig. 2.9 に示す。走行においても、x 軸と y 軸（センサの表面となる平面）のセンサ値の標準偏差は静止時とほとんど変わらない。つまり、物体を乗せずロボットが移動しているとき、柔軟接触センサ自体の振動やセンサに影響する可能性のあるモータの動作は、センサ値にほとんど影響を与えていないことが分かった。

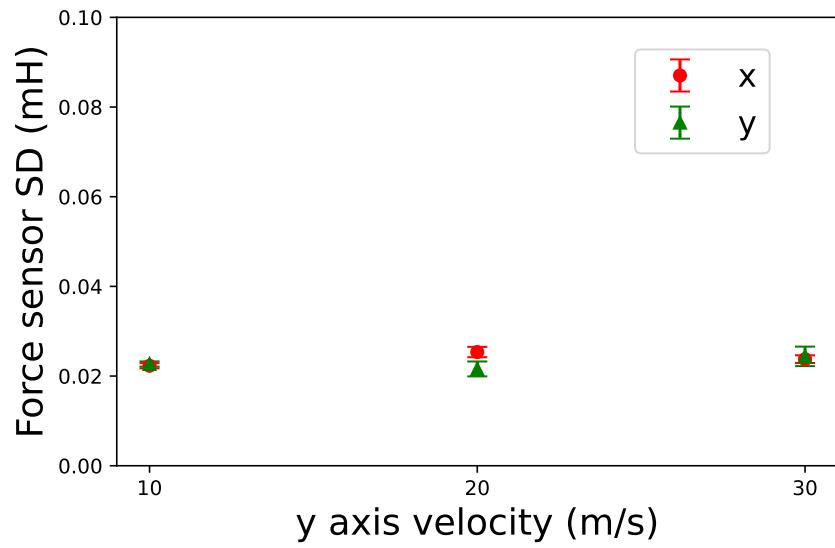


Fig. 2.9: Sensor reading's standard deviation (without acrylic plate on top)

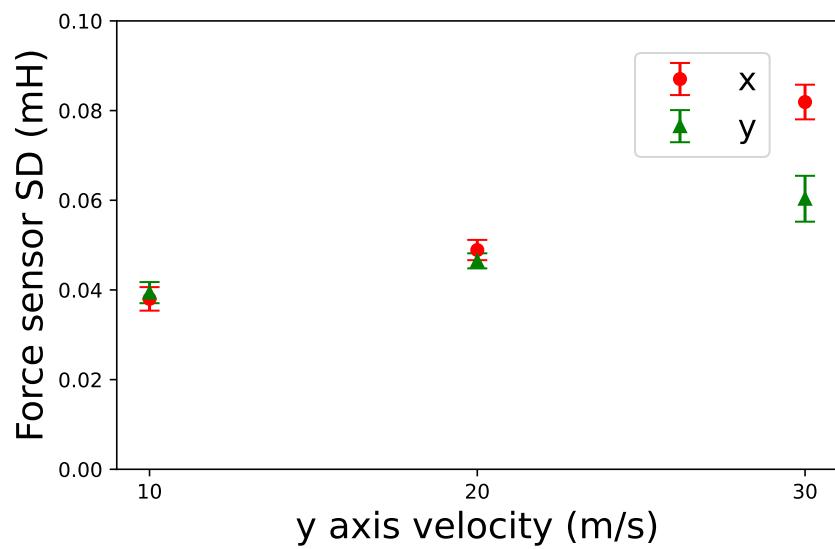


Fig. 2.10: Sensor reading's standard deviation (with acrylic plate on top)

ロボットが物体を搭載して移動中にセンサに発生する振動の評価

それぞれの移動速度における 3 回のセンサデータの標準偏差の平均を **Fig. 2.10** に示す。速度が増すにつれてアクリル板の振動が増え、センサ値の分布が広がり、標準偏差が大きくなつた。

2.4.3 考察

今回の実験において柔軟なソフトセンサのエラストマ部分に Ecoflex 00-20 を用いた。センサ自体の正確性と精密性は検証結果より信頼でき、ロボットの移動中でもモータや電子機器からノイズをほぼ受けていないという結果を得ることができた。また、走行速度が上がると、振動が増えることがわかった。異なる性質を持つシリコンゴムを用いる場合、検証実験を再度行う必要があることも想定される。

第3章 協調搬送の実機実験

本章では、前章で製作したロボットと設計した協調のための制御則を用いて行った協調搬送実験について述べる。

前章では、移動ロボット上に固定した柔軟な接触センサの読みが信頼できることを確認した。本章ではまず、剛体の搬送において設計した制御則による動作を確認し、協調搬送の可能性を検証する。次に、2つの剛体をつなげた多関節物体の協調搬送を検証し、関節があることによる影響や変化を評価する。最後に、多関節物体だけでなく、表面が柔らかく、丸みを帯びている人間骨格模型の協調搬送を検証し、実験結果を評価する。

3.1 剛体の直進搬送実験と評価

箱型の物体を用いて、1台のリーダに直進する経路を与え、フォロワが1台のみの場合の協調搬送実験を行った。

3.1.1 実験手順

進む方向に対し先頭1台のロボットをリーダ、後方1台のロボットをフォロワの役割とし、実験におけるロボットの配置を **Fig. 3.1** に示す。

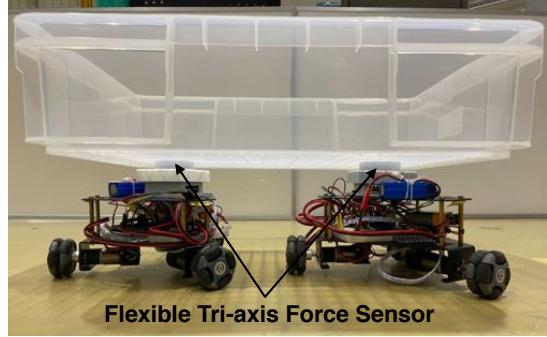
実験中のセンサの読みと各モータのエンコーダ情報は、ロボット上に装着しているBluetoothモジュールを通してパソコンに発信して保存されるよう設定した。

