

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	協働リールユニット “ ReelBot ” によるエンドエフェクタ位置制御系の構築
Title(English)	End-effector Position Control System using the Cooperative Reel Unit “ ReelBot ”
著者(和文)	西村拓真, 遠藤玄
Authors(English)	Takuma Nishimura, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2025講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 6

協働リールユニット “ReelBot” によるエンドエフェクタ位置制御系の構築 End-effector Position Control System using the Cooperative Reel Unit “ReelBot”

○学 西村拓真 (東京科学大) 正 遠藤玄 (東京科学大)

Takuma NISHIMURA, Inst. of Science Tokyo, nishimura.t.ap@m.titech.ac.jp

Gen ENDO, Inst. of Science Tokyo

At disaster sites and steep slopes, transporting heavy objects is difficult without large machinery. This study focuses on ReelBot, a cooperative reel unit using a parallel wire mechanism. ReelBot's small reel robots wind and feed ropes to transport objects efficiently. To control its end-effector position, we experimentally derived the relationship between PWM duty ratio and rope speed. Using three ReelBots, we attempted end-effector movement on a standing tree. A 3D laser scanning system measured positions, and control was adjusted with tension data. The end-effector moved about 4 m, reaching within 0.30 m of the target.

Key Words: Cable driven parallel robot, Parallel wire mechanism, Heavy load transportation, Position control, Tension control

1 緒言

土砂災害の現場や急斜面で営まれる林業の現場では大型重機を使わずに重量物を運搬することが必要となる場面が存在する。この問題を解決するため、本研究ではパラレルワイヤ機構に着目する。このロボットは、複数本のワイヤをリールで巻き取ることでワイヤ先端のエンドエフェクタ位置を制御し、重量物を搬送することが可能である。この機構の特徴は、複数台のロボットを協調して動作させることで、重量物を運搬するために必要な個々のロボットの牽引力を軽減できる点である。また、1つのロボットの質量も抑えられる。このため、地形の制約が大きい状況でも臨機応変な設置や運用が可能である。先行研究において、パラレルワイヤ機構を用いた様々な応用例が存在する。たとえば、倉庫内での効率的な物品搬送を目指した Fastkit[1] や、惑星探査を想定したパラレルワイヤロボット [2], 災害対応用の軽量瓦礫撤去ユニット [3] などがある。これらの研究は、それぞれの用途に特化して一定の成果を上げているものの、設置場所の臨機応変さや重量物搬送能力に関する課題がまだ残されている。

本研究では、広範囲な作業環境に対応可能な新たな協働リールユニット「ReelBot」の開発を行っている。ReelBot の概念図を図 1 に示す。先行研究として島津ら [4] は ReelBot を設計する際、フロントディファレンシャル型のトルクセンサを構成することで、ロープの張力計測を可能にした。そして、ReelBot 3 台を木に取り付け、それぞれのロープの先端を伸ばし、つなげた先端をエンドエフェクタの装着点とした。その後、この部分に重りを取り付け、ReelBot のロープの巻き取り操作を行うことで、130 kg の物体のけん引に成功している。

ReelBot のエンドエフェクタ制御方式としては今後、ReelBot の位置を厳密に把握せず、エンドエフェクタの現在位置と目標位置のみで制御していくことを検討中である。具体的にはビジュアルフィードバック制御およびロープの張力制御によって、ReelBot のロープの巻き取り/繰り出しの制御を行い、エンドエフェクタの制御をしていくことを想定している。しかしながら先行研究 [4] では ReelBot の位置を既知とした場合においても ReelBot のエンドエフェクタ位置制御が実現されていない。そこで本研究では、ReelBot の位置を既知とした場合において車載用の廉価なウィンチでエンドエフェクタの位置制御を行うことが可能であるか検証することを目的とする。

2 ReelBot の構造と運用方式

ReelBot を図 2 に示す。ReelBot の質量は 7.0 kg であり、人間やドローンで持ち運びできる程度の重さとなっている。ウィンチ機構にはオフロードカー車載用の電動ウィンチ (Keeper : KT3000) が使用されている。このウィンチは 1 台 6 万円と安価である。このウィンチにはもともと金属ワイヤ (長さ約 13 m, 質量約 1.4 kg) がリールに巻かれていたが、これを化学繊維ロープの $\phi 2$ mm テクノラロープ (長さ約 100 m, 質量約 0.3 kg)

