

# 作業空間拡張機能を有するロボットハンドの開発

○石川 素晴（金沢大） 西村 斉寛（金沢大） 渡辺 哲陽（金沢大）

挿入入口が小さい狭隘空間での作業では、物体把持動作のみならず、作業空間を広げる空間拡張動作が必要となる。本研究では、これら二動作を単一アクチュエータで実現するロボットハンドを提案する。

## 1. 緒言

本研究では 1 自由度で把持と作業空間の拡張を可能なロボットハンドの開発を行う。実世界では巾着袋から小物を取り出すことや、文房具入れからペンを取り出すなど何かしらの入れ物に入れられた物体を取り出すタスクが多い。人間がこのようなタスクを行う場合、入れ物の口を開くことで、作業空間を拡張し空間を安定化させタスクを行う。したがって、作業空間の拡張は安定な作業を実現するために効果的である。これまでに狭隘空間内で作業することが可能なロボットハンドの研究は進められている。Nishimura らは狭隘空間内で把持することが可能なロボットハンドの開発を行った[1]。しかし、片手かつ低自由度で作業空間を拡張し、作業を行うことが可能なロボットハンドは我々が知る限り存在しない。巾着袋やジッパーバッグなど入れ物の開き幅が狭隘かつ柔軟な容器に入っている対象物を取り出す作業などには図 1 に示すように口を開き作業空間を拡張した上で対象物を取り出す必要がある。複数のモードを低自由度で実現するためには負荷に応じて動作が切り替わる機構を用いることが効果的である。[2]、[3]

本研究では把持機能と空間拡張機能の両立を実現するハンドを提案する。直行する 2 方向に対して並進運動を実現する機構を Nishimura らが開発した回並進運動と回転運動を切り替えることを可能とする T/R 切替機構[2]を応用して実現する。

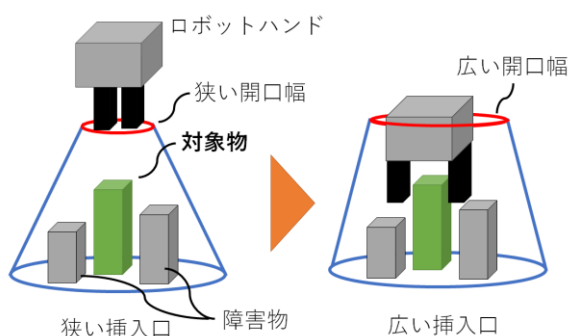


図 1 作業空間拡張のイメージ

## 2. ハンド設計

### 2.1 機能要件

- (1)作業空間拡張機能を有する
- (2)物体把持と空間安定化を両立する
- (3)1つのモータで駆動する

### 2.2 ハンド概要

図 2 に本研究で開発したロボットハンドの構造を示す。ハンドは固定ユニットと並進ユニットで分かれている。固定ユニットはモータ、ギア 1,2、ベース、スプロケット 1、内ハンドの指 A で構成される。並進ユニットはストッパ、ラダーチェーン、スプロケット 2,3、内ハンドの指 B、外ハンド、予圧器を有している。空間拡張時、内ハンドの指 A は固定ユニットに対し静止し、並進ユニットの外ハンドが開く。それに対して、物体把持時、内ハンドの指 B は固定ユニット内ハンドの指 A に対して並進運動を行い内ハンドで物体把持を行う。本ハンドではスプロケット 2,3 とラダーチェーンの連動する構造を開閉部切替機構とする。開閉部切替機構のスプロケット 2,3 とラダーチェーンの動きの関係によって内外のハンドのどちらかが動くかを切り替えることを可能とする。スプロケット 2 には両端にテーパが切られており、予圧器が搭載される。予圧器はスプロケット 2 とラダーチェーンの回転を妨げるように圧力が加えられている。これによりスプロケット 3 の回転も抑制される。予圧器を調節することで動作を切り替えるのに必要なモータのトルクを決定できる。詳しくは 3 章にて述べる。スプロケット 3 は左右で送りネジ方向が異なる両端ネジが一体化した構造になっている。内ハンドまたはストッパに負荷が小さいとモータの回転はギア 1,2、スプロケット 1 に伝達され、開閉部切替機構は  $x_A$  軸方向に対して並進運動（物体把持動作）を行う。内ハンドまたはストッパの負荷が大きくなると、開閉部切替機構内のラダーチェーンが回転し、スプロケット 2,3 に回転が伝達される。するとスプロケット 3 はラダーチェーンに対し回転するため、キャリアに推力が伝達され、外ハンドが  $y_A$  軸方向に対して並進運動（作業空間拡張動作）を行う。

### 2.3 外ハンド

外ハンドは外ハンドベース、指 1~4、キャリア、外

ハンドガイド, リニアレール, ブロック, 圧縮バネ, バネガイド, 両端送りネジ (スプロケット 3) で構成される. 圧縮バネは常にブロックに対してハンド内向きに保持力を発揮するよう設置した. 開閉部切替機構スプロケット 3 が回転する時に外ハンド並進部は動く. まず, モータの回転がスプロケット 3 まで伝達されラダーチェーンに対して回転を行うと各キャリアが $y_A$ 軸方向に対して並進運動を行う. キャリアはレール 1~3 により滑り対偶のみが許されている. キャリアが並進運動を行うと, 各ブロックが外ハンドガイドに沿って開く.