3.1.2 実験結果

実験中の様子を **Fig. 3.2** に示す。実験中にエンコーダを用いて計測したリーダとフォロワの速度の値を **Fig. 3.3** に示す。実験開始直後 (0-5 sec) は、物体をまだロボット上に置いていないため、リーダとフォロワの両方において柔軟接触センサからの読み取りは0となる。すなわち、**eq. (2.3)** と **eq. (2.4)** に設計した制御器の通り、リーダは $v_{default}$ で進み、フォロワは進ま



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 3.1: Leader follower cooperative transportation experiment setup using a plastic box

ないことが確認できる。物体を置くことで（15 sec より），リーダとフォロワが物体を通してお互いの状態を確認し始め，最終的に，フォロワはリーダの速度にほぼ一致し，追従性が確認できた。また，物体をロボットから離したとき，フォロワは柔軟接触センサからの入力がなくなったため，停止した。リーダも同じように柔軟接触センサによるフィードバックを受けなくなり，速度が $v_{default}$ に戻った。

4kg の荷重を上の箱の中に乗せた場合においても，本実験と同じように追従性と速度の合意を確認できた。

3.1.3 考察

Fig. 3.3 にて，10秒付近に見られるスパイクは，箱を置くことに失敗してしまった時のセンサの読みである。その後，17秒までに力かかっていないにもかかわらず，フォロワの方でセンサの読みの平均が0でないことも確認できる。これはセンサの特性の一つであるヒステリシスによるものであると考えられる。

3.2 剛体の旋回搬送実験と評価

選定した柔軟接触センサの磁気粘性エラストマ部分は円形になっているため，センサがねじれても鉄粉部分は変位が変わらず，センサは磁場の変化を検知できない。その結果，旋回を含む経路を進む際に，特にあるロボットのセンサを中心に回転する場合（**Fig. 3.4**），そのロボットが発生するトルクを検知できないため，対応できない。よって，旋回経路の進行時に，センサの柔軟な部分にねじれが生じ，物体と柔軟接触センサの間に滑りが生じ，物体が落下することが想定される。本節では，旋回に対応できるセンサ構造を提案し，その効果を実験を通

