

2024（令和6）年度 修士学位論文

柔軟支持機構による果実摘み取りハンド

Fruit Picking Hand with Flexible Support Mechanism

2025年2月10日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
知能機械工学コース

1275001 赤塚 広洋

指導教員 岡 宏一 教授

# 目次

第1章 序章.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 収穫ハンド.....	2
1.3 研究目的.....	3
第2章 製作した摘み取りハンド.....	4
2.1 先行研究の問題点.....	4
2.2 摘み取りハンドの概要.....	5
2.3 各動作の役割.....	6
2.4 問題点.....	7
第3章 意図しない屈曲の対策.....	9
3.1 動作実験1.....	9
3.2 実験方法.....	9
3.3 実験結果.....	11
3.3.1 対策なし.....	11
3.3.2 アウターケーブル.....	12
3.3.3 エアチューブ.....	13
3.3.4 結果の比較.....	14
3.4 考察.....	15
第4章 新たな摘み取りハンド.....	16
4.1 新たな摘み取りハンドの概要.....	16
4.2 動作原理.....	17
4.3 軌道実験2.....	17
4.4 実験結果.....	18
4.4.1 シリンダ.....	18
4.4.2 結果の比較.....	19
第5章 深度カメラの使用.....	20
5.1 深度カメラの性能実験.....	20
5.1.1 性能実験の方法.....	20
5.1.2 性能実験の結果および考察.....	21
5.2 果実の抽出.....	22
5.3 RGBDカメラと果実の距離の計算方法.....	23
5.3.1 水平方向の距離 $F_x$ の算出.....	23
5.3.2 鉛直方向の距離 $F_y$ の算出.....	23
第6章 屈曲動作の制御方法.....	25
6.1 穴1と屈曲方向とのなす角.....	25
6.2 屈曲角.....	26
6.3 屈曲制御.....	28
第7章 屈曲制御実験.....	31
7.1 実験方法.....	31

7.2 実験結果 .....	31
7.3 問題点 .....	32
第 8 章 結言 .....	34
謝辞 .....	35
参考文献 .....	36

# 第1章 序章

## 1.1 研究背景

農林水産省の農業労働力に関する統計<sup>(1)</sup>によると2020年の基幹的農業従事者数は2020年の136.3万人であったが、2024年には111.4万人と4年間で18.3%減少している。また、65歳以上の農業従事者の割合は2020年の69.5%から2024年には71.7%と2.2%増加している。さらに、農業従事者の平均年齢は2020年の67.8歳から2024年には69.2歳と1.4歳増加しており、年々高齢化が進んでいることが分かる。次に新規就農者の動向について注目する。新規就農者について農林水産省のホームページに「令和5年(令和5年2月1日~令和6年1月31日)の新規就農者は4万3460人で前年に比べ5.2%減少し、このうち49歳以下は1万5890人で、5.8%減少した。」<sup>(2)</sup>と記載されている。この現状が続くと、農業における人手不足が深刻化し、食糧の安定供給が危ぶまれることになる。農林水産省も「今後20年間で、基幹的農業従事者は現在の約1/4(116万人→30万人)にまで減少すること等が見込まれ、従来の生産方式を前提とした農業生産では、農業の持続的な発展や食料の安定供給を確保できない。」<sup>(3)</sup>と述べている。農業従事者の減少と高齢化の原因として、少子高齢化の進行や農作業が体に負担となる動作が多く、特に腰や背中への負担が大きいため、新規で参入する若者が少ないことが指摘されている。

これらの問題を解決する方法としてAI、ロボット、IoTなどを活用したスマート農業が提案されている。実際に、いくつかの農場ではスマート農業の実証実験は行われており、スマート農業の導入によって経営への効果を検証している<sup>(4)</sup>。農業用ロボットを導入することにより、長時間にわたる収穫作業による体の負担を軽減でき、これにより若年層の農業分野の新規参入する可能性がある。また、ロボットによって無人で農作物の管理が可能となることで、これまで耕作放棄地となっていた田畑を活用することができ、食糧生産量の増加が期待される。

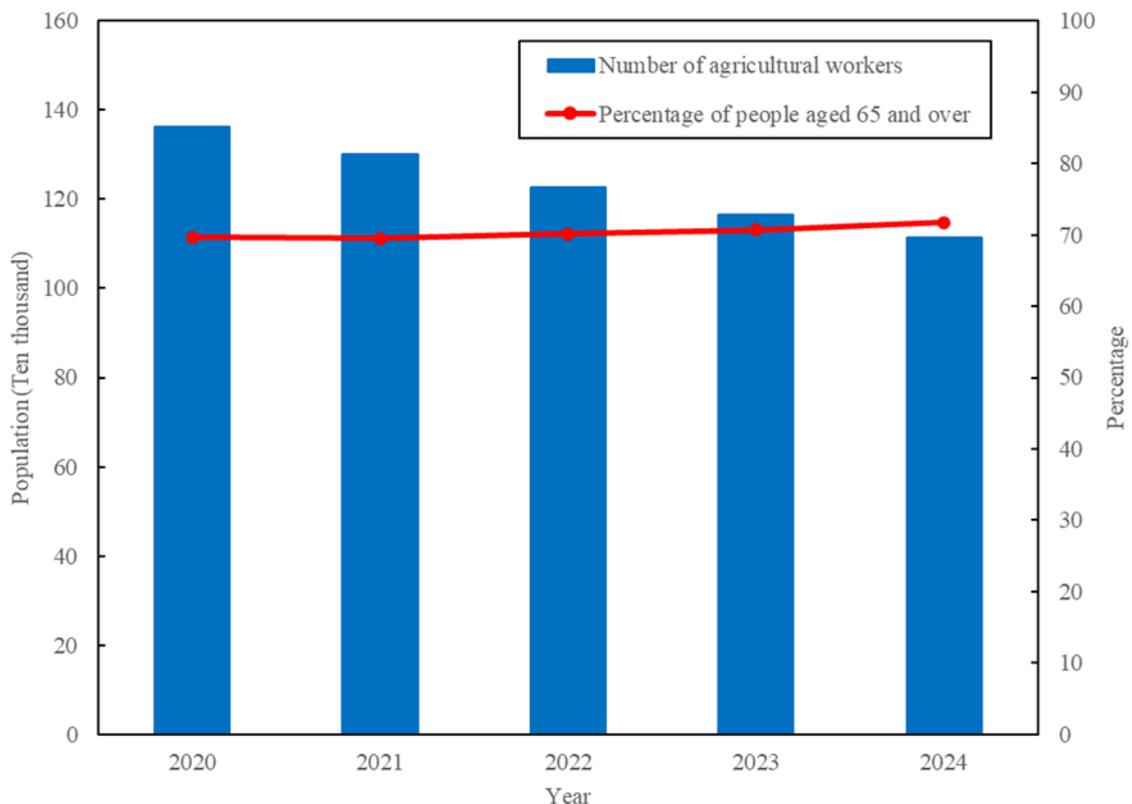


Fig 1.1 Trends in the number of agricultural workers <sup>(1)</sup>

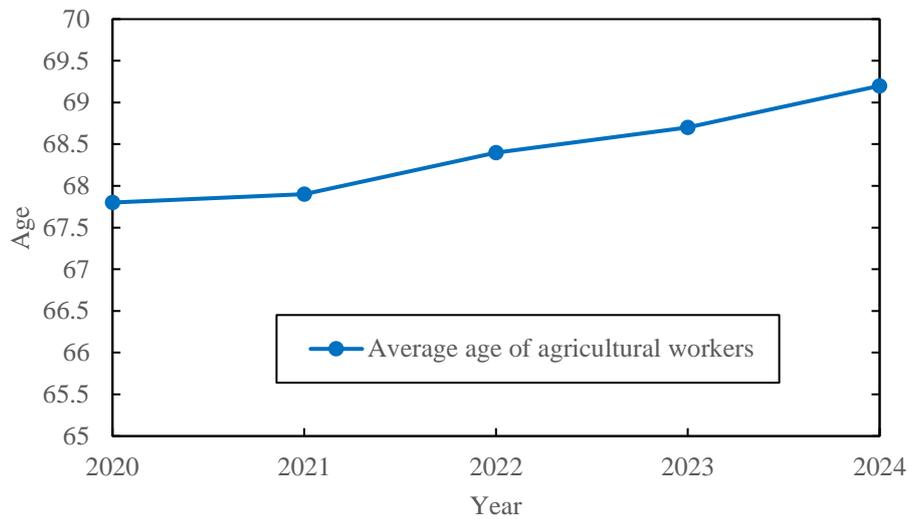


Fig 1.2 Trends in the average age of agricultural workers <sup>(1)</sup>



Fig 1.3 Robot tractor <sup>(5)</sup>

## 1.2 収穫ハンド

収穫ハンドにはいくつかのタイプが開発されている。図 1.4 にヤンマーホールディングス株式会社が開発中の大玉トマトを対象とした吸着切断ハンドを示す。この収穫ハンドは果実や果柄部を掴むのではなく、パッドが果実に吸着することで保持する仕組みとなっている。吸着された果実は果柄部をハサミで切断される。このような吸着式の収穫ハンドはトマトのように表面が比較的平坦で滑らかな果実には効果的と考える。しかし、今回収穫対象であるピーマンに対し吸着式のハンドを使用すると収穫成功率が低下する可能性があると考え。その理由としてピーマンの表面がトマトに比べて凹凸が激しく、パッドとピーマンの表面に隙間ができやすいため、吸着が難しくなるからである。そのため、今回製作する摘み取りハンドでは吸着式ではなく、果柄部を掴むタイプのハンドを採用する。

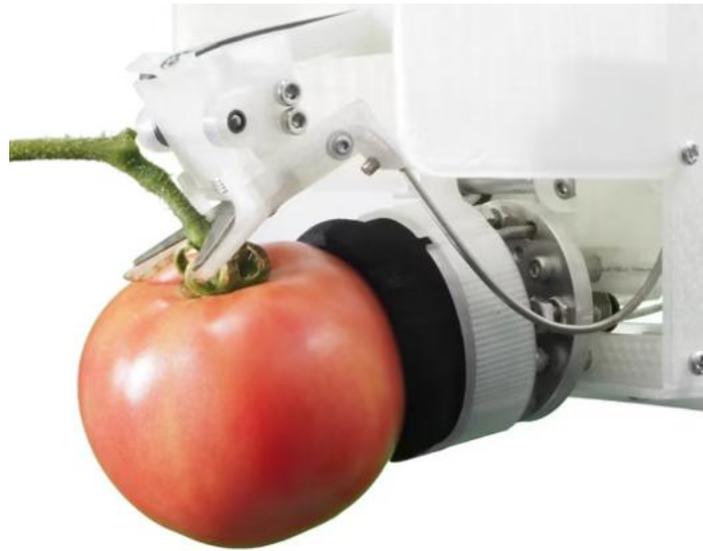


Fig 1.4 Adsorption cutting hand <sup>(6)</sup>

### 1.3 研究目的

果実は葉や茎に隠れて成長することがあり、そのような果実も収穫する必要がある。しかし、このような果実を収穫する際、葉や茎などを傷つけないようにするために、葉や茎を避ける動作が必要となる。また、今回収穫対象であるピーマンは他の果菜類に比べて比較的軽量であるため、果実が傾いて育つこともある。このような状態のピーマンを図 1.5 に示す。これらの問題に対し、複雑な機構を用いた摘み取りハンドを用いると摘み取りハンドの全体の重量が増加し、その結果ハンドを支えるためにロボットが大型化してしまう。しかし、畝間は約 30cm であるためロボットが大型化すると畝間を通過することができないという問題が生じる。そのため、本研究では茎に引っ掛からないように摘み取りハンドの小型化とハンド先を軽量で柔軟な機構で作動させることにより、茎や葉を回避できる収穫ハンドを開発することを目的とする。

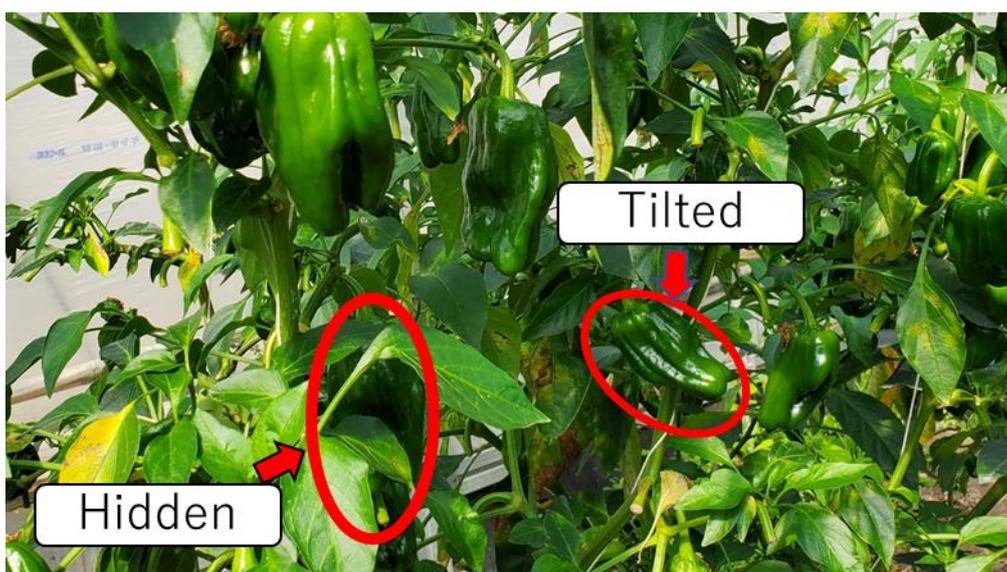


Fig 1.5 Green bell peppers growing hidden or tilted

## 第2章 製作した摘み取りハンド

### 2.1 先行研究の問題点

図 2.1 に 2022 年度に開発された摘み取りハンドを示す。このハンドはコンパクトで 2 度切りが出来ることを目的として開発された。2 度切りとは果柄部を 2 度切断することを言い、ピーマンを収穫する際に行われる。この作業は摘果と同じ意味があり、成長の悪い果実を取り除くことにより残りの果実に栄養が行き渡りやすくするために行われる。この摘み取りハンドは 2 度切りを行うために刃を上下方向に移動させることが出来る機構を備えている。しかし、刃を上下に移動させるためにサーボモータが必要となり、ハンド全体の重量が増加する問題がある。また果実を収穫する際、2 度切りを行うため果柄部を掴むのではなく果実全体を抱えるように保持する機構となっている。そのため、図 2.2 に示すように茎や他の果実を巻き込むことがある。これにより、一部の果実では収穫が困難となることがわかった。以上の問題点より、今回開発する摘み取りハンドは 2 度切りを行わず軽量化を重視する。