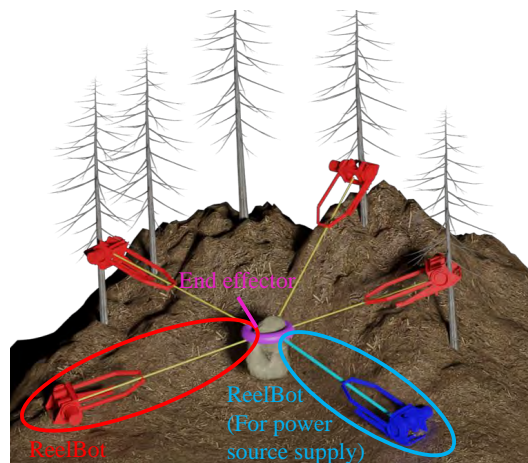


Fig.1: Conceptual diagram of ReelBot.

に変更することで、最大ロープ長を拡張しつつ、全体の質量を軽量化している。ロープにかかる張力の測定には、広瀬ら [5] が提案したフロントディファレンシャル型トルクセンサを採用している。図 3 に ReelBot を横から見た際の機構を簡易的に示す。ウィンチのリール機構はリール回転軸中心に受動回転できるように複数のベアリングで支える構造になっている。ロープに張力 T [N] が働くとリールの軸に力がトルクとして伝達される。リール軸回りにトルクが生じ、図 3 の青い梁の部分ロードセル (株式会社 エー・アンド・デイ : LCCU21-KN001) を押し上げることで、抗力 F [N] としてロードセルに伝達される。ロードセルにおける測定値は USB ケーブルを介して PC に送信される。ここで、張力 T [N] は図 3 の r [mm], l [mm], およびロードセルにおける抗力 F [N] を用いて、以下の式で求められる。

$$T = \frac{l}{r} F \quad (1)$$

図 4 に ReelBot の制御系の概略図を示す。ReelBot のウィンチは DC モーターを用いており、メカニカルリレーを介して電源装置を接続することで駆動する。ウィンチの回転速度は、メカニカルリレーの ON/OFF を切り替えることで調整され、この ON/OFF 操作はマイコンから出力される PWM 信号の Duty 比によって制御される。この制御方式により、ウィンチの回転速度を細かく調整し、ロープの巻き取り速度および繰り出し速度を制御することが可能である。



Fig.2: Photograph of the ReelBot

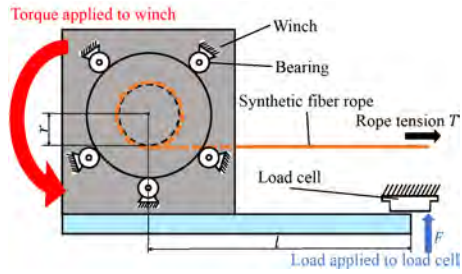


Fig.3: Mechanism of the torque sensor

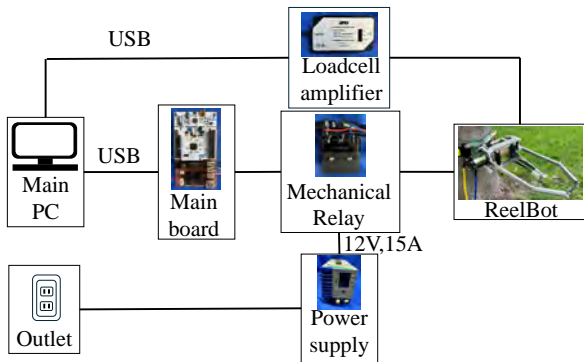


Fig.4: Schematic diagram of ReelBot electrical connection

3 ReelBot 巻き取り速度の較正実験

ReelBot のエンドエフェクタの位置制御を行うにはマイコンから送る PWM 制御の Duty 比と ReelBot のロープ巻き取り速度の関係を明らかにする必要がある。本実験で得たデータから、この関係が線形であるか否かを調べ、線形でない場合には多項式近似関数を算出することを目指した。また、本実験では巻き取り速度の再現性を同時に検証した。