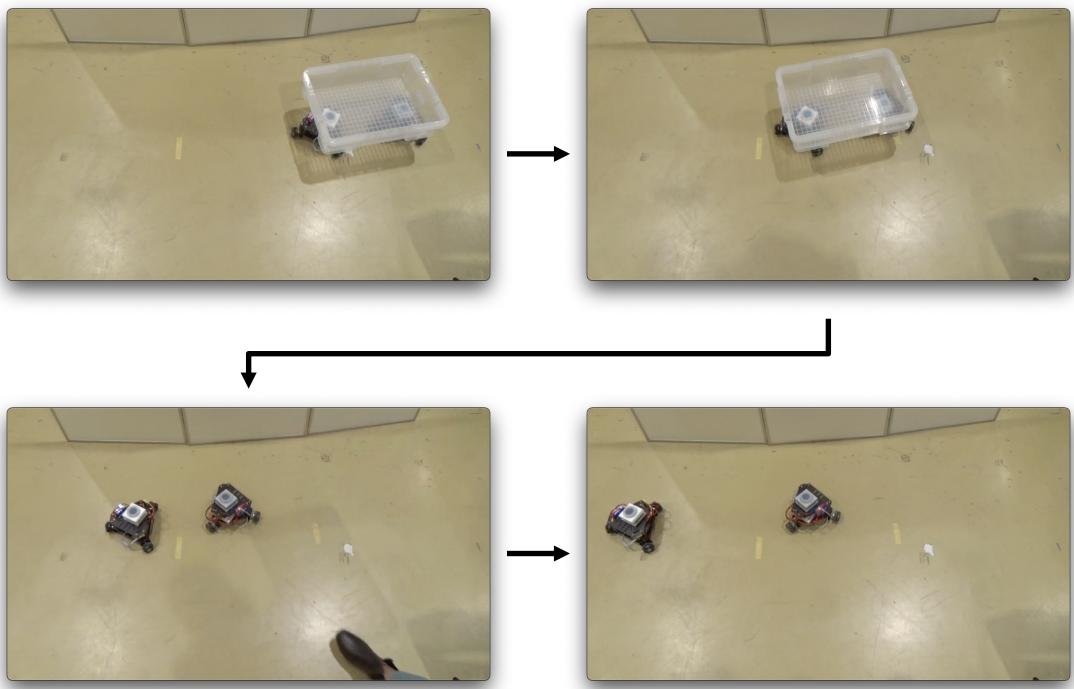


Fig. 3.2: Process of the cooperative transportation of a plastic box

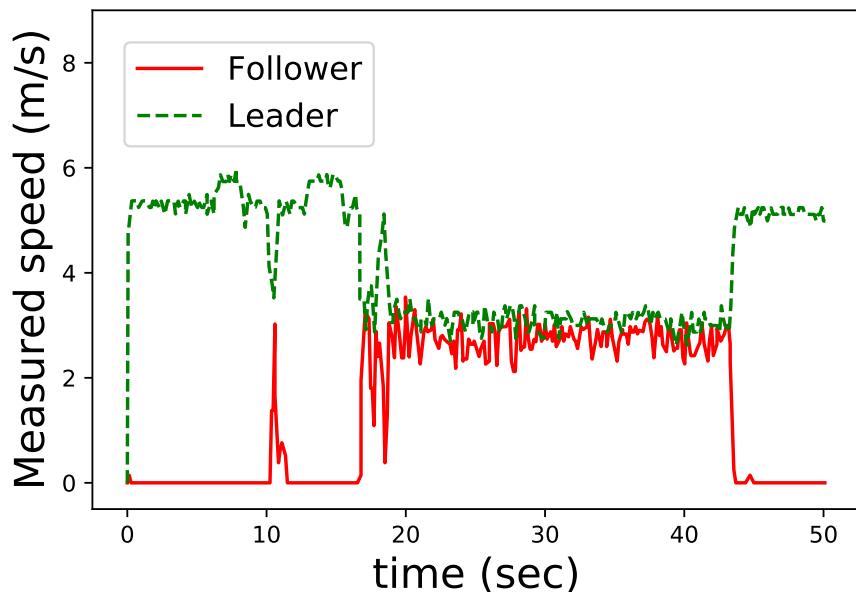


Fig. 3.3: Speed graph of the leader and follower robot

して確認する。

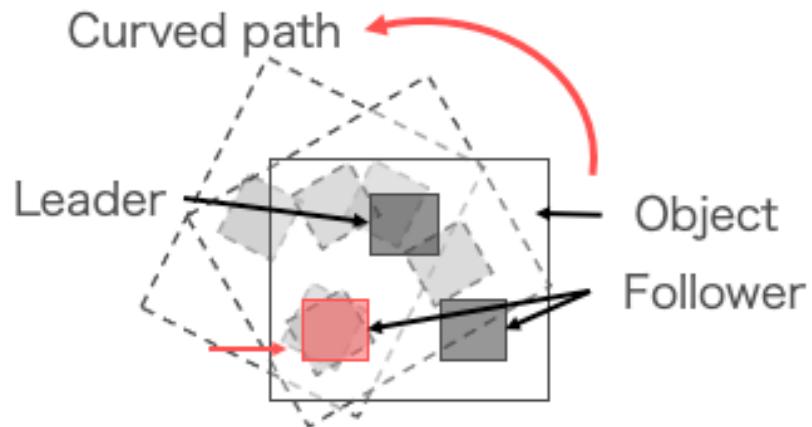


Fig. 3.4: Cooperative transportation situation with curved path

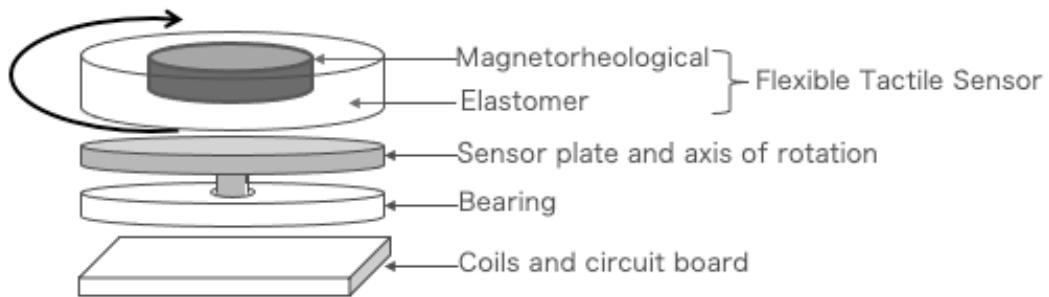


Fig. 3.5: Mechanical structure that release the torque applied to the flexible tactile sensor and robot in a curved path scenario

3.2.1 旋回行動に向けたセンサ機械部の改良

磁気粘性エラストマ部分は円形になっているため、センサの中心を軸にして回っても鉄粉の変位はなく、回転後でも同様に力が計測可能であることを利用し、**Fig. 3.5**のようにベアリングを利用することでロボットにかかるトルクを解消することを提案する。

3.2.2 実験手順

協調搬送物体として、プラスチック製箱型を選び、物体の下に3台のロボットを三角形を成すように配置した。進行方向にある1台のロボットをリーダ、後ろの2台のロボットをフォロワとした。リーダには旋回を含む経路を事前に与え、また、ロボットにはセンサの柔軟な部分

が実際に回転しているかどうかを確認するために、方向を区別できる印を貼った。

3.2.3 実験結果と考察

実験の様子を **Fig. 3.6** に示す。三角形はセンサのソフト部分に貼った印を表す。オレンジ色の三角形はリーダを表し、青色の三角形はペアリング機構を装着したフォロワ、白色の三角形はペアリング機構を装着していないフォロワを表す。赤い点はその三角形の特定の頂点を表す。

ペアリング機構を持つフォロワ（青）で旋回を含む経路を走らせると、ペアリング部分が物体の旋回に従って回転し、トルクを解消した様子を確認できた。一方、ペアリングを装着していないフォロワ（白）は物体とセンサの間が滑ってしまい、柔軟なセンサ部分が常に同じ方向を向いていることを確認できた。

物体をロボットから外すと、リーダ（オレンジ）が初期速度に戻り、予定の進行方向に進み続けた。ペアリングを装着していないフォロワのロボット（白）も力を検知できなくなり、止まった。しかし、力がかかっていないにもかかわらず、ペアリングを装着したフォロワのロボット（青）がある方向に向かって走り続けた。これは、磁気粘性エラストマ部分に含まれる砂鉄が均等に分布しておらず、回ると最初のキャリブレーションが効かなくなるためであると考えられる。砂鉄の代わりマイクロ鉄を用いることで、より均等に分布している磁気粘性エラストマ部分を製作できると考えられる。また、柔軟接触センサの数を増やし、トルクを平面にある複数のベクトルを用いて推測できるようにすることで、トルクのかかる方向にロボットの姿勢を調節し、旋回経路に対応することができると考えられる。

3.3 多関節物体として 2 つの剛体を柔軟素材で連結した物体の協調搬送と評価

剛体を柔軟な棒で繋げた多関節物体の搬送を今回設計したリーダフォロワシステムで実現可能かどうかを検証した。

3.3.1 実験手順

多関節物体として、2 つのプラスチック製の箱を、TPU（弾力性と柔軟性を持つ樹脂材料）製の棒（3D プリンタを用いてプリントしたもの）で接続したものを用いる。それぞれの箱の下に三角形を成すように 3 台のロボットを配置し、進行方向に対して前方の箱の先頭にいる 1