Fig 2.1 Picking mechanism <sup>(7)</sup>



Fig 2.2 Failure to harvest green bell peppers <sup>(7)</sup>

## 2.2 摘み取りハンドの概要

図 2.3 に学士課程で製作した摘み取りハンドを、図 2.4 に修士課程で製作した摘み取りハンドを、図 2.5 に図 2.4 のハンド部品の拡大図をそれぞれ示す。これらの摘み取りハンドの主な違いはコイルばねの屈曲を制御するワイヤの本数を増やした点である。学士課程ではワイヤ 1, 2 の 2 本のみで、XY 平面上から見るとワイヤ 1 は X 軸の正方向、ワイヤ 2 は Y 軸の正方向に配置されている。そのため、コイルばねの屈曲可能な方向は X 軸の正方向、Y 軸の正方向とその間の第一象限に限られていた。これにより、果実の配置によっては収穫が困難な場合があった。修士課程で製作したハンドではワイヤを 3 本使用し、コイルばねの周囲に 120°ずつ配置することで XY 平面上の任意の方向に屈曲することができるようにした。

修士課程で製作したハンドは手先の姿勢制御のために 4 自由度とハンド開閉の 1 自由度の計 5 自由度で構成されており駆動には 5 つのアクチュエータが必要である。また、この摘み取りハンドには大きく 3 種類の特徴がある。1 つ目の特徴はハンド本体に設置するアクチュエータを最小限に抑えた点である。本ハンドでは図 1 に示すアクチュエータのみをハンド本体に設置し、Z 軸周りの回転に使用する。他のアクチュエータはマニピュレータの根元などに設置し、ワイヤ駆動を用いて動力を伝達させる。この構成によりハンド全体の重量を軽減させることができる。2 つ目の特徴はコイルばねを使用した点である。コイルばねは比較的軽量でありながら、多方向に屈曲可能な柔軟性がある。この柔軟性を用いて葉や茎を回避させる。3 つ目の特徴は保持機構と切断機構を一体化した点である。これにより、単一の作動で果実の保持と切断を同時に行うことが可能となり、必要なアクチュエータを減らすことが出来る。

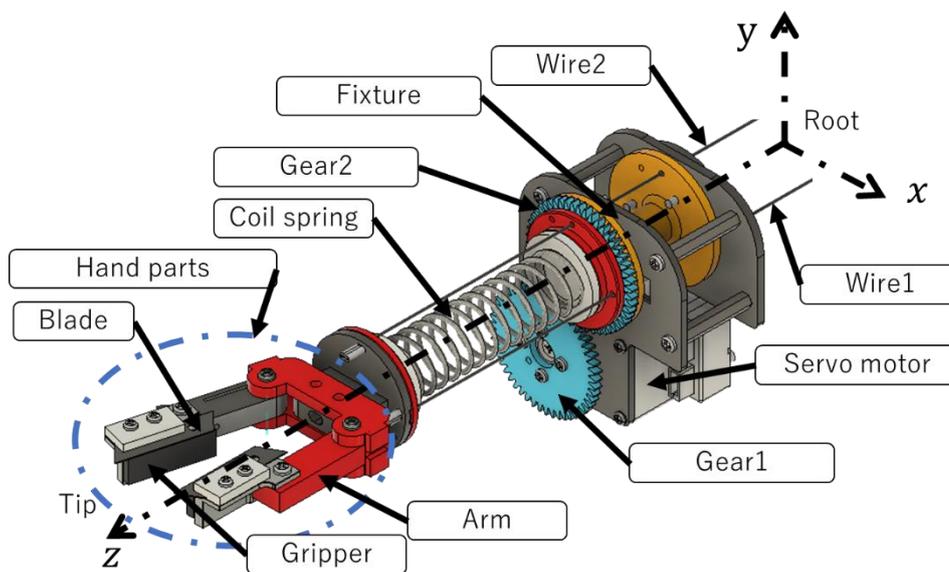


Fig 2.3 Picking hand developed in the bachelor's project

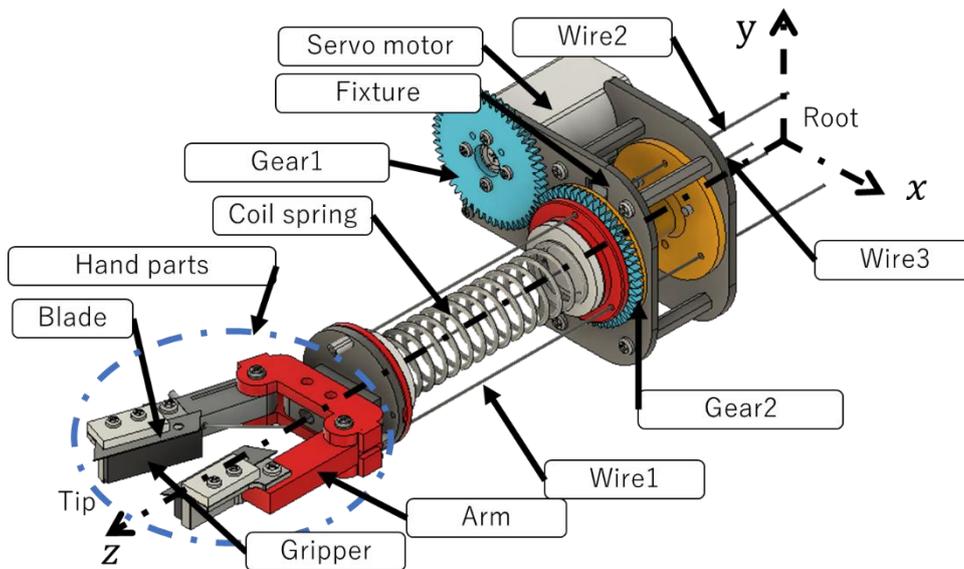


Fig2.4 Picking hand developed in the master's project

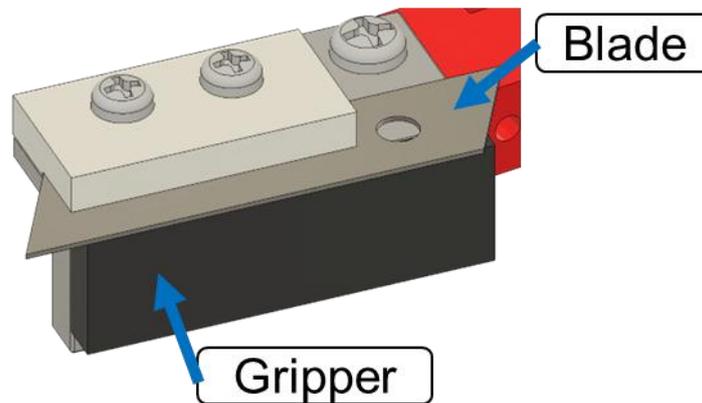


Fig 2.5 Enlarge diagram of hand part

### 2.3 各動作の役割

今回製作した摘み取りハンドでは大きく分けて 2 種類の動作がある。1 つ目は屈曲動作、2 つ目は回転動作である。まず初めに屈曲動作について説明する。ハンド部品はばねで支持しており、ワイヤ 1 から 3 の巻き取り量によって任意の角度に屈曲させることができる。これにより、葉や茎の裏側に隠れている果実を回りこむようにして収穫を行うことが可能となる。その様子を図 2.6 に示す。

次に回転動作について説明する。第 1 章第 3 節で述べたように、今回収穫対象であるピーマンは比較的軽量であるため傾いて果実が傾いて成長することがある。そのような場合、図 2.3 で示したサーボモータを駆動させることによりギヤ 1 が回転し、このギヤと噛み合っているギヤ 2 も動作する。これにより、ギヤ 2 に接続しているハンド部品とコイルばねが Z 軸周りに回転することが可能となる。そのため、傾いて成長している果実の角度に合わせて回転量を調整することで収穫可能となる。図 2.7 にハンドを回転させた際の様子を示す。

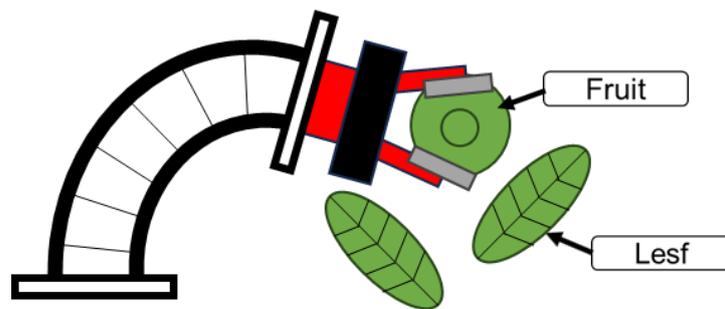


Fig 2.6 Bending of coil spring

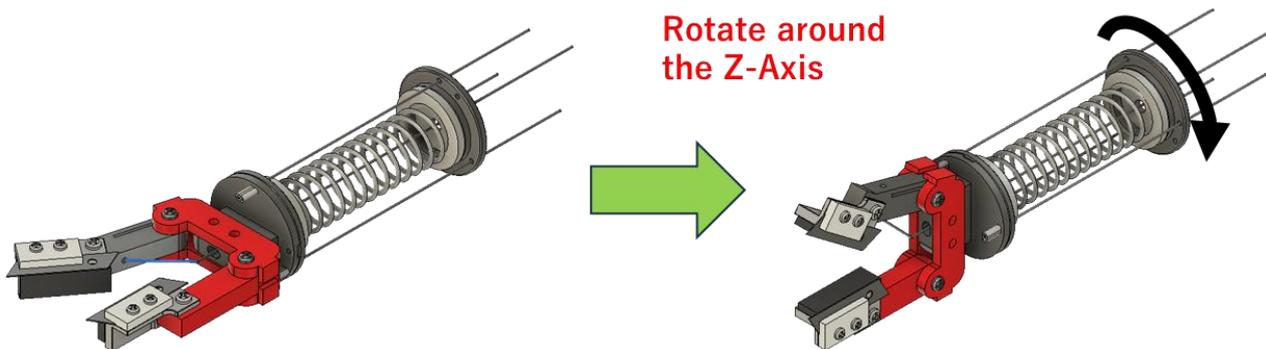


Fig 2.7 Rotating picking hand

## 2.4 問題点

図 2.8 のようにコイルばねを用いた状態でハンド部品の動作確認を行った。この際ハンドの開閉動作に関与するワイヤのみを動作させたにもかかわらず、コイルばねが意図しない屈曲することがわかった。本来コイルばねを屈曲させるためには第 2 章第 3 節で述べたようにワイヤ 1 から 3 を動作させる必要がある。しかし、今回の動作確認ではワイヤ 1 から 3 を動作させていないにもかかわらず、コイルばねが意図しない方向に屈曲した。その様子を図 2.9 に示す。原因としてコイルばねの中心軸を通過しているワイヤが実際には中心軸から少しずれているため意図しない屈曲が発生していると考えた。そのため、次章で屈曲の対策を行う。

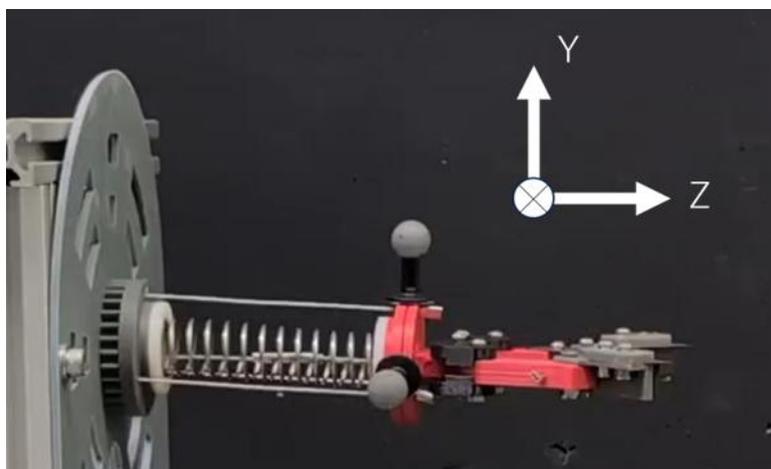


Fig 2.8 Before unintended bending

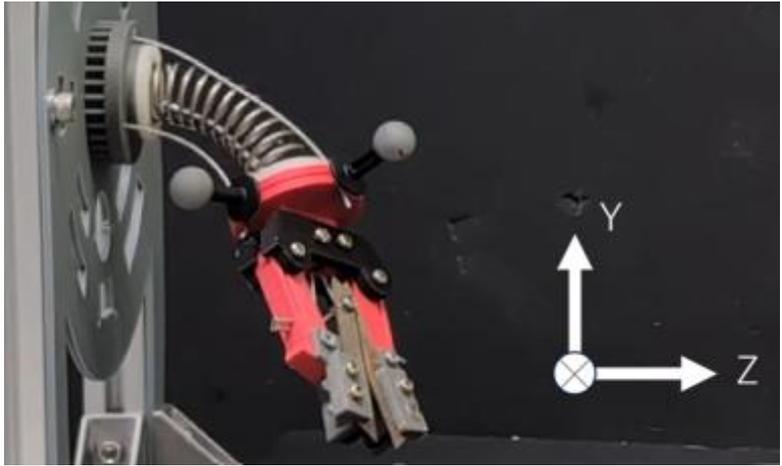


Fig 2.9 Unintended bending

## 第3章 意図しない屈曲の対策

### 3.1 動作実験1

屈曲動作を行っていないにも関わらずコイルばねが屈曲してしまうことが分かった。また、この現象は次から意図しない屈曲と呼ぶ。意図しない屈曲が発生する原因としてハンド部品を動作させるためのワイヤがコイルばねの中心軸を通っていないからと考えた。そのため、ワイヤを中心軸に沿わせるためにアウターケーブルとエアチューブをコイルばねの中心軸に配置する。アウターケーブルを使用した理由として自転車のブレーキなどに使われておりワイヤを通らせるのに最適と考えたからである。また、エアチューブを使用した理由としてアウターケーブルには外装と内装の間に金属が使われているため、柔軟性に欠ける。これによりコイルばねを屈曲させる際に大きな抵抗になる可能性があると考えた。そのため、アウターケーブルに比べ柔軟性を持つエアチューブを採用した。図 3.1 から図 3.3 に今回使用するコイルばねを示す。また、意図しない屈曲に対し対策を行わなかったコイルばねをノーマル型、アウターケーブルを用いたコイルばねをアウターケーブル型、エアチューブを用いたコイルばねをエアチューブ型とそれぞれ名付ける。