まず、図 5 のような測定装置を作り、ReelBot をアルミフレームに固定した。そして、ReelBot のロープをプーリに巻き掛け、ロープに一定張力を付加するため先端に 5 kg の重りを取り付けた。ロープの途中に印をつけ、その点を定規の 0 の位置に合わせた。その後、Duty 比を一定の状態で行う。ReelBot には安定化電源を用いて、12 V、15 A で電力を供給した。また、PWM 信号の周期を 200 ms とした。ロープ巻き取り時に印の位置変化を 50 mm ごとに目視で確認し、その際の時刻を計測した。ここで、電源供給の開始時刻を 0 s とした。この実験を Duty 比 0.1 刻みで Duty 比 0.1 から 1.0 までそれぞれ 3 回ずつ実験を行った。

計測結果をもとに計算した平均移動速度を図 6 に示す。図 6 に示す速度は、Duty 比 0.1 から 0.8 については印が 300mm 移動する間の平均移動速度、Duty 0.9、1.0 については印が 500mm 移動する間の平均移動速度である。Duty 比 0.1 を除いたいずれ

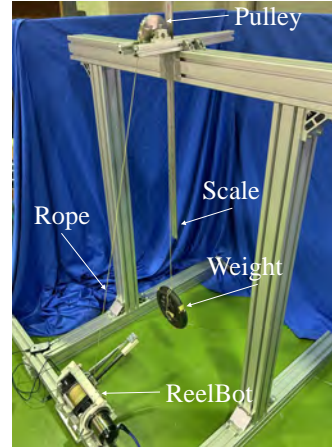


Fig.5: Experimental setup for measuring winding speed.

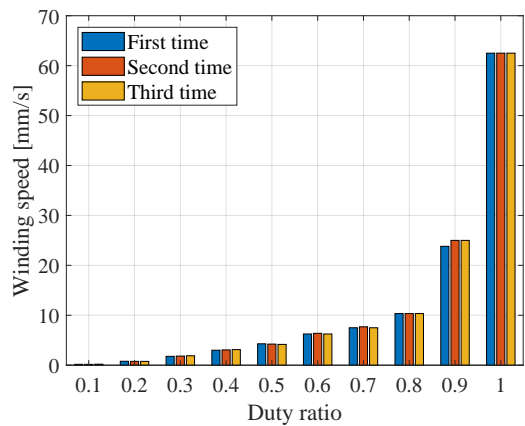


Fig.6: Average winding speed from experiments 1, 2, and 3.

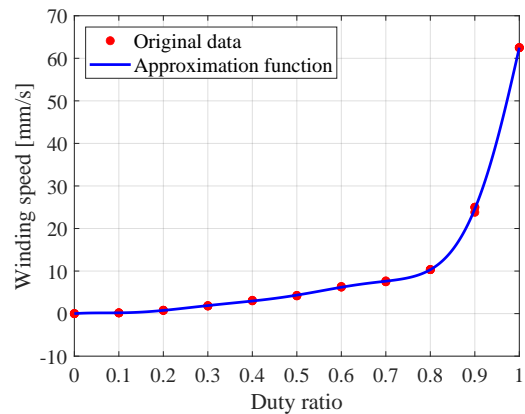


Fig.7: Graph of the approximation function based on the results from Fig.6

の Duty 比も速度の相対誤差が 5 % 以内に収まっており、Duty 比 0.1 に関しても 10 % ほどとなっている。これより、巻き取り速度は試行回数に依存せず、再現性があると考えられる。

この実験により得られたデータを利用して、Duty 比と速度の関係の近似関数を求めた。次章以降の実験で巻き取り速度のより精密な制御を目指すため、近似関数を利用し、得られなかったデータ点を補完した。今回は MATLAB の fit 関数の機能を利用

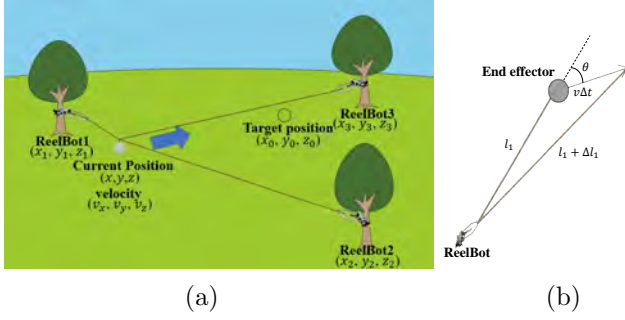


Fig.8: (a) Diagram showing how the coordinates of the ReelBots determine the velocity of the end effector.(b) Schematic illustrating the amount of rope extension Δl_1 by ReelBot 1 during a small time interval Δt .