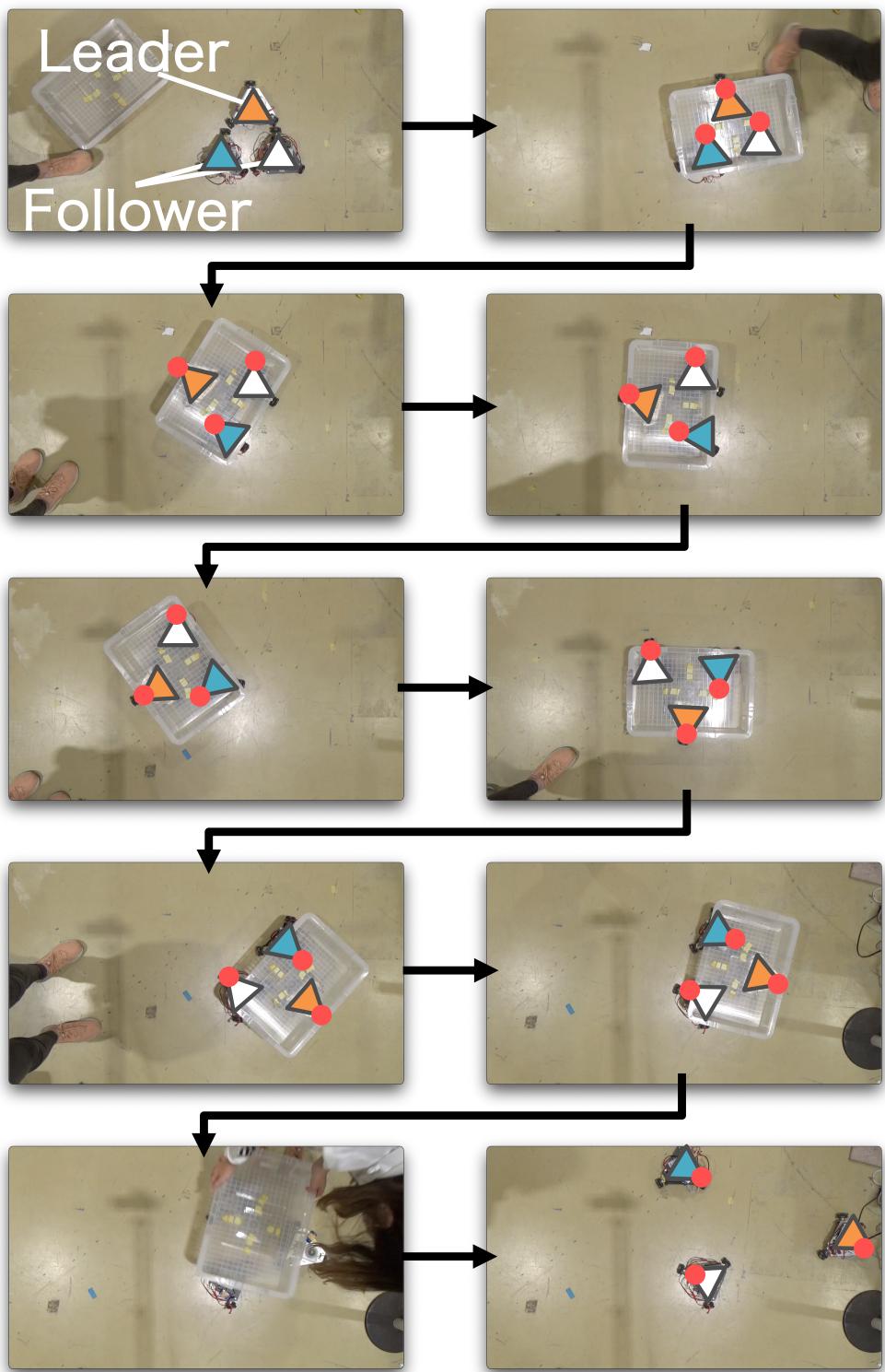


Fig. 3.6: Process of the cooperative transportation experiment with a plastic box using three robots

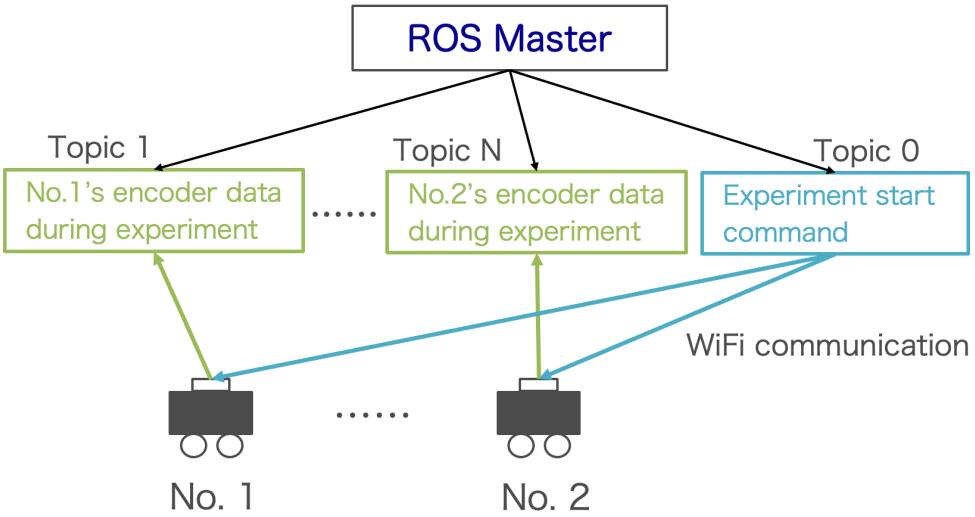


Fig. 3.7: Overview of the information collecting system using ROS

台のロボットをリーダとした。そして残り 5 台のロボットをフォロワとした。リーダにまずは直進し、その後に曲がるような経路を事前に与えた。

この実験以降では、ロボットの数が多くなったため、Bluetooth ではなく、それぞれのロボットの ESP32 に搭載している WiFi モジュールを用いて、それぞれのロボットの柔軟接触センサとエンコーダの情報を **Fig. 3.7** の様に ROS を通して集取した。ただし、ROS は実験の結果を解析するための情報集取のみに用いている。