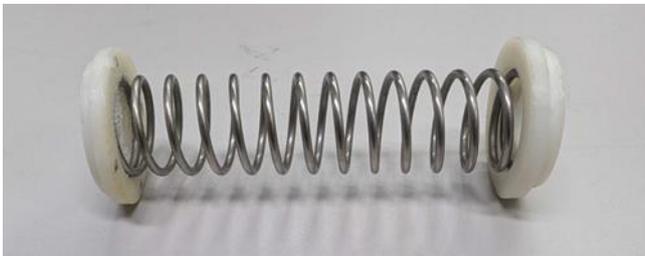


Fig 3.1 Normal type



Fig 3.2 Outer cable type



Fig 3.3 Air tube type

### 3.2 実験方法

図 3.4 に軌跡を調べる位置と座標軸を示す。

実験方法としてハンドの開閉を行うためのワイヤを近藤科学の KRS-6003HV<sup>(8)</sup>に接続することによって動作させる。その際のノーマル型、アウターケーブル型およびエアチューブ型がどのような挙動をしたかを調べる。図 3.5 に示している白丸は軌道を調べる位置である。また、原点は初期の白丸の位置とし、座標軸を図のようにした。

この軌道実験ではモーションキャプチャを用いて位置情報を取得する。図 3.6 に今回の実験で使用するモーションキャプチャ OptiTrack V120:Trio を示す。

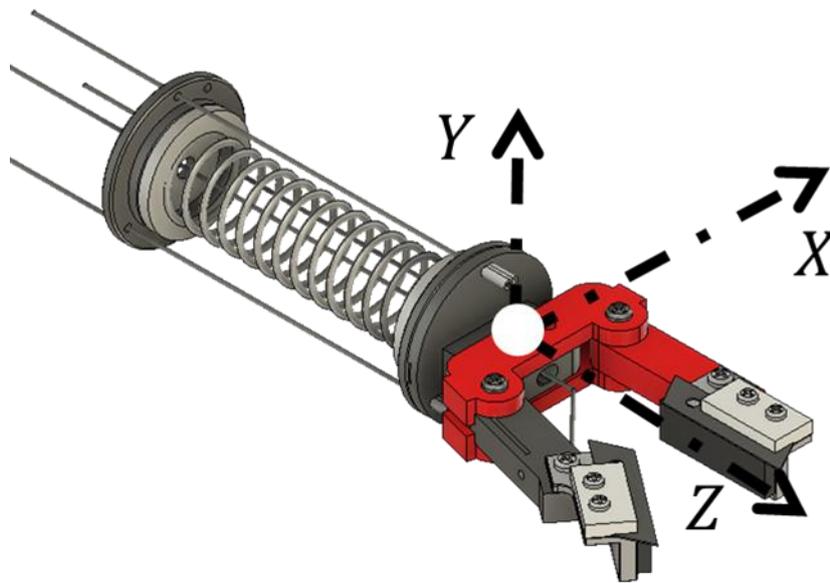


Fig 3.4 Measurement positions and coordinate axes for trajectory analysis



Fig 3.5 Servo motor



Fig 3.6 Motion capture

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 対策なし

図 3.7 から図 3.10 はノーマル型の軌跡を示す。これらの図より、コイルばね先端の位置が原点から最も距離がある座標は[-34.7 -15.8 -1.8]であり、その際の距離は 38.2mm であった。

次に、各軸方向についての初期位置からの最大変位を見てみる。X 軸方向の最大変位はマイナス方向に 34.7mm、Y 軸方向の最大変位はマイナス方向に 17.2mm、Z 軸方向の最大変位はプラス方向に 4.48mm であった。これらの結果より、X 軸方向の変位が最も大きく、Z 軸方向の最大変位は 4.48mm と他の軸に比べて小さいことが分かった。しかし、Z 軸の正負のどちらの方向にも変位しておりそれらを合わせると振幅は 6.73mm であった。

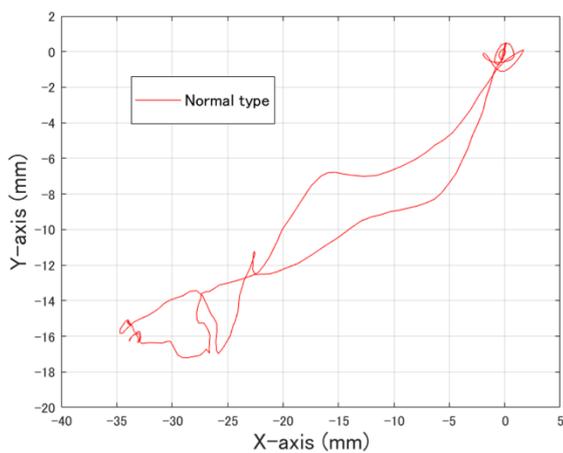


Fig 3.7 Trajectory of normal type in XY coordinates

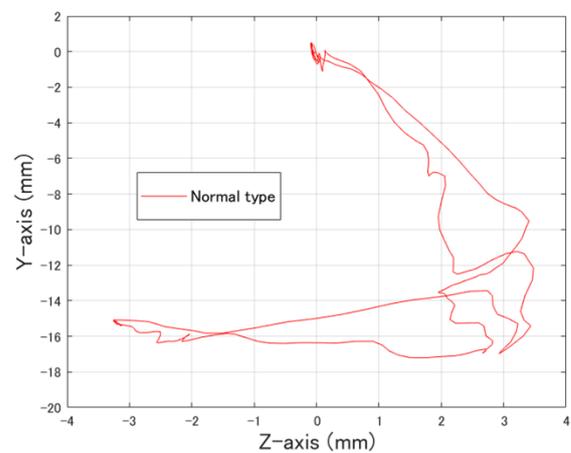


Fig 3.8 Trajectory of normal type in ZY coordinates

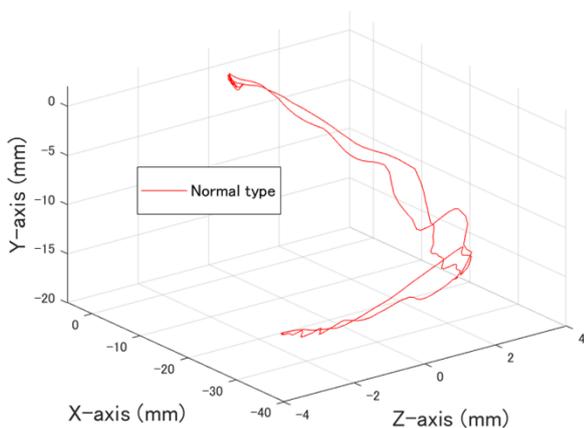


Fig 3.9 Trajectory of normal type in XYZ coordinates

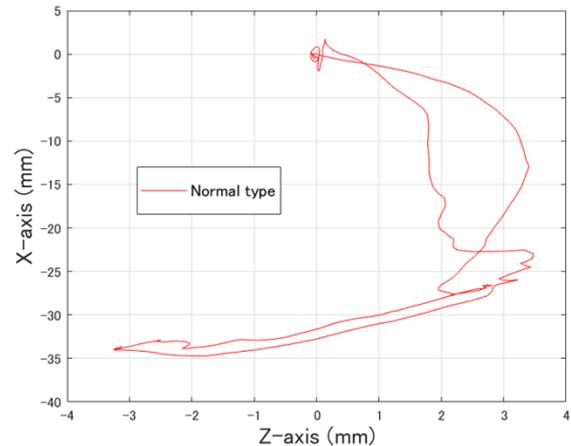


Fig 3.10 Trajectory of normal type in ZX coordinates

### 3.3.2 アウターケーブル

図 3.11 から図 3.14 はアウターケーブル型の軌跡を示す。これらの図より、コイルばね先端の位置が原点から最も距離がある座標は[0.9 -30.2 -5.6]であり、その際の距離は 30.7mm であった。

次に、各軸方向についての初期位置からの最大変位を見てみる。X 軸方向の最大変位はプラス方向に 2.93mm、Y 軸方向の最大変位はマイナス方向に 30.2mm、Z 軸方向の最大変位はマイナス方向に 7.14mm であった。これらの結果より、他の軸方向に比べ Y 軸方向の変位が最も大きく、X 軸方向 Z 軸方向の変位は 10mm 未満に収まっていることが分かった。

しかし、X 軸 Y 軸ともにプラス、マイナス方向のどちらにも大きく変位しておりそれらを合わせると X 軸の振れ幅は 5.16mm、Z 軸の振れ幅は 13.8mm であった。

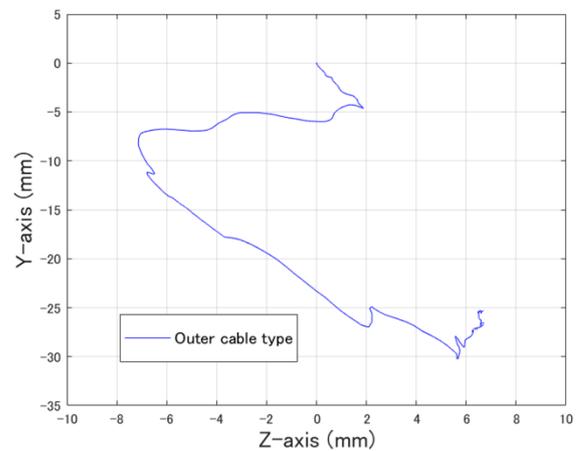
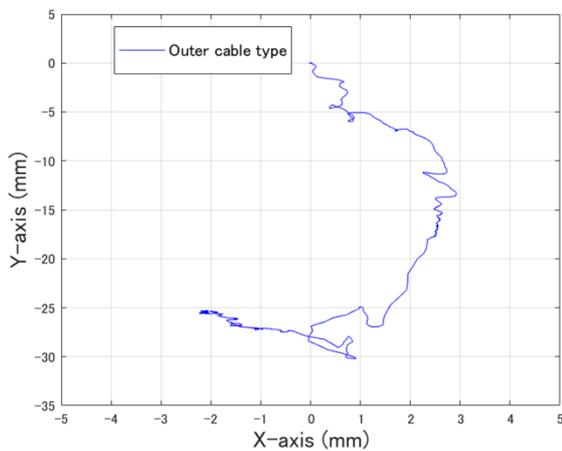


Fig 3.11 Trajectory of outer cable type in XY coordinates Fig 3.12 Trajectory of Outer cable type in ZY coordinates

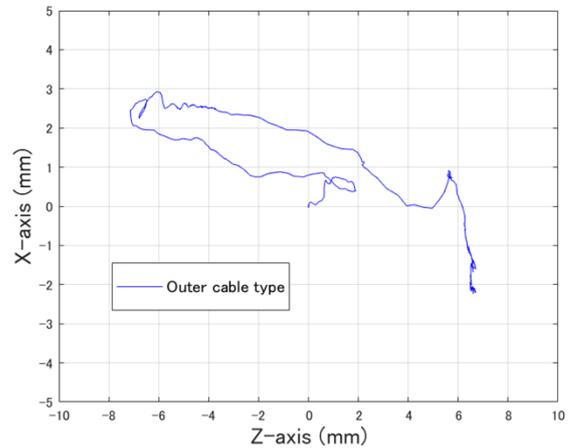
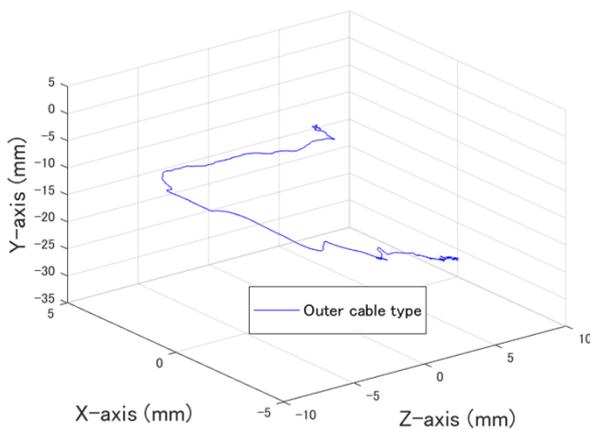


Fig 3.13 Trajectory of outer cable type in XYZ coordinates Fig 3.14 Trajectory of outer cable type in ZX coordinates

### 3.3.3 エアチューブ

図 3.15 から図 3.18 はエアチューブ型の軌跡を示す。これらの図より、コイルばね先端の位置が原点から最も距離がある座標は[-1.91 -31.7 -30.7]であり、その際の距離は 31.8mm であった。

次に、各軸方向についての初期位置からの最大変位をしてみる。X 軸方向の最大変位はマイナス方向に 3.26mm、Y 軸方向の最大変位はマイナス方向に 31.7mm、Z 軸方向の最大変位はプラス方向に 7.59mm であった。この結果より、Y 軸方向の変位が最も大きく、X 軸方向 Z 軸方向の変位は 10mm 未満に収まっていることが分かった。