し、最小二乗法によって多項式近似関数を求めた。関数が 0 から 1.0 の間で単調増加していること、決定係数 (R^2) が 0.5 以上であることを条件に近似を行ったところ、図 7 のような近似曲線が得られた。この多項式を式 (2) に示す。

$$y = -1.93 \times 10^4 x^9 + 7.14 \times 10^4 x^8 - 1.04 \times 10^5 x^7 + 7.57 \times 10^4 x^6 - 2.78 \times 10^4 x^5 + 4.10 \times 10^3 x^4 + 2.20 \times 10^2 x^3 - 9.38 \times 10^1 x^2 + 7.05 x \quad (2)$$

次章以降では、この Duty 比と巻き取り速度の関係を使用することによって、ReelBot のエンドエフェクタの位置制御を行う。

4 ReelBot3 台を用いた物体の運搬実験

4.1 各 ReelBot への速度指令値の算出

ReelBot3 台の実験に先立ち、各 ReelBot の速度指令値を算出した。ReelBot3 台の実験の概要図を図 8(a) に示す。3 台の ReelBot の名称をそれぞれ ReelBot1, 2, 3 とする。それぞれの位置座標を (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) とする。また、エンドエフェクタの現在位置を (x, y, z) 、目標位置を (x_0, y_0, z_0) とした。また、エンドエフェクタの速さを $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ とベクトル量で表す。エンドエフェクタの速度ベクトル \mathbf{v} は、目標位置への単位ベクトル \hat{v} に速さ v を乗じたものであり、エンドエフェクタの速さを定めれば、エンドエフェクタの速度ベクトルは求まる。

次にエンドエフェクタの速度ベクトルが決まったとして、各 ReelBot の巻き取り／繰り出し速度を定める。ReelBot の繰り出し方向を正、巻き取り方向を負として、ReelBot の巻き取り／繰り出し速度をそれぞれ v_1, v_2, v_3 [m/s] とする。また、ReelBot1, 2, 3 からエンドエフェクタの方向に伸びるロープの長さをそれぞれ l_1, l_2, l_3 [m] とする。また、各 ReelBot から見たエンドエフェクタの方向ベクトルを $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3$ とする。まず、ReelBot1 について考える。図 8(b) のように進んだ場合、 $l_1 + \Delta l_1$ の Δl_1 の部分が微小時間 Δt [s] の間にロープの繰り出し方向に進んだ距離となる。余弦定理を考えるとともに、ロープの長さ l_1 [m] が微小時間にエンドエフェクタが進む長さ $v\Delta t$ に比べて十分大きいことを用いて近似を行うと、以下の式が得られる。

$$l_1 + \Delta l_1 = \sqrt{l_1^2 + (v\Delta t)^2 - 2l_1v\Delta t \cos(\pi - \theta)} \approx l_1(1 + v\Delta t \cos \theta) \quad (3)$$