3.3.2 実験結果と考察

実験の様子を **Fig. 3.8** に示す。 **Fig. 3.8** より、箱をつなげた多関節物体の協調搬送に成功したことが確認できる。リーダが直進する場合では、リーダの力が関節となる棒を通してリーダのいない箱に伝わり、予想通りに剛体の場合と同じように搬送できることが確認できた。リーダが曲がる場合、箱を柔軟な棒で繋げた多関節物体のダイナミクスがわからないにもかかわらず、フォロワは箱の動きを検知して物体に追従することができる。

3.4 ハーフサイズの人間模型の協調搬送実験と評価

人体を模倣した物体として、ハーフサイズの人間模型をリーダフォロワシステムで協調搬送することが可能かどうかを検証する。また、1 台のロボットが正常に機能しない場合にも群ロボットが協調搬送を達成できるかを検証する。さらに、物体が外乱を受けたり動いたりすると

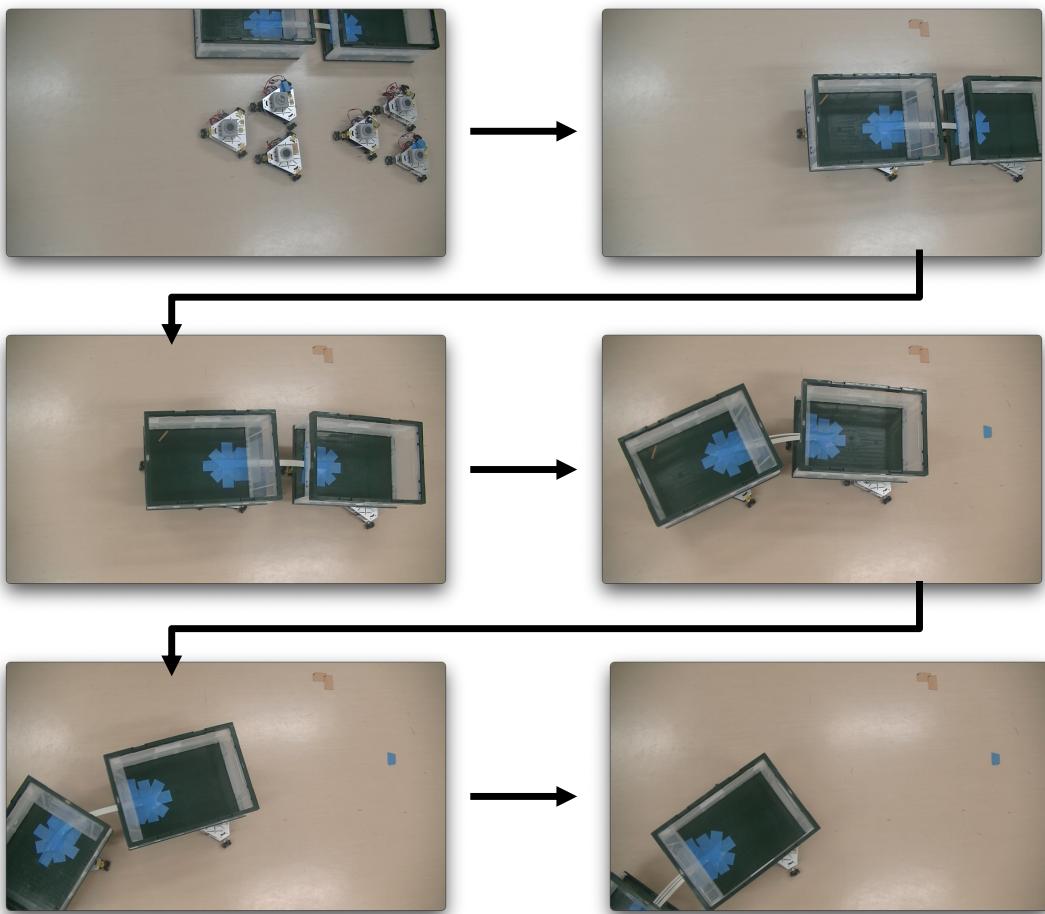


Fig. 3.8: Process of the cooperative transportation experiment with multi-joint-object which two plastic boxes are connected with a flexible stick printed using TPU

きも協調搬送を達成できるかを検証する。

3.4.1 実験手順

協調搬送

人間を模倣した物体の協調搬送において、人体骨格模型にある程度の柔らかさをもつ砂パックを重りとしてつけたものを搬送対象にした。4台のロボットをそれぞれ背中、腰と両足に配置し、協調搬送実験を行った。背中の下にリーダを配置し、他の3台のロボットはフォロワの役割とした。リーダには直進する経路を事前に与えている。

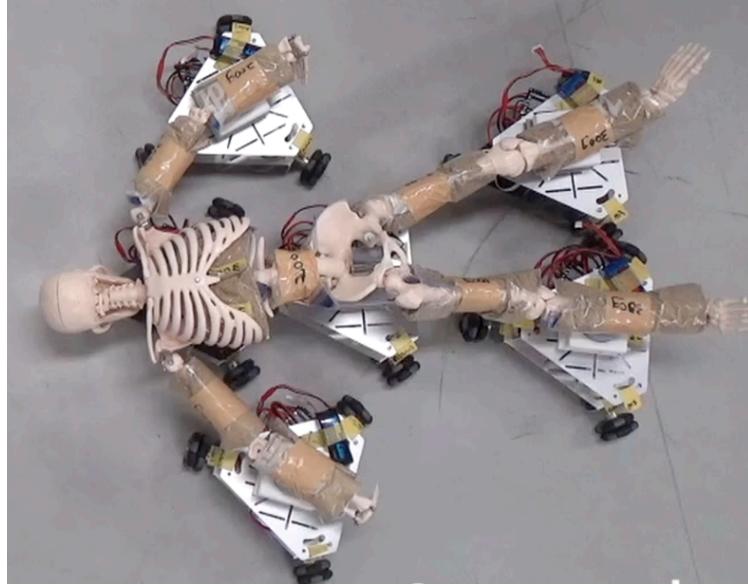


Fig. 3.9: Robots' positioning under the mannequin made with a skeleton model and sand packs