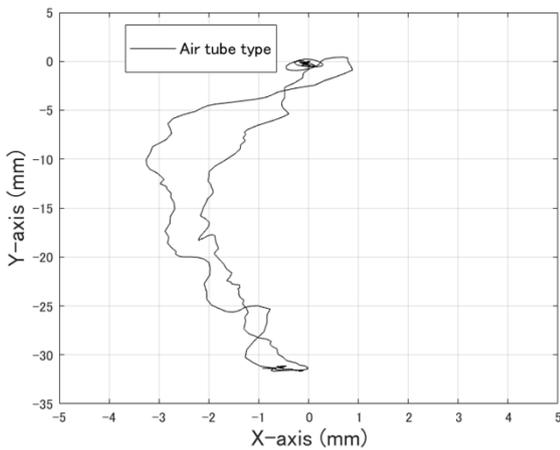


Fig 3.15 Trajectory of air tube type in XY coordinates

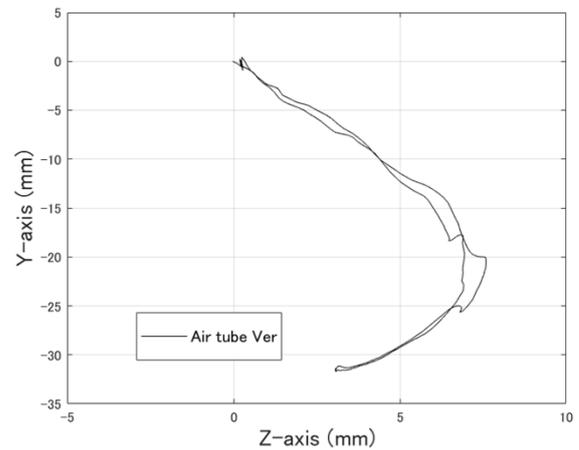


Fig 3.16 Trajectory of air tube type in ZY coordinates

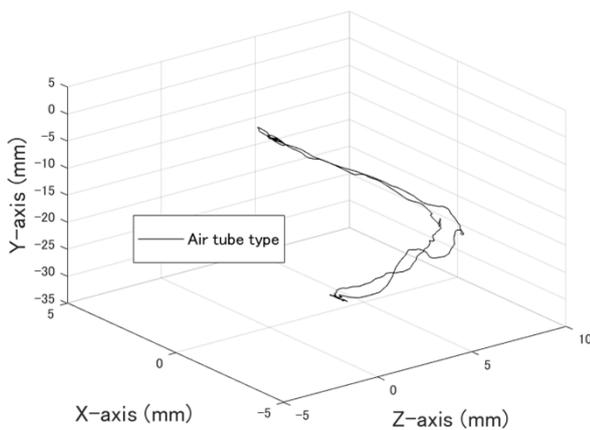


Fig 3.17 Trajectory of air tube type in XYZ coordinates

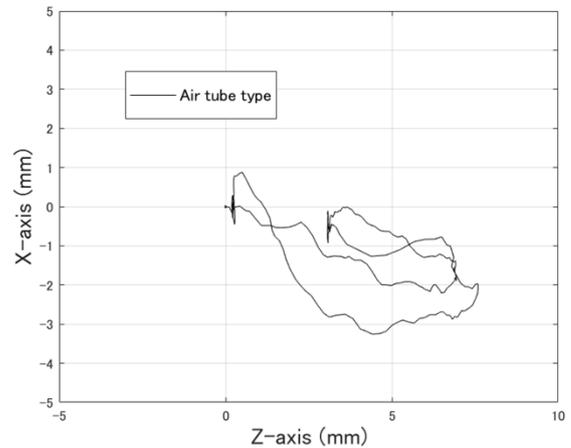


Fig 3.18 Trajectory of air tube type in ZX coordinates

### 3.3.4 結果の比較

図 3.19 から図 3.22 にノーマル型, アウターケーブル型, エアチューブ型の 3 種類の実験結果を重ね合わせた図を示す. 赤線, 青線, 黒線の順でノーマル型, アウターケーブル型, エアチューブ型の軌道を示している. これらの図より, X 方向ではノーマル型が他の種類に比べて振れ幅が大きいことがわかる. 具体的にはノーマル型では X 方向の振れ幅は 36.4mm であったのに対し, アウターケーブル型では 5.16mm と 85.8%の改善が見られ, エアチューブ型では 4.14mm と 88.6%の改善が見られた. このように X 方向では大幅に改善することができた. しかし, Y 方向ではノーマル型に比べてアウターケーブル型, エアチューブ型の方が振れ幅が大きいことがわかる. 具体的には Y 方向の振れ幅はノーマル型が 17.7mm であったのに対し, アウターケーブル型では 30.2mm と 70.6%の悪化が見られ, エアチューブ型では 32.1mm となり 81.4%の悪化が見られた. このように Y 方向では逆に大幅に悪化してしまった. 最後に Z 方向ではノーマル型の振れ幅が 6.73mm であるのに対しアウターケーブル型では 13.8mm と 105%の悪化が見られ, エアチューブ型では 7.61mm と 13.1%の悪化が見られた. エアチューブ型では少し悪化したが, アウターケーブル型では約 2 倍も悪化してしまった.

また, 原点から追跡点が最も距離が離れていたのはノーマル型で 38.2mm であった. アウターケーブル型は 30.7mm と 19.6%の改善が見られ, エアチューブ型では 31.8mm と 16.8%の改善が見られた. このようにノーマル型よりは改善されているが, アウターケーブル型およびエアチューブ型はともに 30mm 以上原点から離れている. 以上の結果より意図しない屈曲の対策としてアウターケーブルやエアチューブを使用した期待した効果は得られなかった.

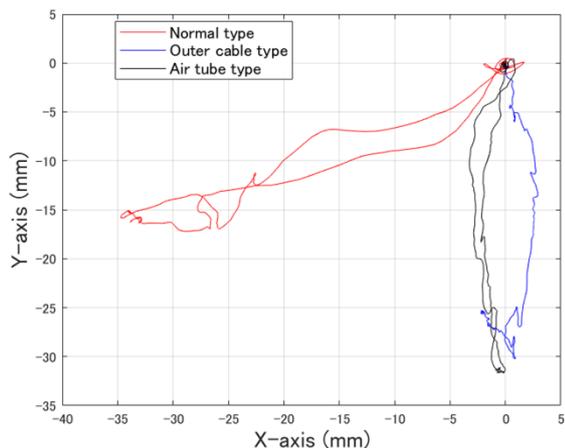


Fig 3.19 Three types of trajectories in XY coordinates

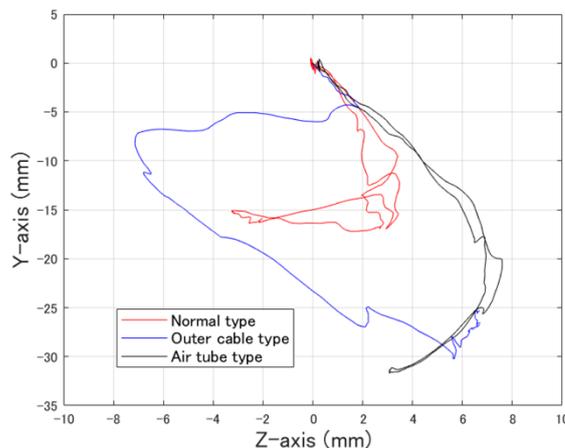


Fig 3.20 Three types of trajectories in ZY coordinates

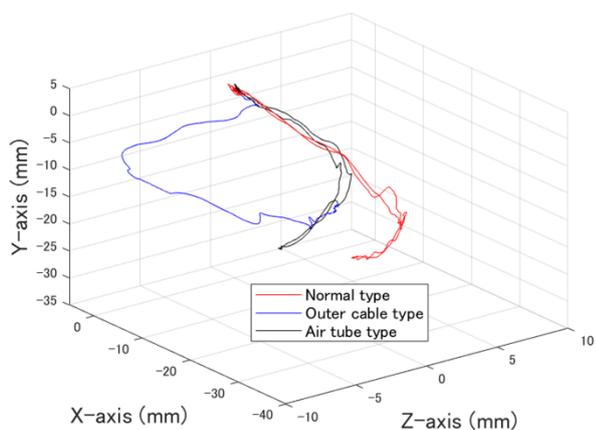


Fig 3.21 Three types of trajectories in XYZ coordinates

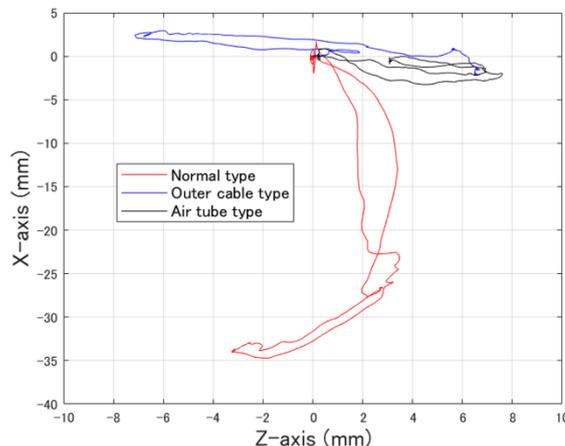


Fig 3.22 Three types of trajectories in ZX coordinates

### 3.4 考察

結果より、アウターケーブル型，エアチューブ型を用いたが意図しない屈曲を防ぐことができないことがわかった．第3章のはじめに意図しない屈曲が発生する原因としてハンド部品を動作させるためのワイヤがコイルばねの中心軸を通っていないからと考えていた．原点からの誤差はノーマル型に比べて、アウターケーブル型では19.6%の改善が見られ，エアチューブ型では16.8%の改善が見られた．そのため、少しは関係があったのではないかと考える．しかし、どちらのタイプでも30mm以上原点と誤差があるため、他に大きな原因があると考えられる。

その原因としてハンド部品を作動させるためのワイヤの張力がコイルばねに伝わっているためと考えられる．そのため、ハンドの開閉のための力がコイルばねに伝わらないような機構を考える必要がある。

## 第4章 新たな摘み取りハンド

### 4.1 新たな摘み取りハンドの概要

図 4.1 に新たに製作した摘み取りハンドを示す。新たなハンドと図 2.4 の摘み取りハンドが異なる点はコイルばねとハンド部品間にエアシリンダを追加した点である。図 4.2 に使用した株式会社スター精機のエアシリンダである MINI-CYLINDER UMCD-10 を示し、その性能を表 2.1 に示す。図 2.4 の摘み取りハンドでは果柄部の切断および保持を行う際はワイヤ駆動により行っていた。一方、今回のハンドではエアシリンダを用いることで、果柄部の切断および保持を行う。図 4.1 には示していないがエアシリンダのピストンロッドとハンド部品はワイヤで接続されており、エアシリンダの動作はワイヤを通じてハンド部品に伝達される構造となっている。また、コイルばねの中心軸にはエアシリンダの動作に必要な圧縮空気を供給するエアチューブがある。この設計により前回の摘み取りハンドとは異なりコイルばねにはワイヤによる張力が働かないため、意図しない屈曲を防ぐことができると考えられる。エアシリンダとその固定具の追加したことにより摘み取りハンドの重量は前回のものより 54.5g 増加した。

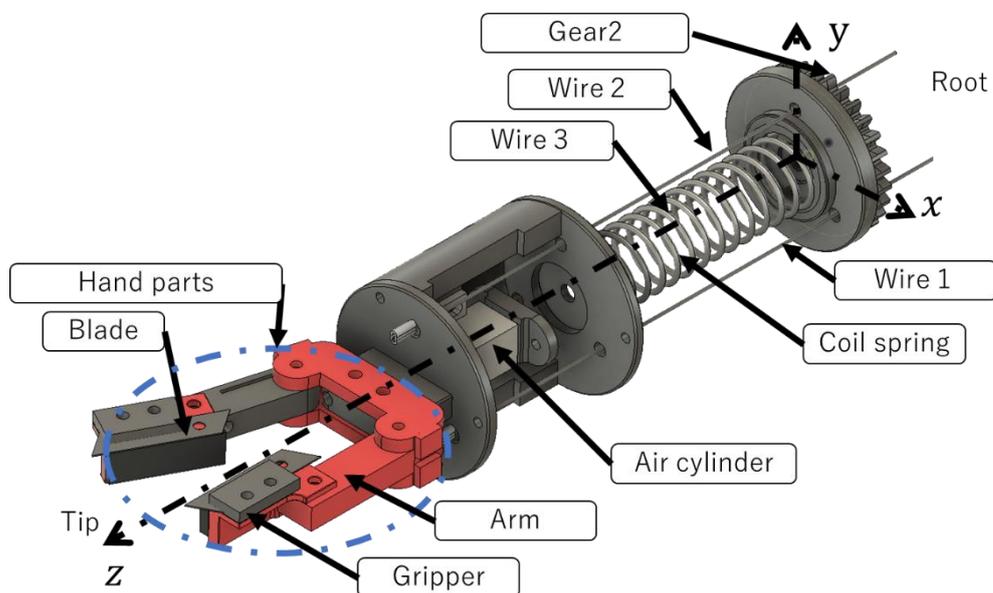


Fig 4.1 New picking hand



Fig 4.2 Air cylinder <sup>(9)</sup>

Table 4.1 Air cylinder <sup>(9)</sup>

	Value
Operation Pressure (MPa)	0.3~0.5
Output Force (N) (Max)	24
Stroke (mm)	10
Mechanical Dimensions (mm) (g)	Width : 27 / Height : 14 / Length : 33 / Weight : 22

## 4.2 動作原理

図 4.3 にエアシリンダの作動に伴いハンド部品が作動する様子を示す。図 4.3 の左側はハンド部品が開いている状態、右側が閉じている状態である。また、前節でも述べたようにエアシリンダのピストンロッドとハンド部品はワイヤによって接続されているのでエアシリンダが作動するとハンド部品も連動して作動する。ピストンロッドが引かれた状態ではハンド部品が開いており、ピストンロッドが押し出された状態ではハンド部品が閉じる動作を行う。また、本事件で使用したエアシリンダは圧縮空気を入れるとピストンロッドが押し出される。これにより圧縮空気の供給制御を行うことにより果柄部の切断および保持を制御することが可能である。

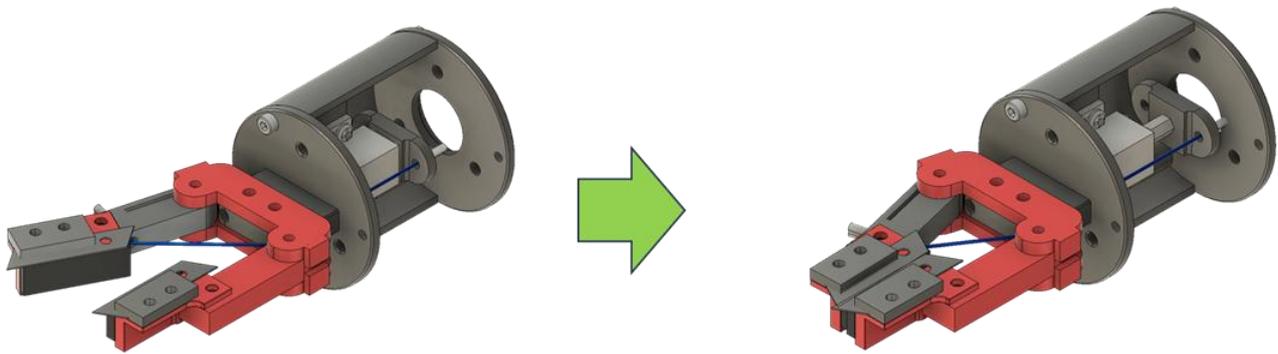


Fig 4.3 Motion of the hand parts driven by the air cylinder

## 4.3 軌道実験 2

図 4.4 に軌跡を調べる位置と座標軸を示す。

実験方法としてハンドの開閉を行うためのワイヤで接続されているエアシリンダに圧縮空気を供給させることによって作動させる。その際のコイルばね先端の挙動を調べる。図 4.4 に示している白丸の位置の軌道を調べる。また、原点は初期の白丸の位置とし、座標軸は図中のようにとる。