よって、ReelBot1 の巻き取り／繰り出し速度 v_1 [m/s] は以下のようになる。

$$v_1 = \Delta l_1 / \Delta t = v \cos \theta \quad (4)$$

すなわち、ReelBot1 からエンドエフェクタ方向に伸ばした単位ベクトルと、エンドエフェクタの速度ベクトルの内積が ReelBot1

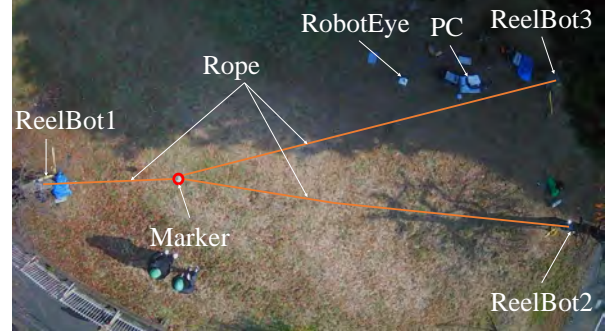


Fig.9: Aerial view of the experiment with three ReelBots

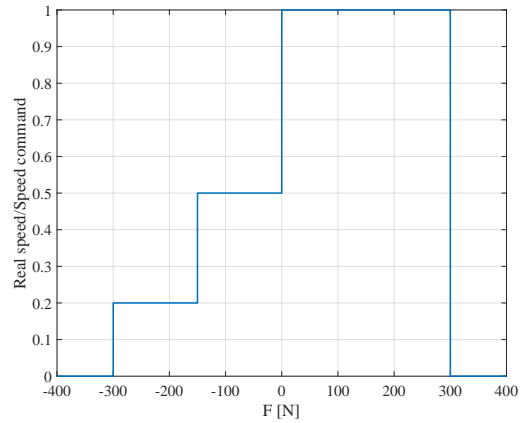


Fig.10: Relationship between actual feed speed command and tension

の繰り出し、巻き取り方向の速度ということになる。よって、各 ReelBot の繰り出し、巻き取り速度はそれぞれ以下の式で表せる。

$$\begin{cases} v_1 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}_1 / l_1 \\ v_2 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}_2 / l_2 \\ v_3 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}_3 / l_3 \end{cases} \quad (5)$$

以上から、各 ReelBot の巻き取り／繰り出しの速度指令値を算出することができた。

4.2 実験

前節を踏まえて ReelBot3 台による実験を行った。ReelBot3 台を木に取り付けて、3つのロープの先端のエンドエフェクタの位置に重りと基準球を取り付けた。それぞれの ReelBot には安定化電源から 12 V, 15 A で電力供給している。制御信号の送信およびロードセルの値の取得は有線接続で行った。今回の実験では、3D レーザースキャンシステム (フューチャーアイリス株式会社: RobotEye RE05) を使用した。RobotEye から赤外線レーザー (波長: 905 nm) が発射されてから対象物で反射し、戻ってくるまでの時間をもとに、RobotEye は対象物との距離を測定することができる。また、RobotEye は物体から反射された赤外線の方法も同時に測定することができる。これより、物体を 3次元空間上の座標で表すことができる。図 9 にこの実験全体を上空から撮影した写真を示す。マーカの速度ベクトルを決定するために、まず、ReelBot1, 2, 3 の位置と目標位置にマーカとなる基準球を設置し、RobotEye を用いてそれぞれの位置を測定した。

次に重りの運搬を行う。 d [m] をマーカの現在の座標から目標位置までの距離として、マーカの速さを以下の式のように設定した。

$$v \text{ [m/s]} = \begin{cases} 0.060 & d > 1 \\ d \cdot 0.060 & d \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

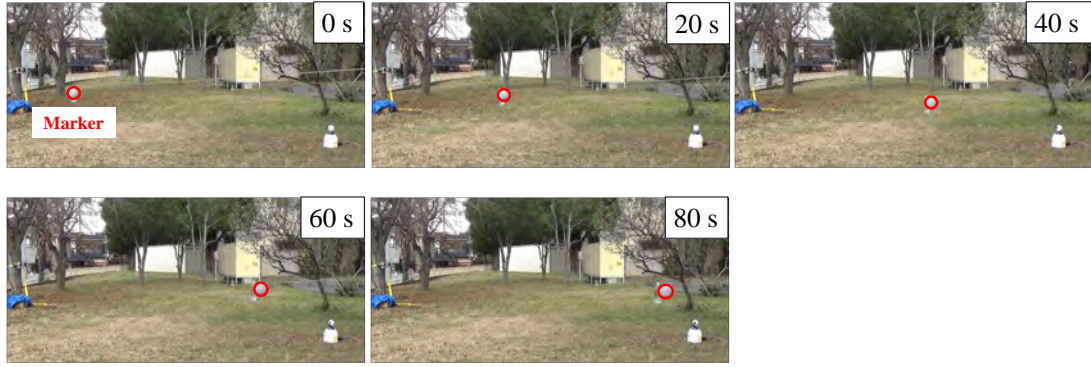


Fig.11: Snapshots of the experiment of transporting the marker using three ReelBots