正常に機能しないロボットがいる場合の協調搬送

群ロボット中の1台のロボットがノイズを受けた場合に全体に与える影響を検証した。 **Fig. 3.9** のように6台のロボットをそれぞれ両手、背中、腰と両足に配置し、協調搬送実験を行った。背中の下にリーダを配置し、他のロボットはフォロワとして動く。正常に機能しないロボットがいる場合として、実験の際は右足の下に位置するロボットの柔軟な接触センサが回路の接触不良のケースとしている。

外乱がある場合の協調搬送

搬送中に外乱を加えた場合にロボットが追従できるかを検証する。前述の実験と同じように6台のロボットを用いて協調搬送を行う。背中の下にリーダを配置し、他のロボットはフォロワとして動く。人間模型の搬送実験中に、実験者が外から手足を動かして外乱を加える操作を行った。

3.4.2 実験結果と考察

協調搬送

実験中の様子を **Fig. 3.10** に示す。 **Fig. 3.10** より、集中制御やカメラのようなセンサを用いることなく、ロボット群が協調して搬送できることができた。また、各ロボットは常に人体の接触面に加える力を0とするように制御されているため、人体にかかる負担は少ないと考

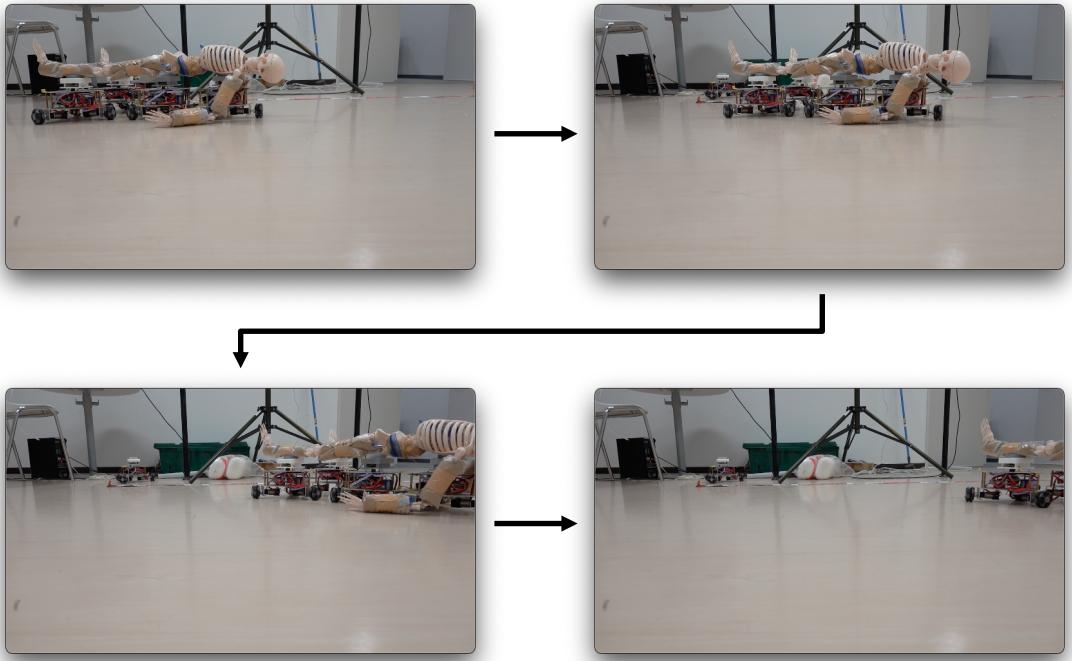


Fig. 3.10: Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin using four robots

えられる。

リーダには直進する入力を与えているにもかかわらず、ロボットと物体が全体的に右前方向に進む結果が得られた。今後はまず、搬送方向の制御が必要だと考えられる。現在のセンサシステムでは、物体の重心が偏っているのか、引っ張られているのか、識別ができない。これは**Fig. 3.11**のように、両者が同様のセンサ値を読み取ってしまうためだと考えられる。改善方法として、各ロボット上に物体の位置を調節できる機構を用いることが挙げられる。また、ロボットを小型にし、大量に用いて、全方向から物体を支えることで偏りを解消できると考えられる。

さらに、同じ実験を数回行った場合、搬送時に足がロボット上から落ちるケースや、最終的に人がロボット上から完全に落ちるケースも存在した。これは現在のロボット構造及び制御則が平面の範囲しか対応していないためである。剛体をつなげた多関節物体では搬送に問題はなかったが、人間模型は丸みを帯びるため、接触面積が少ないため、搬送が不安定になり、物体がロボットから落下する可能性がある。今後は柔軟接触センサの形状設計を改善し、接触センサの柔軟な部分が変形によって接触面積を増やすようロボットを改良していく予定である。

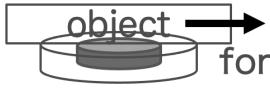
State of object and sensor		
Direction of force read by the sensor		

Fig. 3.11: Same sensor readings whether it is by the object being positioned biased or it is by the force exerted by the leader through the object

正常に機能しないロボットがいる場合の協調搬送

実験中の様子を **Fig. 3.12** に示す。正常に機能しないロボットが 1 台存在した場合においても、協調搬送が可能であることが確かめられた。これによってマルチロボットシステムにおけるロボットの故障に対する頑健性を示すことができる。