また、軌道実験 1 と同様にモーションキャプチャを用いて位置情報を取得する。

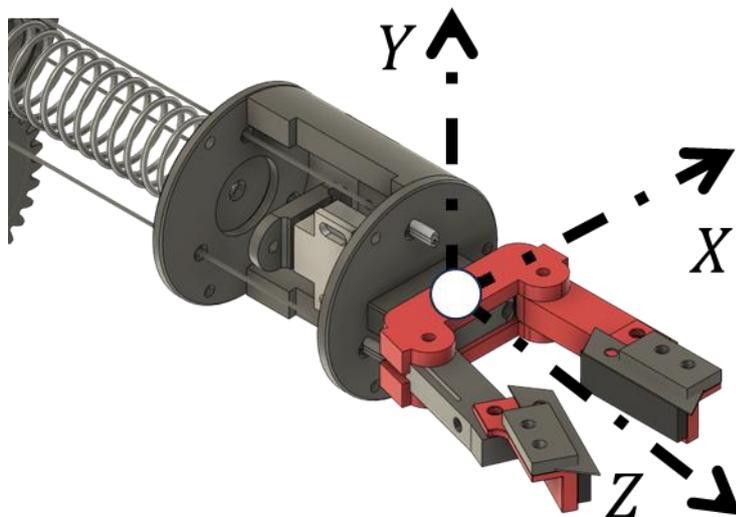


Fig 4.4 Measurement positions and coordinate axes for trajectory analysis of the cylinder type

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 シリンダ

図 4.5 から図 4.8 に図 4.1 で示した新たに製作した摘み取りハンドの軌跡を示す。また、新たに製作した摘み取りハンドにはエアシリンダを使用しているためシリンダ型と名付ける。図 4.5 から図 4.8 より、コイルばね先端の位置が原点から最も距離がある座標は[-1.18 -0.10 -0.16] でその際の距離は 1.20mm であった。

次に各軸方向の原点から最大変位量を見てみる。X 軸方向の最大変位量はマイナス方向に 1.18mm、Y 軸方向の最大変位量はマイナス方向に 0.315mm、Z 軸方向の最大変位量はマイナス方向に 0.259mm であった。このようにすべての方向で変位量は2mm未満となった。さらに、YZ 軸方向と比較すると X 軸方向の最大変位量が最も大きくなった。ハンド部品の作動方向は X 軸方向であるのだが、本実験はハンド部品を作動させるため、その反動によりコイルばねの先端が X 軸方向に振動した。しかし、振動が収束すると X 軸の変位量は-0.03mm 前後に安定した。完全に初期位置には戻らなかったが YZ 方向と同程度の変位量となった。

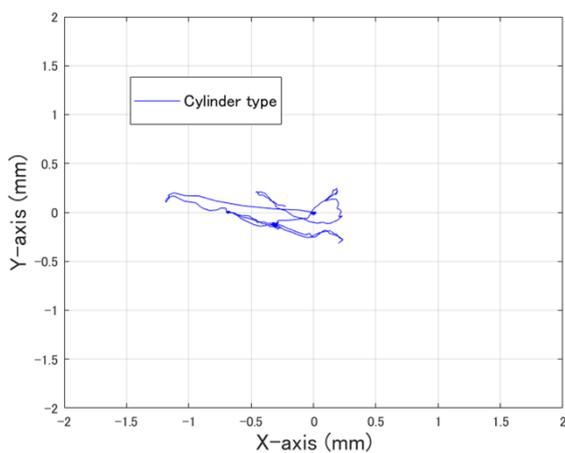


Fig 4.5 Trajectory of cylinder type in XY coordinates

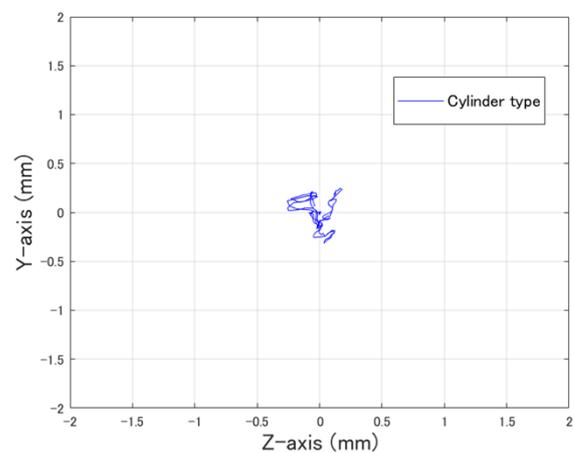


Fig 4.6 Trajectory of cylinder type in ZY coordinates

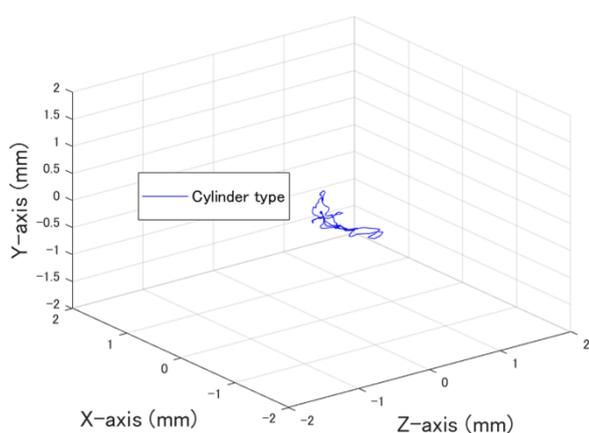


Fig 4.7 Trajectory of cylinder type in XYZ coordinates

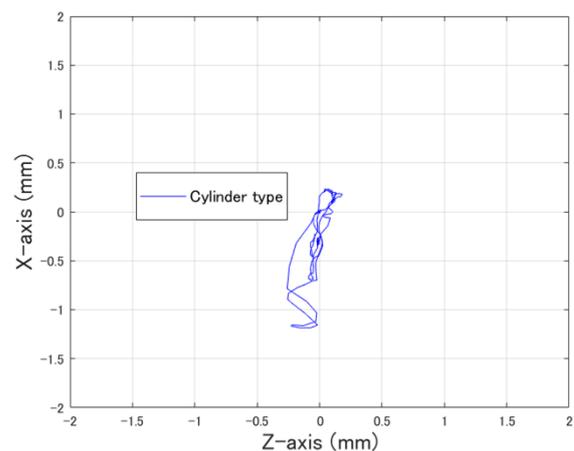


Fig 4.8 Trajectory of cylinder type in ZX coordinates

#### 4.4.2 結果の比較

ノーマル型およびシリンダ型の2種類の実験結果を重ねたものを図 4.9 から図 4.12 に示す。赤線がノーマル型、青線がシリンダ型の軌跡を示している。これらの図よりシリンダ型はノーマル型と比較してすべての方向で大幅に振れ幅が小さくなっていることがわかる。具体的にはノーマル型では X 方向の振れ幅は 36.4mm であったのに対し、シリンダ型では 1.42mm と 96.1%の改善が見られた。また Y 方向の振れ幅はノーマル型が 17.7mm であったのに対し、シリンダ型では 0.561mm となり 96.8%の改善が見られた。最後に Z 方向ではノーマル型の振れ幅が 6.73mm であるのに対しシリンダ型では 0.44mm と 93.5%の改善が見られた。以上の結果よりすべての方向において振れ幅が 90%以上改善したことが分かった。

また、原点から追跡点が最も距離が離れていたのはノーマル型では 38.2mm であった。シリンダ型では 1.20mm と 96.9%の改善が見られた。したがって、シリンダ型を用いることにより意図しない屈曲を防ぐことができることが分かった。

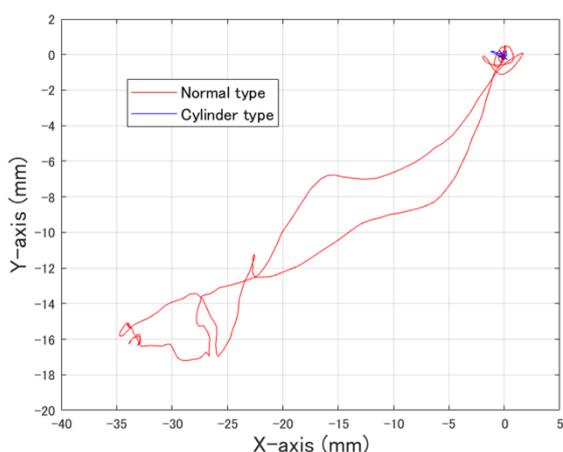


Fig 4.9 Two types of trajectories in XY coordinates

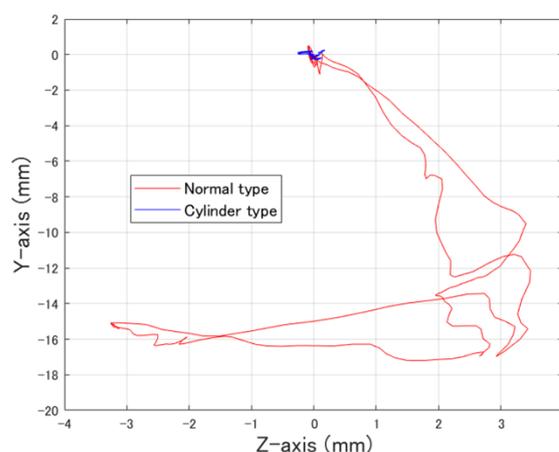


Fig 4.10 Two types of trajectories in ZY coordinates

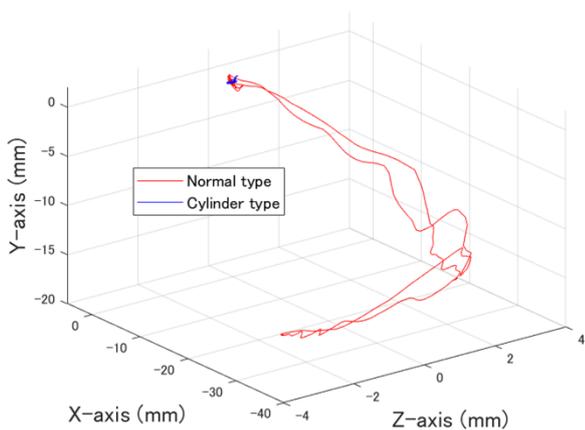


Fig 4.11 Two types of trajectories in XY coordinates

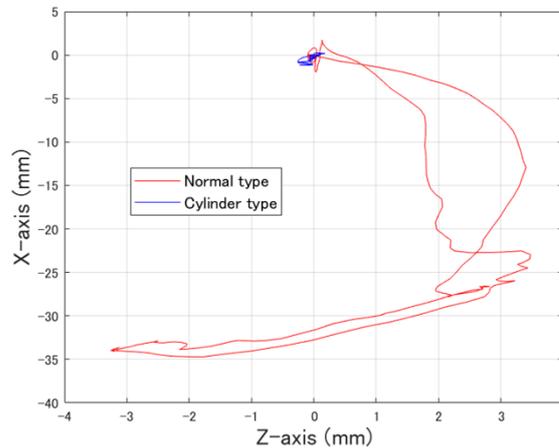


Fig 4.12 Two types of trajectories in ZY coordinates

## 第5章 深度カメラの使用

### 5.1 深度カメラの性能実験

#### 5.1.1 性能実験の方法

図 5.1 に今回使用する深度カメラ，表 5.1 にその性能を示す．本実験で使用する深度カメラはインテル株式会社の RealSense™ Depth Camera D435i である．図 5.2 に実験の様子を示す．本実験では，深度カメラから黒い板までの距離を 100mm から 600mm まで 100mm 刻みで離していき，それぞれの距離で精度を測定する．各距離で5回測定を行い，測定位置は画像の中心とする．今回使用するフレーム解像度 640×480，フレームレートは 15fps である．図 5.3 に例として深度カメラから黒い板の距離が 600mm 離れた際の深度マップを示す．深度マップでは距離によって色が異なり青色が近距離，赤色が遠距離を示す．また，黒色は測定が不可能であった場所である．



Fig 5.1 RGBD camera <sup>(10)</sup>

Table 5.1 RGBD camera <sup>(10)</sup>

	Depth	RGB
FOV (16:9) (degrees)	H : 87 / V : 58 / D : 95	H : 69 / V : 42 / D : 77
FOV (4:3) (degrees)	H : 75 / V : 62 / D : 89	H : 69 / V : 42 / D : 77
Frame Resolution (Max)	1280 × 720	1920 × 1080
Frame Rate (Max) (FPS)	90	60
Mechanical Dimensions (mm) (g)	Width : 90 / Height : 25 / Depth : 25 / Weight : 75	