## 2.4 ハンド動作

表 1 にモータの回転と内外ハンドの動作の関係をまとめた. ハンドの動作はモータの回転方向と内ハンドの開閉の状態異なる. まずモータを順回転させた場合の時を考える. この時, 内ハンドが完全に閉じている場合, 外ハンドが開く. 反対にそれ以外の状態では内ハンドが開く. 次にモータを逆回転させた場合の時を考える. この時, 内ハンドが完全に開いている場合, 外ハンドは閉じる. 反対にそれ以外の状態では内ハンドが開く.

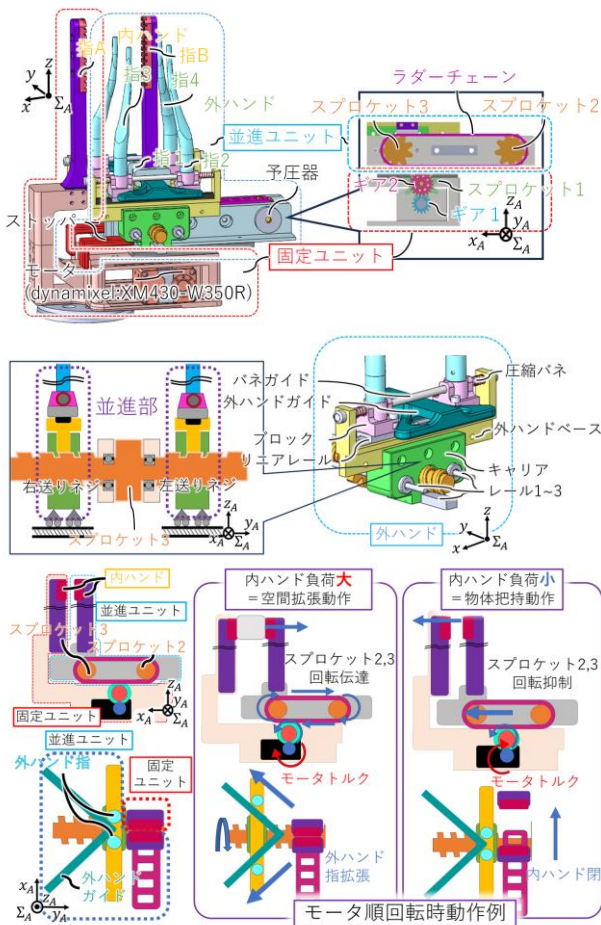


図2 ロボットハンド構造

モータ回転方向	条件	動作
順転	内ハンド Full close	外ハンド開
	上記以外	内ハンド閉
逆転	内ハンド Full open	外ハンド閉
	上記以外	内ハンド開

## 3. 把持・作業空間拡張制御

### 3.1. 開閉部切替機構

本節では把持動作と空間拡張動作の切り替えが起こる原理を説明する. 図 3 に自動動作切り替え機構に掛かる力学の関係図を示す. まず, モータからの入力トルクを $\tau_m$ とし, ピッチ半径 $r_1$ のギア 1, を介してピッチ半径 $r_2$ のギア 2 に入力トルク $\tau_{in}$ を加えたとすると,  $\tau_{in}$ は次式(1)で表される.

$$\tau_{in} = \frac{r_1 \tau_m}{r_2} \quad (1)$$

トルクのつり合いより, スプロケット 1 に伝わるトルクは, 次式(2)で表される.

$$\tau_{in} = \tau_{sp1} \quad (2)$$

スプロケット 1 のピッチ半径を $r_{sp1}$ とすると, ラダーチェーンに伝達される力 $f_{lad}$ は次式(3)で表現される.

$$f_{lad} = \frac{\tau_{sp1}}{r_{sp1}} \quad (3)$$

この時, スプロケット 2 に伝達されるトルク $\tau_{sp2}$ は次式(4)で表される.

$$\tau_{sp2} = f_{lad} r_{sp2} - \tau_{pre} \quad (4)$$

ここで $r_{sp2}$ はスプロケット 2 のピッチ半径で $\tau_{pre}$ は予圧器による摩擦トルクである. 次に摩擦トルク $\tau_{pre}$ を導出する. ボルトの締結力を $f_{bolt}$ とし, 予圧器が内ハンドと外径 $D_1$ , 内径 $D_2$ で接触すると考えると垂直応力 $\sigma_{pre}$ は次式(5)で表される.