ただし、実験において最終的には全体的にバランスが取れず、物体が落ちるケースが多く見られた。これに対する解決策として、ロボットの不調を検出できるメカニズムを設計し、十分に早い時間に他のロボットが代わりになるシステムを提案していく予定である。

外乱がある場合の協調搬送

実験中の様子を **Fig. 3.13** に示す。ロボットが柔軟接触センサで対象物の移動を検知し、追従できることが確認できた。

今後は、ロボットの設計を再考し、z 軸の動きにも対応できるように、伸縮機構を加えるなどの対策を行うことで、三軸の外乱や物体の動きに追従することができると考えられる。

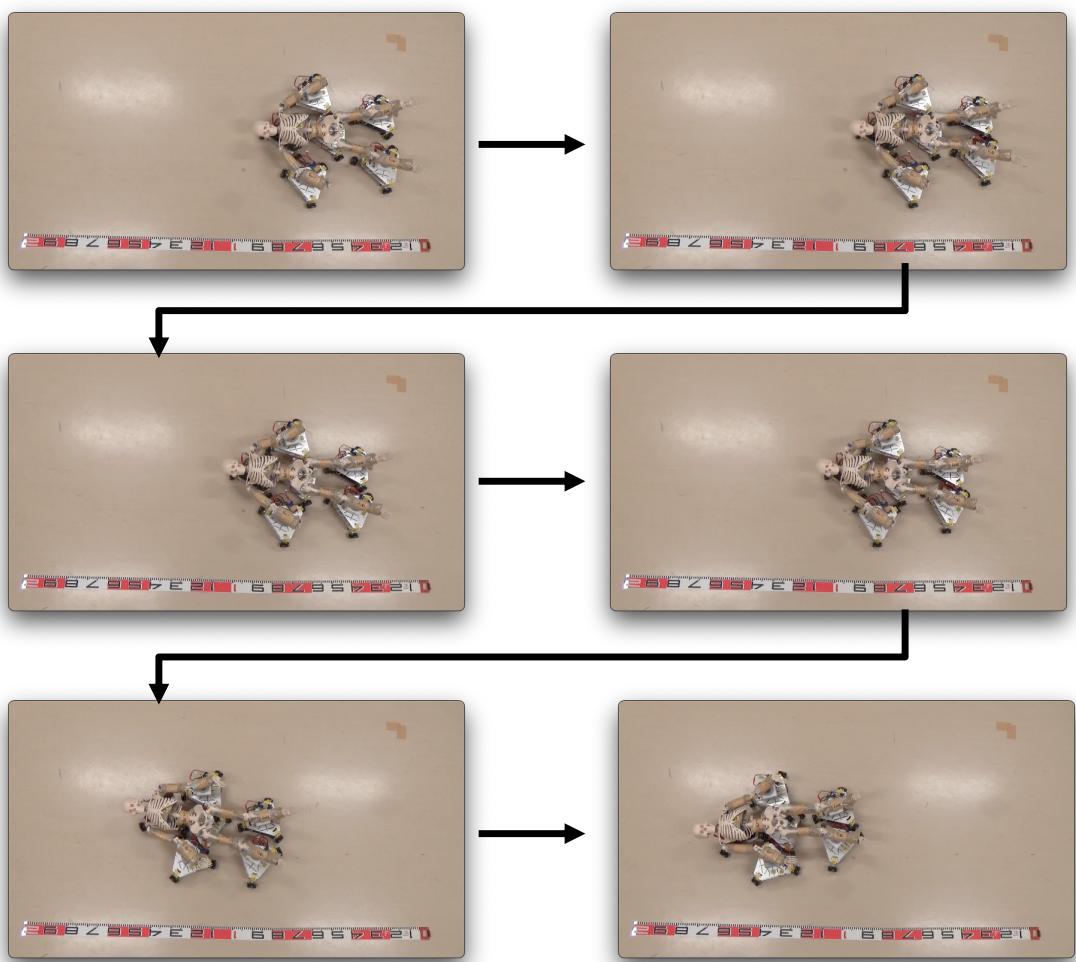


Fig. 3.12: Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin when there exists an unstable robot which receives noise in sensor reading