Fig 5.2 Performance experiment of the depth camera

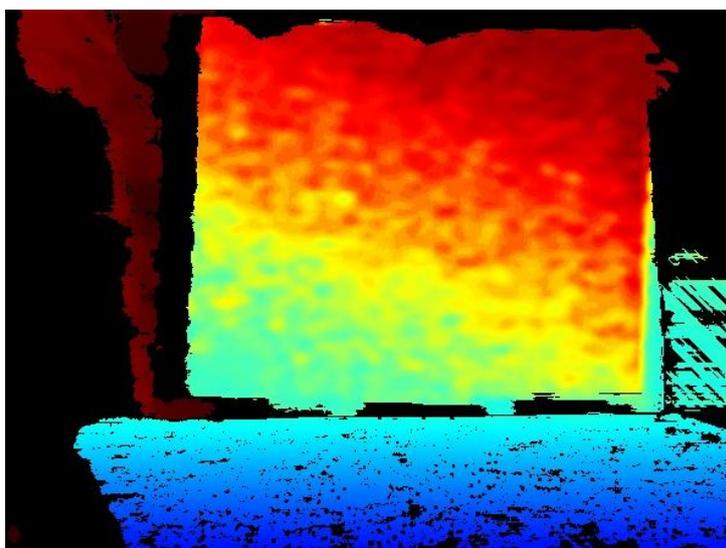


Fig 5.3 Depth map at 600mm

### 5.1.2 性能実験の結果および考察

本実験の結果を表 5.2 に示す。結果よりカメラから黒色の板の距離が 600mm での平均誤差率が 1.8%，最大誤差は 15mm，最小誤差は 9mm あり，各距離の中で最も誤差が大きかった。また，果柄部の太さが平均 4.53mm であるため，距離が 600mm では収穫に失敗する可能性がある。次に距離が 500mm では平均誤差率が 0.84%，最大誤差は 6mm，最小誤差は 3mm あった。そのため，距離が 600mm の場合と同様の理由で収穫に失敗する可能性がある。次に距離が 400mm では平均誤差率が 0.2%，最大誤差は 1mm であり，各距離の中で最も平均誤差率が小さかった。また，最大誤差が 1mm なのでカメラの精度による収穫に失敗する可能性は低いと考える。次に距離が 300mm では平均誤差率が 0.33%，最大誤差は 1mm あった。これより距離が 400mm の場合と同様に収穫に失敗する可能性は低いと考える。次に距離が 200mm では平均誤差率が 2%，最大誤差は 4mm であり，各距離の中で最も平均誤差率が高い。また，距離が 600mm の場合と同様の理由で収穫に失敗する可能性がある。最後に距離が 100mm では計測ができなかった。これは本実験で使用したフレーム解像度が 640×480 であるのだが，RealSense™ Depth Camera D435i のデータシート<sup>(10)</sup>によるとこのフレーム解像度では測定可能な最小距離が 175mm だからである。

これらの結果よりフレーム解像度 640×480 を使用する場合，カメラの設置位置は果実から 300mm から 400mm の範囲にするとよいと考える。

Table 5.2 Depth Accuracy

	Measuring Distance (mm)					
	100	200	300	400	500	600
Measurement 1 (mm)	-	204	301	400	504	609
Measurement 2 (mm)	-	204	301	401	504	610
Measurement 3 (mm)	-	204	301	401	504	615
Measurement 4 (mm)	-	204	301	401	506	609
Measurement 5 (mm)	-	204	301	401	503	611
Average Value (mm)	-	204	301	400.8	504.2	610.8
Mean Absolute Error (mm)	-	4	1	0.8	4.2	10.8
Mean Absolute Percentage Error (%)	-	2	0.33	0.2	0.84	1.8

## 5.2 果実の抽出

図 5.4 に深度カメラによって取得された RGB 画像を示し、図 5.5 から図 5.7 に Matlab を用いて画像処理をおこなった結果を示す。

画像処理の手順を以下に示す。まず初めに深度カメラより RGB 画像(図 5.4)を取得する。次に RGB 画像を HSV 色空間(図 5.5)に変換する。次にピーマンの抽出を目的として色相、彩度および明度のしきい値を設定し、HSV 色空間に対して設定したしきい値を用いて二値化処理(図 5.6)を行う。使用した各しきい値は表 5.3 に示す。

最後にノイズの除去(図 5.7)を行う。今回 1000 ピクセル以下は塗りつぶしを行った。その結果、図 5.6 と図 5.7 を比較すると左側に存在していたノイズが消えていることが確認できる。なお、本研究では果実の抽出処理を簡略化するために背景を白色とした。



Fig 5.4 RGB image

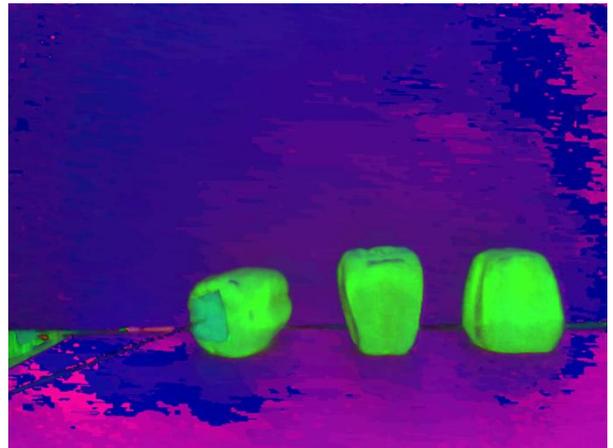


Fig 5.5 HSV model



Fig 5.6 Binarized image



Fig 5.7 Noise removed image

Table 5.3 Threshold values

	Min	Max
Hue Threshold (0.000~1.000)	0.162	0.298
Saturation Threshold (0.000~1.000)	0.176	1.000
Value Threshold (0.000~1.000)	0.094	0.424

### 5.3 RGBD カメラと果実の距離の計算方法

本節で使用する記号について、表 5.4 に示す。

Table 5.4 symbols used 1

[F <sub>x</sub> F <sub>y</sub> F <sub>z</sub> ]	: 果実の位置[mm]
[P <sub>x</sub> P <sub>y</sub> ]	: 画像内での果実の中心位置[px]
W	: 深度 F <sub>z</sub> での水平方向の画角に写る実際の距離[mm]
H	: 深度 F <sub>z</sub> での鉛直方向の画角に写る実際の距離[mm]

RGBD カメラと果実の中心の相対距離を求める方法について説明する。図 5.4 に水平方向におけるカメラと果実の位置関係、図 5.5 に垂直方向におけるカメラと果実の位置関係を示す。また、果実の位置を[F<sub>x</sub> F<sub>y</sub> F<sub>z</sub>]、画像上での果実の中心座標を[P<sub>x</sub> P<sub>y</sub>]と定義する。深度情報については画像上の画素座標を基に求めることができる。そのため、果実の中心位置[P<sub>x</sub> P<sub>y</sub>]より果実の深度方向の位置 F<sub>z</sub> が求められる。

#### 5.3.1 水平方向の距離 F<sub>x</sub> の算出

果実が存在する深度 F<sub>z</sub> において、カメラの水平方向の視野角に写る実際の距離 W は式(5.1)で求められる。また、水平方向の視野角は表 5.1 より 69 度である。

$$W = F_z \tan \frac{69}{2} \quad (5.1)$$

画像内の果実の中心位置は 0 から 640px の範囲にあるため、果実の水平方向の位置 F<sub>x</sub> は式(5.2)で求まる。

$$F_x = W \frac{P_x}{320} \quad (5.2)$$

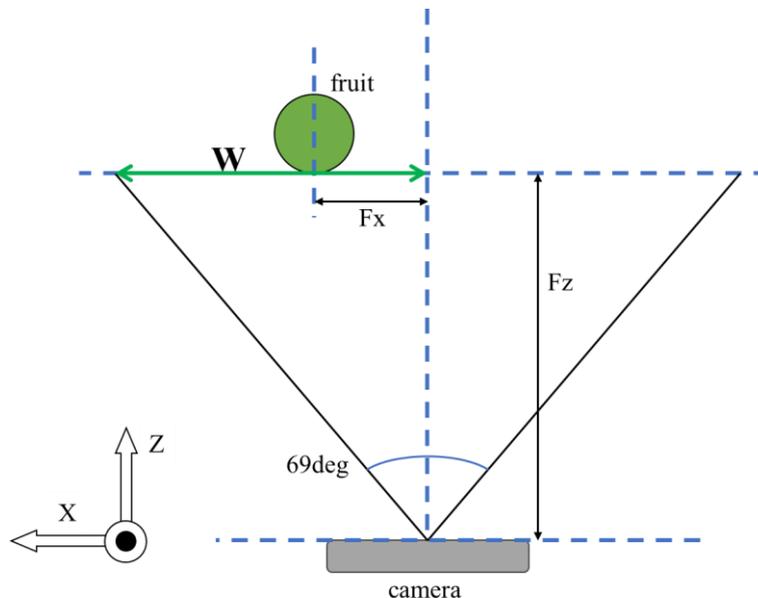


Fig 5.8 Positional relationship between camera and fruit in the horizontal direction

#### 5.3.2 鉛直方向の距離 F<sub>y</sub> の算出

果実が存在する深度 F<sub>z</sub> において、カメラの鉛直方向の視野角に写る実際の距離 H は式(5.3)で求められる。

る。また、鉛直方向の視野角は表 5.1 より 42 度である。

$$H = Fz \tan \frac{42}{2} \quad (5.3)$$

画像内の果実の中心位置は 0 から 480px の範囲にあるため、果実の水平方向の位置  $Fy$  は式(5.4)で求まる。

$$Fy = H \frac{Py}{240} \quad (5.4)$$

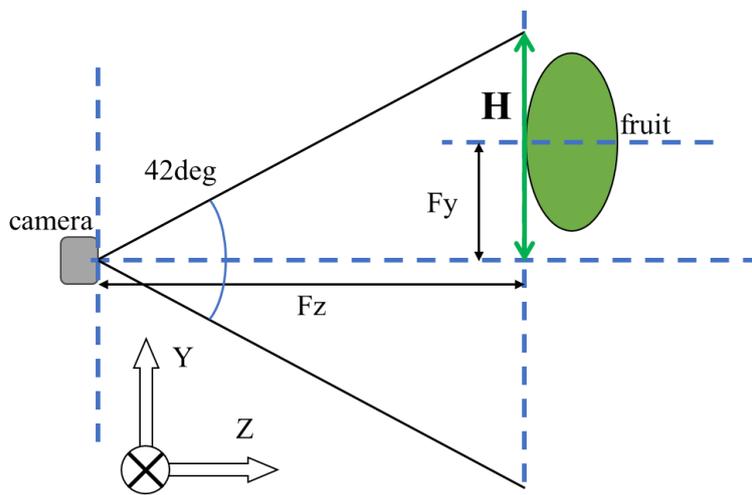


Fig 5.9 Positional relationship between camera and fruit in the vertical direction

## 第 6 章 屈曲動作の制御方法

### 6.1 穴 1 と屈曲方向とのなす角

本節で使用する記号について、表 6.1 に示す。

Table 6.1 symbols used 2

$\gamma$	:	穴 1 と屈曲方向とのなす角[° ]
$\alpha$	:	座標変換に必要な回転角度[° ]
[Hx Hy]	:	穴 1 の座標[mm]
[Hx' Hy']	:	座標変換後の穴 1 の座標[mm]
[Fx Fy Fz]	:	果実の位置[mm]
[Fx' Fy' Fz']	:	座標変換後の果実の位置[mm]

ワイヤ 1 が通過する穴 1 と原点を結ぶ線と屈曲方向とのなす角 $\gamma$ を求める方法について説明する。

ワイヤ 1 が通過する穴を穴 1, ワイヤ 2 が通る穴を穴 2, ワイヤ 3 が通る穴を穴 3 と定義する。また, 穴 1 の座標を[Hx Hy]とする。図 6.1 および図 6.2 に示すように、緑の矢印は果実が存在する方向、すなわち屈曲方向を表す。

今後の算出をしやすくするために、Z 軸を基準に座標変換を行う。果実が存在する方向を X' 軸方向、これに垂直な方向を Y' 軸方向とする。この座標変換に必要な回転角度 $\alpha$ は果実の位置情報[Fx Fy Fz]が与えられた場合、式(6.1)で求まる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{Fy}{Fx} \quad (6.1)$$

座標変換を行った様子を図 6.1 に示す。また、見やすさを考慮して X' 軸を水平方向、Y' 軸を鉛直方向に配置した図を図 6.2 に示す。

座標変換前の穴 1 の座標は[Hx Hy]であったが、座標変換後の穴 1 の座標[Hx' Hy']は方向余弦より式(6.2)式(6.3)で求まることができる。

$$Hx' = Hx \cos \alpha + Hy \sin \alpha \quad (6.2)$$

$$Hy' = -Hx \sin \alpha + Hy \cos \alpha \quad (6.3)$$

ここで座標変換を行ったので果実の位置[Fx Fy Fz]も X'Y'Z'座標で表す必要がある。座標変換後の果実の位置[Fx' Fy' Fz']は式(6.5)式(6.6)式(6.7)で求まることができる。