$$\sigma_{pre} = \frac{4f_{bolt}}{\pi(D_1^2 - D_2^2)} \quad (5)$$

一般的に微小領域で発生するトルク $dT$ は中心からの半径を $r$ , その半径にかかる円周方向の力を $df$ とすると次式(6)で表される.

$$dT = r df \quad (6)$$

摩擦トルクにおいて $df$ は摩擦力であるため, 摩擦係数を $\mu$ とすると次式(7)で表すことができる

$$df = \mu \sigma_{pre} dS \quad (7)$$

ここで $dS$ は微小領域における接触面積である.

式(6),(7)より全体の摩擦トルク $\tau_{pre}$ は次式(8)で表される.

$$\begin{aligned}\tau_{pre} &= \int_{\frac{D_2}{2}}^{\frac{D_1}{2}} \int_0^{2\pi} \mu \sigma_{pre} r^2 d\theta dr \\ &= \frac{\pi(D_1^3 - D_2^3)}{12} \mu \sigma_{pre}\end{aligned}\quad (8)$$

式(5), (8)より次式(9)が得られる.

$$\tau_{pre} = \frac{(D_1^3 - D_2^3)}{3(D_1^2 - D_2^2)} \mu f_{bolt}\quad (9)$$

ゆえに, 式(4),(9)よりスプロケット2に伝達されるトルク $\tau_{sp2}$ は予圧器の締結力 $f_{bolt}$ を調節することで増減する摩擦トルク $\tau_{pre}$ に影響される.

また物体把持時にかかる指先力 $f_{grasp}$ は次式(10)である.

$$f_{lad} = f_{grasp}\quad (10)$$

従ってスプロケット2に掛かる予圧より開閉部切替機構の動作が変わるタイミング及び把持力を調節できる. 図4に予圧の有無による把持力の変化を示す.

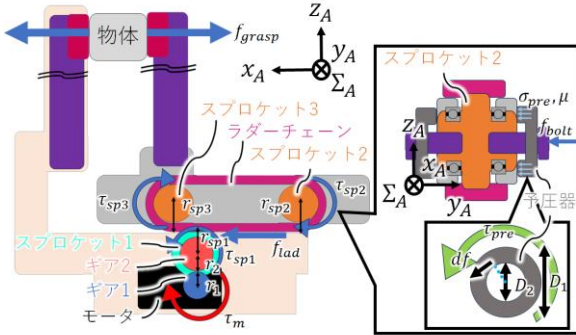


図3 自動動作切り替え機構にかかる力

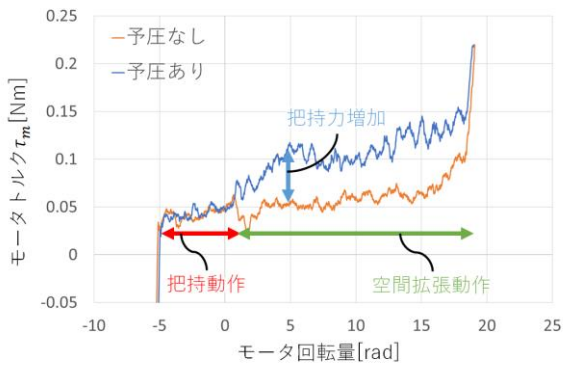


図4 予圧器の効果

### 3.2. 外ハンド開閉の力学

本節では外ハンドの開閉時に掛かる力学について説明する. 図5に外ハンドにかかる力の関係を示す. 外ハンドは $x_A$ 軸に対して対象的である. そのため, 以下では外ハンド片側の力の関係について考える. スプロケット3がラダーチェーンに対して回転するとスプロケット3の両端ネジにモータの動力が伝えられ, キャリアを押す推力 $f_{sh}$ が発生する. この時に

外ハンドの指1,2にかかる作業空間拡張力 $f_{out1}, f_{out2}$ を導出する. 微小領域におけるスプロケット3の雄ねじとキャリアの雌ネジの接触面について考える. すると接触面には法線力 $df_n$ と摩擦力 $df_{fri}$ が働く. 雄ネジと雌ネジのリード角 $\theta_{th}$ , 接触面積 $S1$ とすると, 法線力 $f_n$ , 接線力 $f_{fri}$ は次式(11)で表される.

$$f_n = \int_{S1} df_n, f_{fri} = \int_{S1} df_{fri}\quad (11)$$

この時,  $f_{sh}$ は次式(12)で表される.

$$f_{sh} = f_n \cos \theta_{th} - f_{fri} \sin \theta_{th}\quad (12)$$

外ハンドの指に働く圧縮バネの力 $f_{sp}$ はバネ定数を $k$ , 縮み幅を $l_{sp}$ とすると次式(13)で表される.