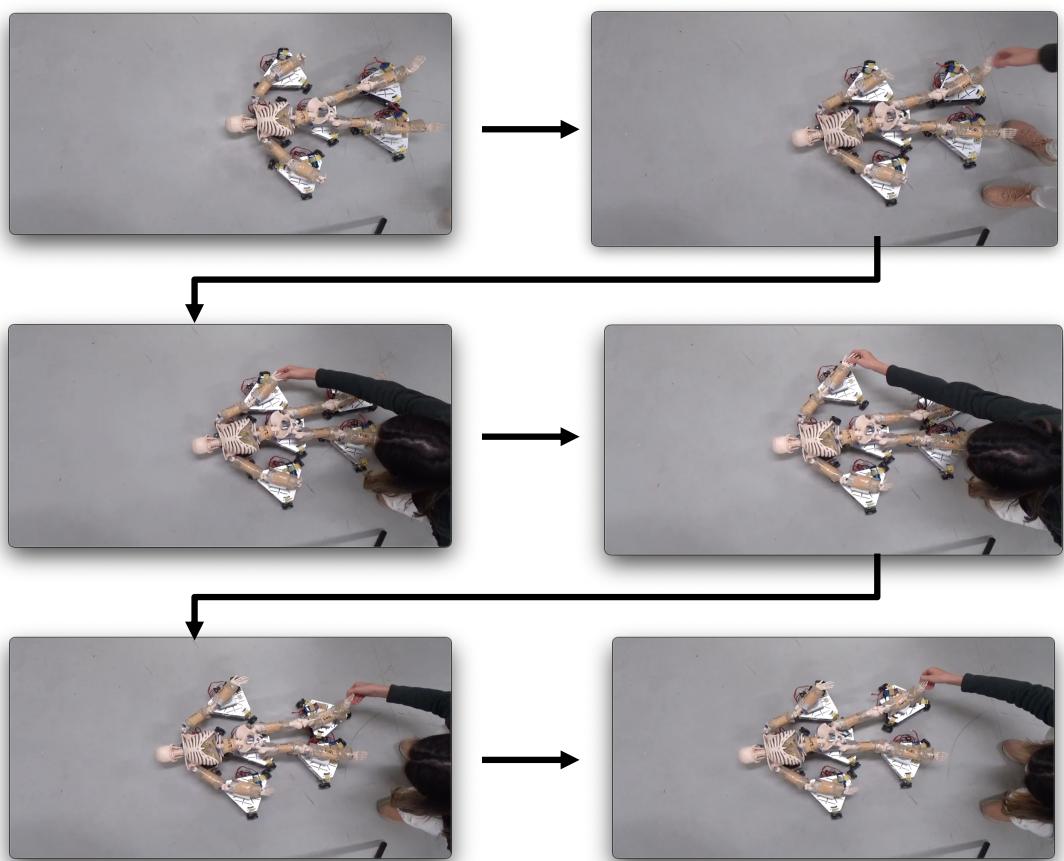


Fig. 3.13: Process of the cooperative transportation experiment with a mannequin when external force is applied to the mannequin

第4章 結言

本研究論文では、多様な物体、さらには多関節物体を協調搬送可能なロボットシステムの構築を目指し、柔軟触覚センサを搭載したロボットを製作し、力覚情報に基づく協調搬送システムを提案した。まず、移動ロボット上に固定した柔軟な接触センサにおいて、信頼性のある力覚情報を取得できることを確認した。また、剛体だけでなく、従来の研究には少ない多関節物体の運搬における協調搬送システムの妥当性を検証した。さらに、柔軟な表面をもつ人体模型の搬送を試み、人間のような柔軟かつ多関節な物体を群ロボットで災害現場において搬送するに当たって、システムやロボット構造に求められる改善を指摘した。

今後の研究では、センサ上の物体の重心の偏りにより生じる進行方向のずれに関する問題に対して、ロボットを小型化することで安定に運べるか検証する。また、凹凸のある形状や不整地に対応するために、ロボットが鉛直方向に対して調節できる機構を設計する。柔軟接触センサは鉛直方向の力を読み取ることができるため、搬送が安定になる値を目標値に設定し、ロボットの構造に対して、伸縮できる機構を加え、目標値に追従できるように機構と制御則を設計する予定である。さらに、重い物体を対象とする場合、1台のリーダでは物体を動かせないことがあるため、より多くのロボットをリーダとする方法による解決を目指し、複数のリーダの配置の最適化も行う予定である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，数多くの御助言，御提案，活発な議論をして頂いた大須賀公一教授，杉本靖博准教授，石原尚講師，末岡裕一郎助教，角田祐輔特任助教に心から感謝申し上げます。また研究を進める際に，大須賀・杉本研究室の皆様には数多くの御助言，御協力をいただきましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 萩原幸夫編集. 災害の辞書. 1992.
- [2] 首藤, 片山. 大地が震え海が怒る—自然災害はなくせるか. 1996.
- [3] 寒川旭. 揺れる大地—日本列島の地震史. 1997.
- [4] 京都大学防災研究所編. 地域防災計画の実務. 1997.
- [5] 橋本好弘. 消防隊員の勤務環境と心身負担に関する研究. 2009.
- [6] 大須賀公一. 災害対応に貢献するロボット技術とは? 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 215–219, 2020.
- [7] 松野文俊. レスキュー ロボット開発の現状と課題. pp. 27–34, 2009.
- [8] 浅間一. マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望. 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 428–432, 1992.
- [9] Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, and Marco Dorigo. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intell*, pp. 1–41, 2013.
- [10] 松野文俊. 群行動の理解と群ロボット研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 6, pp. 428–431, 2017.
- [11] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga, and Andrew Kahng. Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, Vol. 4, No. 1, pp. 7–27, 1997.
- [12] Melanie Schranz, Martina Umlauft, Micha Sende, and Wilfried Elmenreich. Swarm robotic behaviors and current applications. *Front. Robot. AI*, 2020.
- [13] Tuci E, Alkilabi MH, and Akanyeti O. Cooperative object transport in multi-robot systems: A review of the state-of-the-art. *Front. Robot. AI*, Vol. 5, No. 59, 2018.
- [14] Koichi Osuka and Shingo Isayama. Motion control of multi-linked stretcher robot ducks. In *Proceedings of SICE Annual Conference 2010*, pp. 873–874. IEEE, 2010.
- [15] 二谷啓允, 大須賀公一, 岩野優樹. 2a1-k05 レスキュー活動用担架構成連結ロボットの開発(特殊移動ロボット・メカトロニクス). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集

2007, pp. _2A1–K05_1. 一般社団法人 日本機械学会, 2007.

- [16] Kazuhiro Kosuge, Tomohiro Oosumi, and Kunihiko Chiba. Decentralized control of multiple mobile robots handling a single object in coordination. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 16, No. 1, pp. 87–95, 1998.
- [17] Hisashi Osumi, Hisashi Nojiri, Yasushi Kurabayashi, and Takashi Okazaki. Cooperative control for three mobile robots transporting a large object. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 19, No. 6, pp. 744–752, 2001.
- [18] Zijian Wang and Mac Schwager. Kinematic multi-robot manipulation with no communication using force feedback. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 427–432, 2016.
- [19] Zijian Wang, Guang Yang, Xuanshuo Su, and Mac Schwager. Ouijabots: Omnidirectional robots for cooperative object transport with rotation control using no communication. In *Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS)*, pp. 117–131, 2018.
- [20] Takumi Kawasetsu, Takato Horii, Hisashi Ishihara, and Minoru Asada. Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 14, pp. 5834–5841, July15 2018.