

平成 31 年度修士論文

双腕ロボットによる 食材の串刺し操作に関する研究

大学院情報理工学研究科
情報学専攻

学 籍 番 号 : 1830122
氏 名 : LI ANG
主任指導教員 : 末廣 尚士 教授
指 導 教 員 : 工藤 俊亮 准教授
提出年月日 : 令和 2 年 01 月 27 日 (月)

目次

第1章 緒言	8
1.1 研究背景	8
1.2 関連研究と考察	10
1.3 研究目的	10
1.4 論文構成	11
第2章 串刺し操作に関する提案および検討	12
2.1 前提条件とその妥当性	12
2.2 串刺し操作に関する要素	13
2.2.1 串の把持	13
2.2.2 食材の把持	14
2.2.3 刺す操作	14
2.3 SPG モデル	15
2.3.1 食材座標系	15
2.3.2 ユーザーが指示した串の刺し方向 (Skewering)	16
2.3.3 食材の置かれ方 (Posture)	17
2.3.4 食材の把持 (Gripping)	18
第3章 システム概要	19
3.1 ハードウェア	19
3.1.1 双腕ロボット	19
3.1.2 ツール座標系	21

3.1.3	力覚センサ	22
3.1.4	視覚センサ	22
3.1.5	グリップ	23
3.2	ソフトウェア	26
3.2.1	OpenRTM	26
3.2.2	PCL(Point Cloud Library)	28
第4章	串刺し操作の実装	30
4.1	串の把持	30
4.1.1	串の認識	30
4.1.2	串把持用のエンドエフェクタ	32
4.2	食材の把持	34
4.2.1	食材の認識	34
4.2.2	食材把持用のエンドエフェクタ	35
4.2.3	食材の把持動作	36
4.3	刺す操作	41
4.3.1	刺す操作におけるロボットの姿勢	41
4.3.2	力制御による刺す操作	41
第5章	実験	44
5.1	実験結果の判定基準	44
5.2	串の把持実験	45
5.2.1	実験内容	45
5.2.2	実験用具	45
5.2.3	実験過程	46
5.2.4	実験結果	47
5.3	食材の把持実験	47

5.3.1	実験内容	47
5.3.2	実験用具	48
5.3.3	実験結果	48
5.4	SPG モデル検証実験	49
5.4.1	実験内容	49
5.4.2	水平刺し動作による $S_2P_2G_{13}$	50
5.4.3	垂直刺し動作による $S_1P_2G_{13}$	51
5.4.4	結果と考察	52
第 6 章	多様な食材に対応するための拡張	53
6.1	現在対応不能な食材の分類	53
6.1.1	平行な面がないもの	53
6.1.2	崩れやすいもの	54
6.1.3	滑りやすいもの	54
6.1.4	柔らかく変形が激しいもの	54
6.1.5	硬いもの	54
6.2	解決策	55
6.2.1	新しい食材用エンドエフェクタ	55
6.2.2	ねじる操作	58
6.3	実験	59
6.3.1	新しいエンドエフェクタに対応可能な食材の検証	59
6.3.2	串をねじる操作の有効性検証	64
6.3.3	複数食材の串刺し操作実験	68
第 7 章	結言	73
7.1	まとめ	73
7.2	今後の展望	74

目 次

1.1	世界のサービスロボット市場規模の推移及び予測	8
2.1	食材座標系	16
2.2	ユーザーが指示した串の刺し方向	17
2.3	食材の置かれ方	17
2.4	グリッパの k 軸と l 軸（左）と把持表現の例（中・右）	18
3.1	ロボットシステム	20
3.2	ツール座標系	21
3.3	力センサおよび性能データ	22
3.4	Realsense D435	23
3.5	平行グリッパ	24
3.6	平行グリッパ設計図	25
3.7	全体の接続	26
3.8	VPython	27
4.1	視点の説明	31
4.2	串把持用のエンドエフェクタその 1	33
4.3	串把持用のエンドエフェクタその 2	33
4.4	食材の認識	35
4.5	食材把持用のエンドエフェクタ	35
4.6	悪い例その 1	36

4.7	悪い例その2	37
4.8	可能であれば避けたい例	38
4.9	良い例	39
4.10	水平刺し姿勢	41
4.11	垂直刺し姿勢	41
4.12	力制御における力と速度の関係	42
5.1	実験用の串	45
5.2	串の把持動作	46
5.3	実験食材	48
5.4	にんじんの把持	48
5.5	ジャガイモの把持	48
5.6	トマトの把持	48
5.7	ウインナーの把持	48
5.8	初期状態	49
5.9	$S_2P_2G_{13}$ 一連動作	50
5.10	$S_1P_2G_{13}$ 一連動作	51
6.1	ジャガイモ刺し通し実験	55
6.2	新しいエンドエフェクタ	56
6.3	新しいエンドエフェクタによる力分析	56
6.4	串とエンドエフェクタの干渉の解消	57
6.5	マルチスレッド	58
6.6	初期状態	59
6.7	丸く滑りやすいトマトに対する実験	60
6.8	トマトに対する実験結果	61
6.9	時間と力の関係図	61