$$f_{sp} = kl_{sp}\quad (13)$$

外ハンドガイドのレールが両端ネジとなす角を $\theta_{rail1}, \theta_{rail2}$ とすると外ハンドの指1,2にかかる力 $f_{out1}, f_{out2}$ を用いて力のつり合いは次式(14)で表される.

$$f_{sh} = (f_{out1} - f_{sp} \sin \theta_{rail1}) \cos \theta_{rail1} + (f_{out2} - f_{sp} \sin \theta_{rail2}) \cos \theta_{rail2}\quad (14)$$

よって推進力により, 外ハンドの指にかかる拡張力が導出される.

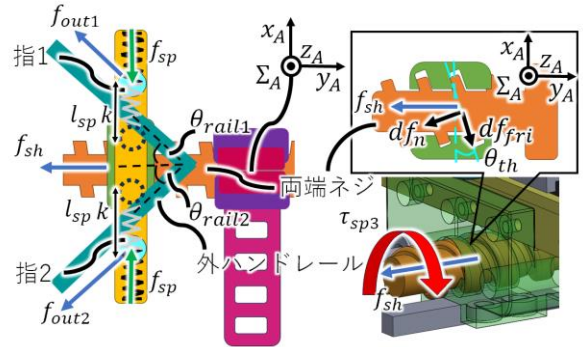


図5 外ハンドにかかる力

## 4. 実験

6自由度マニピュレータ(UR5)に開発したロボットハンドを取り付け作業空間拡張実験と把持実験を行う.

### 4.1. 作業空間拡張実験

図6に作業空間拡張実験の様子を示す. まず, 巾着袋には両ハンドが閉じた状態の挿入幅のみを与え作業台の上に設置する. マニピュレータを用いてハンドの指先を巾着袋の入口に挿入する. 挿入後モータを順回転運動させ空間拡張動作を行う. 開発したハンドで作業空間を拡張できた.

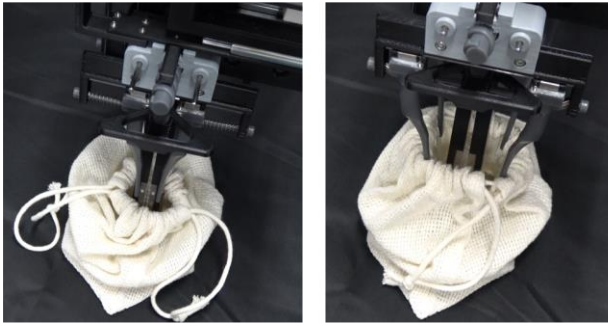


図 6 作業空間拡張実験

#### 4.2. 把持実験

図 6 に把持実験の様子を示す。まず、マニピュレータの動作により、内側ハンドの指先を入れ物入口に挿入する。次に、モータを順回転させると内側ハンドの開閉動作は予圧により抑制され、外側ハンドが開動作を行う。外側ハンドで入れ物の入り口部を押し広げるように作業空間が拡張される。そして十分に作業空間を拡張した後、モータを逆回転させると内側ハンドを開く。内側ハンドの指を把持位置に移動させモータを順回転させ物体を把持する。

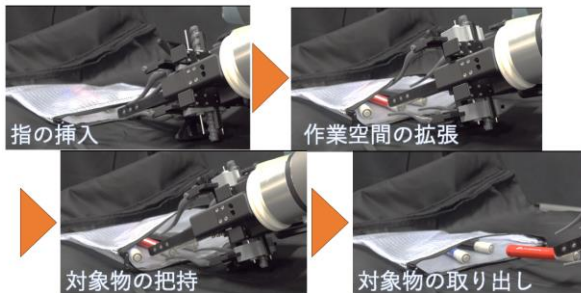


図 7 操作の様子

## 5. 結言

1つのモータを用いて作業空間の拡張と物体把持を可能とするロボットハンドを開発した。今後はより多様なタスクでの作業空間拡張と物体把持を通して適用検証を行う。

### 参考文献

- [1] T. Nishimura, T. Muryoe, Y. Asama, H. Ikeuchi, R. Toshima, and T. Watanabe, “Single-Fingered Reconfigurable Robotic Gripper with a Folding Mechanism for Narrow Working Spaces,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 10192–10199, Oct. 2022.

- [2] T. Nishimura, T. Muryoe, and T. Watanabe, “High-payload and self-adaptive robotic hand with 1-Degree-of-Freedom Translation/Rotation switching mechanism,” *IEEE Robot Autom Lett*, May 2023.
- [3] T. Nishimura, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “1-Degree-of-Freedom Robotic Gripper with Infinite Self-Twist Function,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 3, pp. 8447–8454, Jul. 2022.