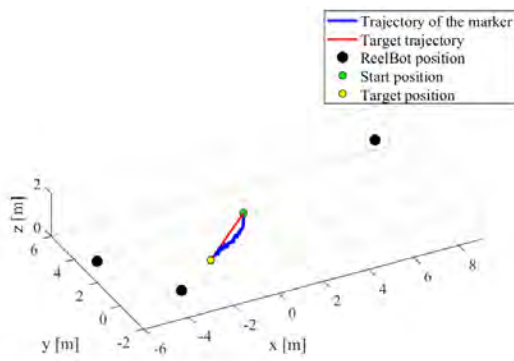


Fig.12: Trajectory of the marker and the positions of the ReelBots.

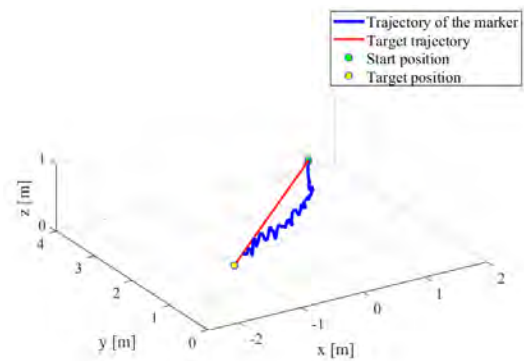


Fig.13: Trajectory of the marker in the experiment using three ReelBots.

また、マーカが目標位置の座標に誤差なく到達することは困難であると判断し、目標位置から 0.30 m 以内に入った段階で運搬完了とした。

実験における繰り出し速度の指令値を図 10 に示す。ここで、図 10 において F [N] は 3 本のロープにおける張力の大きさの合計値である。張力が大きくなった際に繰り出し速度を大きくし、張力が下がった際に繰り出し速度を小さくするよう実験的に適切な速度指令値を決定する。図 10 の縦軸に速度指令値から算出値を割ったものを示す。

以上の条件のもと、運搬の実験を行った。マーカの初期座標が (1.3, 3.6, 0.36) から運搬を開始させ、目標位置を (-1.6, 0.80, 0.46) としてエンドエフェクタの位置の移動を試みた。この実験中の経過の写真を図 11 に示す。マーカの通過地点の座標をプロットし、MATLAB の spline 機能により補完したものを図 13,12 に示す。実験は 75 s ほどで目標位置から 0.30 m 以内に入り終了した。物体の運搬距離は約 4 m である。

実験開始から終了までは直線の距離は常に 0.40 m 以内に収めることができた。物体の目標位置への運搬という目的において実用上十分であると考えられる。

5 結言

本稿では、協働リールユニット「ReelBot」について、エンドエフェクタの位置制御を行うことを目的とした。位置制御手法の構築にあたり、まず PWM 信号の Duty 比と ReelBot の巻き取り速度との関係を調べた。その結果をもとに、3 台の ReelBot を協調させたエンドエフェクタの位置制御実験を行った。平面上の作業領域においてマーカを移動させ、マーカを目標位置の周囲 0.30 m の範囲まで到達させることに成功した。

参考文献

- [1] Pedemonte, N., Rasheed, T., Marquez-Gamez, D., Long, P., Hocquard, É., Babin, F., Fouché, C., Caverot, G., Girin, A., Caro, S., Fastkit: A mobile cable-driven parallel robot for logistics, *Advances in Robotics Research: From Lab to Market*, Springer, (2020), pp. 141–163.
- [2] STEFANO Seriani, PAOLO Gallina, and A Wedler, A modular cable robot for inspection and light manipulation on celestial bodies, *Acta Astronautica*, Vol. 123, pp. 145–153, (2016).
- [3] Tadokoro, S., Verhoeven, R., Hiller, M., Takamori, T., A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes and an identification algorithm for the installation in unstructured environments, *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*, Vol. 2, (1999), pp. 1222–1227 vol.2.
- [4] 島津裕貴, 遠藤玄, 化学繊維ロープを用いた協働リールユニットの開発, *東京工業大学工学院機械コース修士論文* (2023).
- [5] 広瀬茂男, 加藤恵輔, フロートディファレンシャル型トルクセンサの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, (1998), 1C12-6.