$$Fx' = Fx \cos \alpha + Fy \sin \alpha \quad (6.5)$$

$$Fy' = -Fx \sin \alpha + Fy \cos \alpha \quad (6.6)$$

$$Fz' = Fz \quad (6.7)$$

Hx' Hy'を求めることができたので、穴 1 と屈曲方向とのなす角 $\gamma$ を式(6.4)より求めることができる。

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{Hy'}{Hx'} \quad (6.4)$$

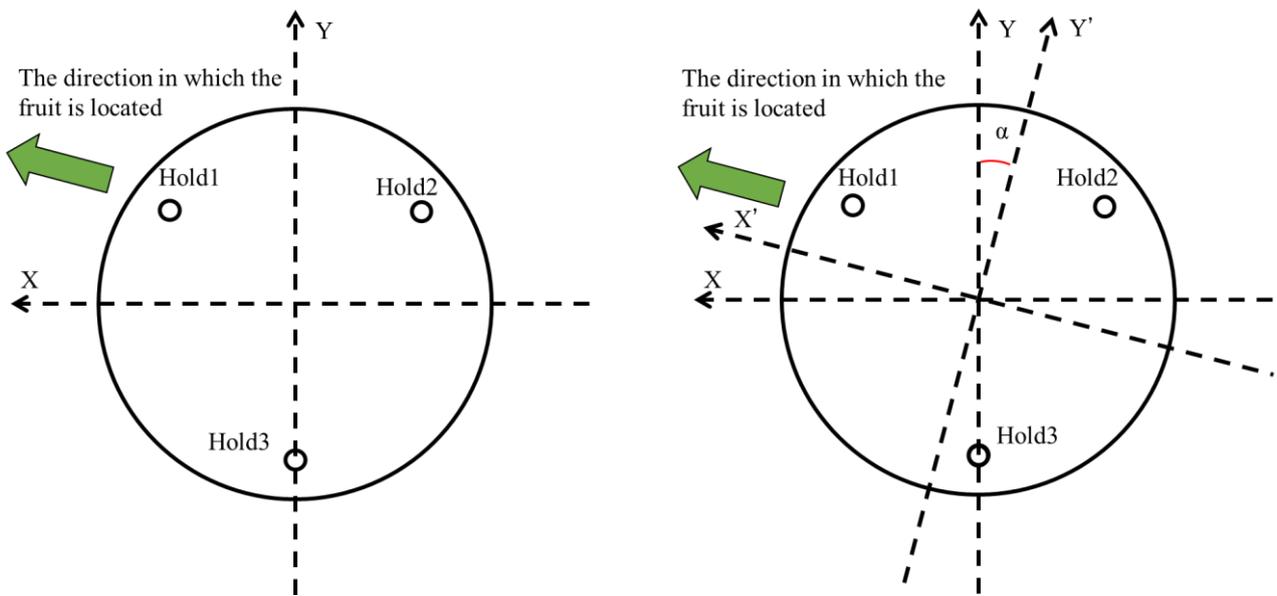


Fig 6.1 Transformed coordinates in the bending direction

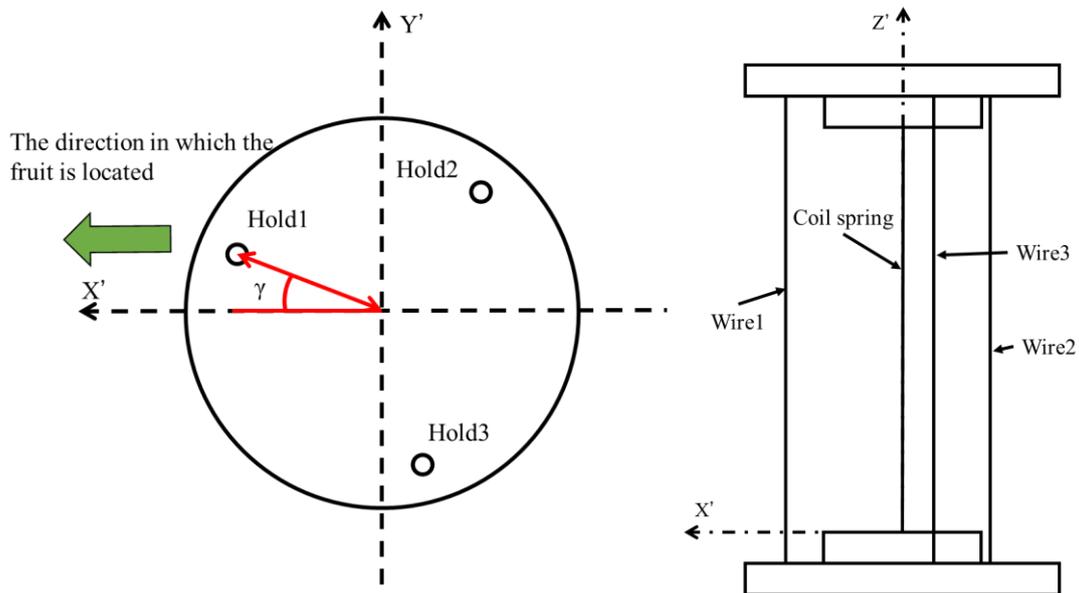


Fig 6.2 Reoriented coordinate system with X' horizontal and Y' vertical

## 6.2 屈曲角

本節で使用する記号について、表 6.2 に示す。

Table 6.2 symbols used 2

$\beta$	:	コイルばねの屈曲角度[°]
$[F_x' F_y' F_z']$	:	座標変換後の果実の位置[mm]
$[S_x' S_z']$	:	座標変換後のコイルばねの先端の位置[mm]
$r$	:	コイルばねの曲率半径[mm]
$b$	:	Z 切片
$M_1$	:	各屈曲角度に対する傾き[-]
$M_2$	:	実際の傾き[-]

コイルばねが果実の方向に屈曲するために必要な角度、屈曲角度 $\beta$ を求める方法について説明する。

図 6.3 に果実の方向にコイルばねが屈曲している様子を示しており、コイルばねの先端と果実の中心を結ぶ線の傾きを求めることで屈曲角度 $\beta$ を算出できる。しかし、深度カメラで取得できる情報は果実の位置情報 $[F_x' F_y' F_z']$ のみであり、コイルばねの先端の位置を直接計測することができない。このため、屈曲角度 $\beta$ を直接的に求めることは困難である。

そこで、事前に各屈曲角度に対する傾き $M_1$ 、Z 切片  $b$ 、コイルばねの先端の位置 $[S_x' S_z']$ を求め、それらと果実の位置情報を比較することで屈曲角度を推定できると考える。今回、屈曲角度を 0 度から 110 度まで 0.03 度刻みごとの傾き $M_1$ 、Z 切片  $b$ 、コイルばねの先端の位置 $[S_x' S_z']$ をあらかじめ求める。また、刻み幅が 0.03 度である理由は使用するサーボモータの最小制御可能角度が 0.03375 度<sup>(1)</sup>であることに基づいて決定した。この結果、求める傾き $M_1$ 、Z 切片  $b$ 、先端位置 $[S_x' S_z']$ は合計で 3667 種類となる。

ここから傾き $M_1$ 、Z 切片  $b$ 、コイルばねの先端の位置座標 $[S_x' S_z']$ を事前に求めていく。

まず初めに各屈曲角度 $\beta$ の傾き $M_1$  を式(6.8)で求める。

$$M_1 = \tan(90 - \beta) \quad (6.8)$$

次にコイルばねの先端位置 $[S_x' S_z']$ を求める。これを算出するには、コイルばねの曲率半径  $r$  が必要となる。今回、コイルばね長さ $L$ は屈曲時でも、コイルばねの中心軸の長さは変化しないと考えると式(6.9)で曲率半径  $r$  を求められる。

$$r = \frac{360L}{2\pi\beta} \quad (6.9)$$

この式はコイルばねが円弧状に屈曲すると仮定し、円弧の長さと角度の関係から導出される。

曲率半径  $r$  が求まると、コイルばねの先端の位置 $[S_x' S_z']$ を式(6.10)式(6.11)で求められる。

$$S_x' = r - r \cos \beta \quad (6.10)$$

$$S_z' = r \sin \beta \quad (6.11)$$

これにより、各屈曲角度におけるコイルばねの先端位置を特定できる。

次に Z 切片  $b$  を求めていく。

コイルばねの先端と果実の中心を結ぶ線は 1 次関数で表せる。1 次関数の式は式(6.12)の通りである。

$$Y = aX + b \quad (6.12)$$

ここで、 $X$  に対するのがコイルばねの先端の  $X'$ 座標 $S_x'$ 、 $Y$  に対するのがコイルばねの先端の  $Y'$ 座標 $S_z'$ 、 $b$  に対するのが Z 切片  $b$  である。

したがって、Z 切片  $b$  は式(6.13)で求められる。

$$b = S_z' - M_1 \times S_x' \quad (6.13)$$

次に、果実の位置 $[F_x' F_y' F_z']$ と先に求めた各 Z 切片  $b$  を用いて式(6.14)より実際の傾き $M_2$ を求めていく。

$$M_2 = \frac{F_z' - b1}{F_x'} \quad (6.14)$$

これは、果実の中心位置と Z 切片を結ぶ直線の傾きを表している。

先に求めた各屈曲角度 $\beta$ に対する傾き $M_1$ は 3667 種類ある。このため、実際の傾き $M_2$  と事前に算出した傾き $M_1$ を比較し、最も一致する屈曲角度 $\beta$ を求める。

$$\min|M_1 - M_2| \quad (6.15)$$

式(6.15)は、 $M_1$ と $M_2$ の差が最小となる値を求めている。最も差が少なかった値となった時の角度が、コイルばねが屈曲すべき角度(屈曲角度) $\beta$ である。

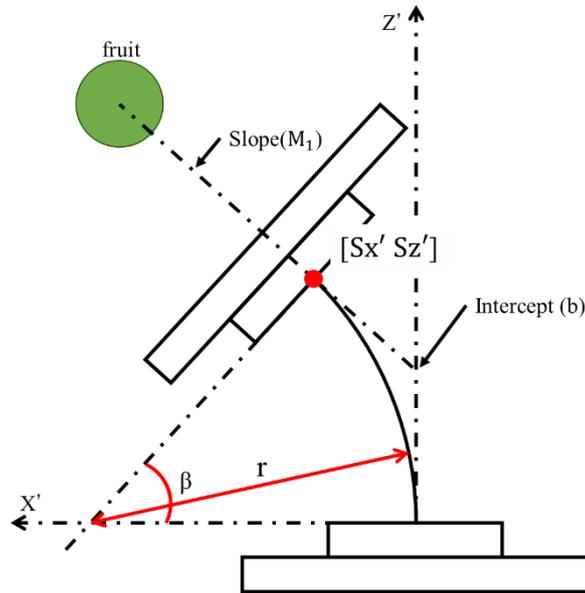


Fig 6.3 Bending of the coil spring toward the fruit direction

### 6.3 屈曲制御

本節で使用する記号について、表 6.3 に示す。

Table 6.3 symbols used 3

$\gamma$	: 穴 1 と屈曲方向とのなす角[° ]
$\beta$	: コイルばねの屈曲角度[° ]
$\theta$	: ワイヤと赤色の点線とのなす角[° ]
$R$	: 円中心から各ワイヤが通る穴までの距離[mm]
$L$	: コイルばねの長さ[mm]
$r$	: コイルばねの曲率半径[mm]
$t$	: コイルばねの固定具の厚さ[mm]
$r_1$	: Y'軸と穴 1 との距離[mm]
$r_2$	: Y'軸と穴 2 との距離[mm]
$r_3$	: Y'軸と穴 3 との距離[mm]
$h_1$	: ワイヤ 1 に対応する赤色の実線の長さ[mm]
$h_2$	: ワイヤ 2 に対応する赤色の実線の長さ[mm]
$h_3$	: ワイヤ 3 に対応する赤色の実線の長さ[mm]
$H_1$	: 屈曲時のワイヤ 1 の長さ[mm]
$H_2$	: 屈曲時のワイヤ 2 の長さ[mm]
$H_3$	: 屈曲時のワイヤ 3 の長さ[mm]
$W_1$	: ワイヤ 1 の巻き取り量[mm]
$W_2$	: ワイヤ 2 の巻き取り量[mm]
$W_3$	: ワイヤ 3 の巻き取り量[mm]

ワイヤ1から3の巻き取り量を制御することで、摘み取りハンドを任意の角度に屈曲させる。そこで、本節ではワイヤ1からワイヤ3の巻き取り量 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ を算出する方法について説明する。

ワイヤの巻き取り量を求めるためにはまず、Y'軸と各穴との距離 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ を算出する必要がある。これらの距離は式(6.16)、式(6.17)、式(6.18)より求められる。

$$r_1 = R \cos \gamma \quad (6.16)$$

$$r_2 = R \cos(\gamma + 120) \quad (6.17)$$

$$r_3 = R \cos(\gamma + 240) \quad (6.18)$$

コイルばねは円形上の固定具に挟まれている構造となっている。これにより、ワイヤの巻き取り量を算出する際は、コイルばねの固定具の厚さ $t$ を考慮する必要がある。

まず、図6.5に示す赤色の実線の長さ $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ は式(6.19)で計算できる。

$$h_n = 2(r - r_n) \sin \frac{\beta}{2} \quad (6.19)$$

ここで $n=1, 2, 3$ に対応するワイヤについてそれぞれの長さを求めると、

$$h_1 = 2(r - r_1) \sin \frac{\beta}{2} \quad (6.20)$$

$$h_2 = 2(r - r_2) \sin \frac{\beta}{2} \quad (6.21)$$

$$h_3 = 2(r - r_3) \sin \frac{\beta}{2} \quad (6.22)$$

となる。

次に各ワイヤの長さ $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ は式(6.23)から(6.25)によって求められる。

$$H_1 = h_1 + 2t \cos \theta \quad (6.23)$$

$$H_2 = h_2 + 2t \cos \theta \quad (6.24)$$

$$H_3 = h_3 + 2t \cos \theta \quad (6.25)$$

ここで $\theta$ はワイヤと赤色の点線とのなす角であり、式(6.26)で求められる。

$$\theta = 90 - \frac{180 - \beta}{2} \quad (6.26)$$

最後にワイヤの巻き取り量 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ を求める。これはワイヤの元の長さから屈曲時のワイヤの長さ $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ を差し引くことで求められる。

$$W_1 = L + 2t - H_1 \quad (6.27)$$

$$W_2 = L + 2t - H_2 \quad (6.28)$$

$$W_3 = L + 2t - H_3 \quad (6.29)$$

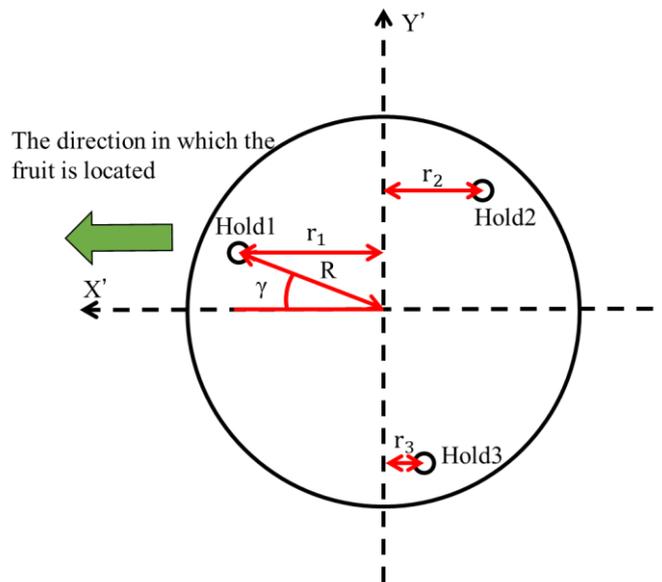


Fig6.4 Relationship between the  $Y'$  axis and the distance to each hole

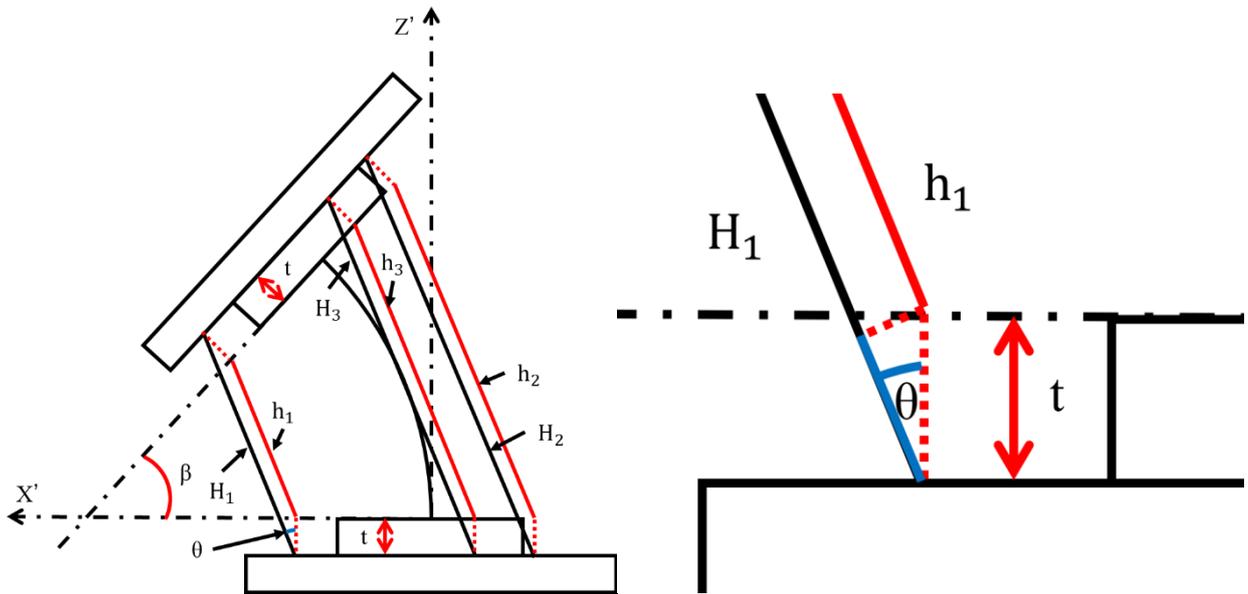


Fig6.5 Length of each wire during bending

## 第7章 屈曲制御実験

### 7.1 実験方法

前章で屈曲の制御方法を明らかにした。そこで、本実験では実際に果実の方向へ屈曲が可能であるかを確認する。図 7.1 に実験装置の構成を示す。

図 7.1 に示すカメラ①は深度カメラであり、このカメラを用いて果実の位置情報を取得する。また、カメラ②はハンド先端が実際に果実の方向へ適切に屈曲しているか確認するために使用する。

なお、カメラ②を設置するためにハンド部品を取り外した状態で実験を行った。

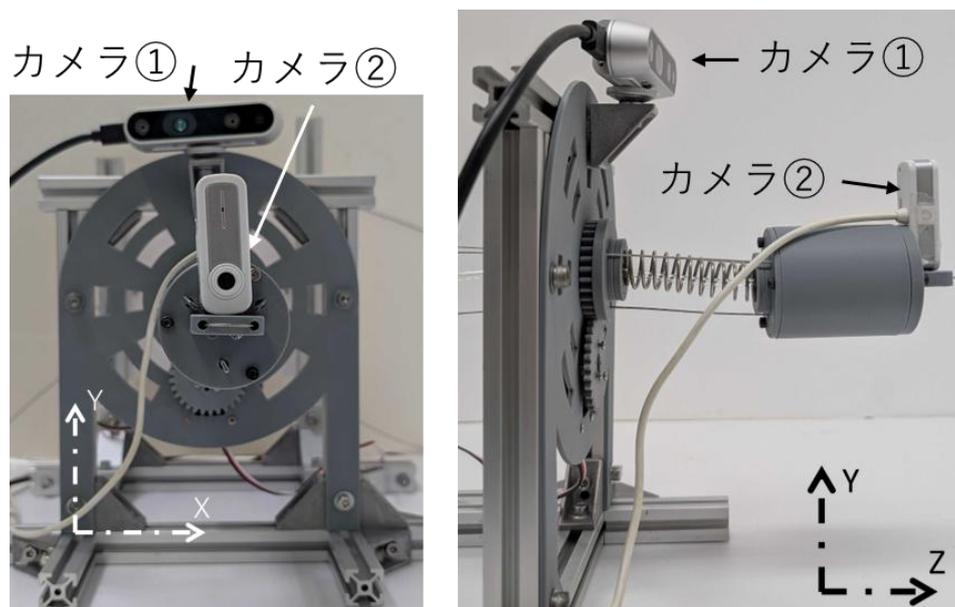


Fig7.1 Experimental Apparatus

### 7.2 実験結果

図 7.2 にカメラ②の画像を図 7.3 に鉛直方向、水平方向から見た屈曲動作後の摘み取りハンドを示す。

まず、図 7.2 のカメラ②の画像を確認すると、果実の一部しか写っていないことが分かる。また、画像の中心座標と果実の一部までの距離は X 軸方向において 61px、Y 軸方向において 300px のずれが生じていることが確認された。この結果より、X 軸方向の誤差に比べて Y 軸方向の誤差が大きくなっていることが分かる。

次に図 7.3 に示す鉛直方向および水平方向の画像を確認した。鉛直方向から観察すると、ハンド先端は概ね果実の方向に向いており、適切に屈曲していると判断できる。しかし、水平方向からの観察では、ハンド先端が果実の方向に正確に向いていないことが分かった。

これらの結果より摘み取りハンドの屈曲動作には何らかの誤差要因が影響していると考えられる。誤差の原因として Y 軸方向に大きな誤差が発生しているため、重力による外乱が発生している可能性が高いと考えられる。そのため、今後 FB 制御を用いて重力による外乱の影響を低減することを試みる。

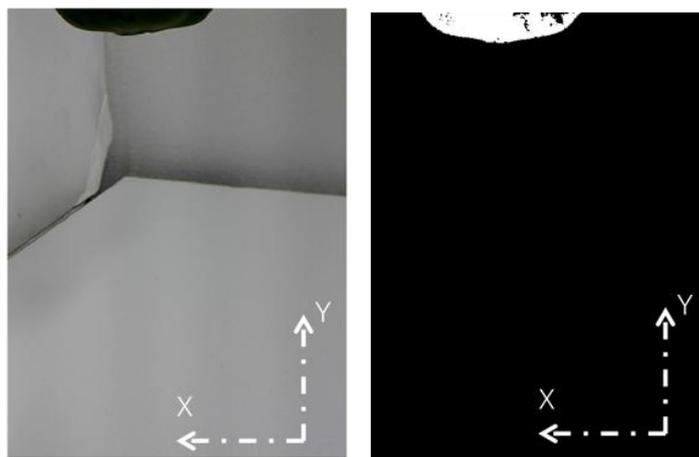


Fig7.2 Image from camera ②

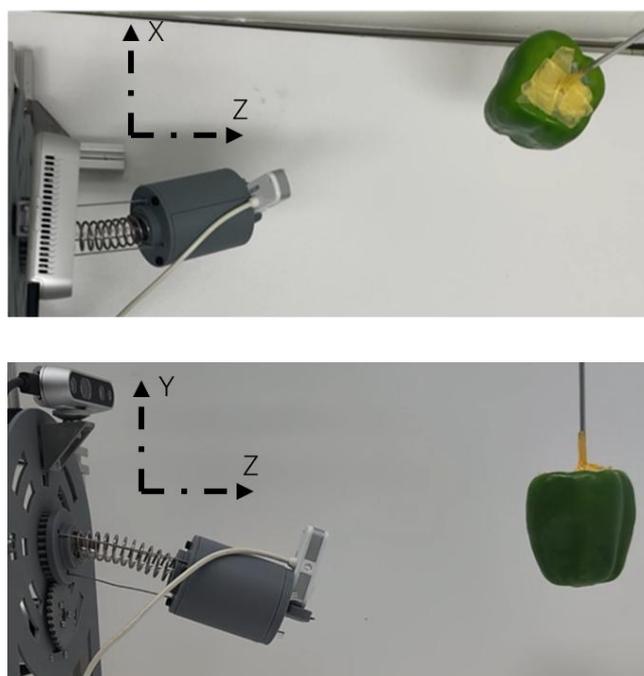


Fig7.3 Images in the vertical and horizontal directions (Top: Vertical, Bottom: Horizontal)

### 7.3 問題点

屈曲制御実験を行っている際にハンド先端がカメラ①の視界を塞ぐことが確認された。その様子を図7.4に示す。本実験で使用したプログラムはカメラ①が果実を視認できなくなった場合に動作を停止する。そのため、ハンド先端がカメラ①の視界が塞ぐことで、果実の位置情報を取得できなくなり、動作を停止してしまう可能性があることが分かった。

この問題に対し、3つの対策案がある。1つ目がプログラムの改良である。カメラ①が果実を視認できなくなった場合が一定時間発生すると初期位置に戻るようなプログラムにすると解決することが可能と考える。

2つ目の対策として深度カメラの増設である。深度カメラが複数台あることにより、片方のカメラの視界が塞がれた場合でも、もう片方のカメラによって果実の位置情報を取得し続けることが可能となる。

3つ目の対策は深度カメラの設置位置の検討である。深度カメラとハンド先端が重ならないように設置することで、視界が塞がれることが無くなる。

これらの対策により視界が塞がれる問題は解決できると考えられる。



Fig7.4 Camera ①'s view being blocked

## 第8章 結言

コイルばねによる柔軟性とワイヤ駆動による軽量化摘み取り機構を提案・製作を行った。学士課程で製作した摘み取りハンドからワイヤの本数を増やした。これにより屈曲可能な範囲を増やすことができた。また、ハンド部品のみを作動させた際、本来屈曲動作は起こらないはずだが、意図しない屈曲が発生してしまった。この原因としてハンド部品を作動させるワイヤがコイルばねの中心軸を通っていないからと考えた。そこで、コイルばねの中心軸にアウターケーブル、エアチューブを取り付けて意図しない屈曲を防ごうとした。また、アウターケーブルを使用したコイルばねをアウターケーブル型、エアチューブを使用したコイルばねをエアチューブ型と名付けた。アウターケーブル型、エアチューブ型の結果はアウターケーブル型が原点から 30.7mm の誤差が発生し、エアチューブ型が原点から 31.8mm の誤差が発生し、意図しない屈曲を防ぐことができなかった。その原因としてハンド部品を作動させるワイヤの張力がコイルばねに伝わることにより意図しない屈曲が発生すると考えた。そこでコイルばねにワイヤを通らせない仕組みとしてエアシリンダを使用することとした。また、エアシリンダを用いているのでこの摘み取りハンドをシリンダ型と名付けた。シリンダ型も同様の実験を行った。その結果原点からの誤差は 1.20mm と大幅に減少し、意図しない屈曲を防ぐことができた。

また、深度カメラの精度を確かめる実験を行った。100mm から 600mm まで 100mm 刻みで壁に向かい距離を測定した。その結果、300mm と 400mm が距離の誤差が少ないことがわかった。そのため、深度カメラの設置位置は果実から 300mm から 400mm 離れた位置に設置すると良いと考えられる。

さらに、屈曲動作の制御方法を導出し、屈曲制御実験を行った。実験結果はハンド先端に設置したカメラ②には果実の一部分しか写っていなかった。その原因として鉛直方向に大きな誤差があったため、重力による外乱が影響していると考えた。そこで、今後 FB 制御を用いて重力による外乱の影響を低減することを試みる。

## 謝辞

本研究を行うにあたって、懇切丁寧にご指導いただきました岡宏一教授に感謝申し上げます。

本研究は、高知県が進めるプロジェクト[“IoP(Internet of Plant)”が導く「NEXT 次世代型施設園芸農業」への進化]の助成により行っています。この場をお借りして感謝申し上げます。本研究を行うにあたって KUT ハウスの提供して頂いた永野様、IoP 推進事務室の佐藤様に感謝申し上げます。

様々な助言をして頂いた研究室の皆様、卒業した先輩方に心から感謝申し上げます。また、さまざまな方々と出会うことが出来たおかげで 6 年間の大学生活は楽しく過ごすことが出来ました。大学生活を通じて関わってくださった皆様に心から感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 農林水産省 農業労働力に関する統計  
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>  
(参照日 2025 年 1 月 20 日)
- (2) 農林水産省 令和 5 年新規就農者調査結果  
[https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka\\_gaiyou/sinki/r5/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sinki/r5/index.html)  
(参照日 2025 年 1 月 20 日)
- (3) 農林水産省 スマート農業をめぐる情勢(R7.1 月版) P19  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/attach/pdf/index-243.pdf>  
(参照日 2025 年 1 月 23 日)
- (4) 農林水産技術会議 「スマート農業実証プロジェクト」について  
[https://www.affrc.maff.go.jp/docs/smart\\_agri\\_pro/smart\\_agri\\_pro.htm](https://www.affrc.maff.go.jp/docs/smart_agri_pro/smart_agri_pro.htm)  
(参照日 2025 年 1 月 24 日)
- (5) ヤンマーホールディングス株式会社 ROBOT TRACTOER  
<https://www.yanmar.com/jp/about/technology/vision2/robotics.html>  
(参照日 2025 年 1 月 28 日)
- (6) ヤンマーホールディングス株式会社 「ヤンマー大玉トマト収穫ロボット」試作機を「2022 国際ロボット展」へ出展  
<https://www.yanmar.com/jp/news/2022/03/01/104681.html>  
(参照日 2025 年 1 月 24 日)
- (7) 園田昇平, 岡宏一, 原田明徳, ”ピーマンの果実摘み取りハンドの開発”  
学士学位論文, 高知工科大学(2022)
- (8) 近藤科学株式 KRS-6003HV  
<https://kondo-robot.com/product/krs-6003hv-ics-red-version>  
(参照日 2025 年 2 月 10 日)
- (9) 株式会社スター精密 マイクロミニシリンダー  
[https://www.eins1.jp/index.php?route=product/product&path=2801&product\\_id=200123](https://www.eins1.jp/index.php?route=product/product&path=2801&product_id=200123)  
(参照日 2025 年 2 月 10 日)
- (10) インテル株式会社 Intel RealSense Depth Camera D435i  
<https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>  
(参照日 2025 年 2 月 3 日)
- (11) 近藤科学株式 ICS 変換基板の使用方法 (2) サーボ制御編  
[https://kondo-robot.com/faq/ics\\_board\\_tutorial2](https://kondo-robot.com/faq/ics_board_tutorial2)  
(参照日 2025 年 3 月 2 日)