6.10 時間と速度の関係図	62
6.11 薄切り肉	62
6.12 薄切り肉が把持された様子	63
6.13 薄切り肉に対する作業結果	63
6.14 ねじる操作を検証するためのにんじん	64
6.15 串をねじる実験における共通過程	65
6.16 ねじる操作における力と時間の関係図	66
6.17 ねじる操作における速度と時間の関係図	67
6.18 複数食材の串刺し操作実験の食材座標系	68
6.19 トマトに対する一連の動作	69
6.20 にんじんに対する一連の動作	70
6.21 ウィンナーに対する一連動作	71
6.22 統合実験の結果	72

表 目 次

4.1	食材の把持動作 G の評価	40
6.1	更新された食材の把持動作 G の評価	57

第1章 緒言

1.1 研究背景

近年，少子高齢化や人口減少などの要因によって不足する働き手を補うサービスロボットは，今後大幅に増えていくと予想されており，

総務省元年版情報通信白書によると (図 1.1)，2020 年にはグローバルでは 149.4 億ドルの市場規模に到達するといわれている [1]．

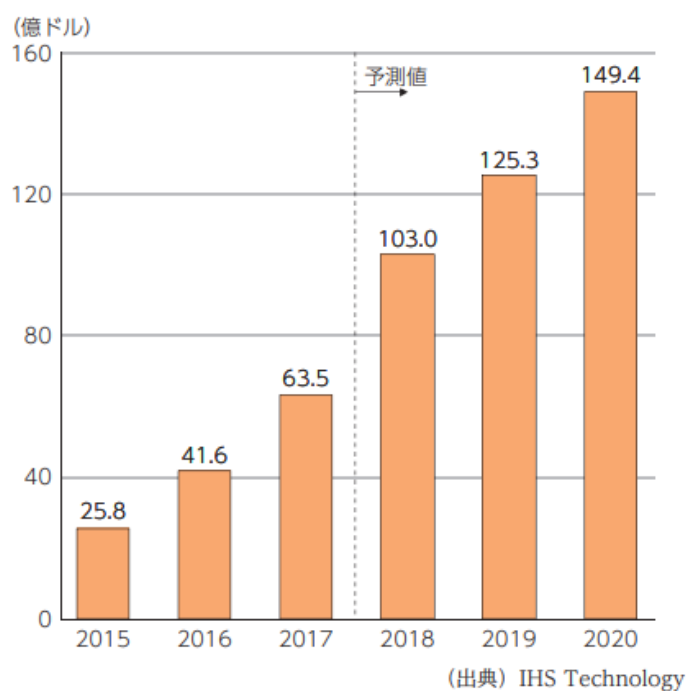


図 1.1: 世界のサービスロボット市場規模の推移及び予測

サービスロボットは主に汎用や産業用と区別される．その中でも家庭や店舗内での作業を補助・代行するロボットが近年盛んに研究・開発されている．家庭用ロボットはユカイ工学社

製「BOCCO」が挙げられる．玄関や冷蔵庫に開閉センサーを設置することで，子供の帰宅等の行動を保護者に通知することができる．また，店舗用ロボットはソフトバンクロボティクス社製「ペッパー」が挙げられる．標準で簡単な会話が可能である．このように単一の作業を専門に行うロボットは商用化レベルで存在している．しかし，より複雑な作業を汎用的に行うロボットは商用化に至っていない．

料理ロボットはサービスロボットの研究の一分野として研究されているが，複雑な料理作業を汎用的に行うロボットは未だ商用化に至っていない．料理をする際に求められる作業は多岐にわたり，それらをロボットで一括して全て実現することは困難である．従って，汎用料理ロボットの発展には，1つ1つの機能をモジュール化し，完成度を高めていく必要があると想定している．

串刺しは料理でよく見られる調理操作の1つである．串刺しとは，串など棒状のもので食材を刺し通すことであり，またはそのような状態の成果物を指す．食材は豚や鶏などに限らず，ピーマンや玉ねぎ，椎茸やトマトもよく使われる．本研究では，汎用料理ロボットにおける串刺し操作を扱うこととする．

串刺し作業は料理ロボットの1つの機能モジュールである．串刺し作業を実現させるためには，「対象物」として串や食材に対する一連の操作を実行する必要がある．本論文では，串刺し作業を3つの段階に分ける．まずは串を扱う段階で，提案した串に対する認識手法と実装されたエンドエフェクタを用いて，串を把持する．次に食材を把持する段階である．提案した串刺しの記述手法からロボットの動作手順を生成し，食材の把持動作を実装する．最後には刺す段階である．把持された食材の姿勢や硬さにより，刺す動作を実行する．3つの段階を合わせ，本研究は料理ロボットの1つの機能モジュールを実現することを目指す．更に，本研究で提案した対象物に対して操る手法は汎用性があり，他の料理作業に寄与する．串刺し作業を実現できれば，料理ロボットの完成度が上がり，より汎用的になる．

1.2 関連研究と考察

料理に関するサービスロボットの研究は多数あげられる．A.Pettersson ら [2] による食品把持用の磁気粘性を利用したグリッパの開発,Gallenberger ら [3] による食材をフォークで刺して人に食べさせるロボットシステムの提案などがあげられる．その中に，レシピや指示を用いて特定の料理を作るロボットシステムの提案が行われている．Beetz.M ら [4] によるインターネット上の指示に基づいた2つのロボットが協力してパンケーキを作るシステムの提案，Bollini ら [5] による自然言語のレシピから翻訳された指示を用いてベーキング操作を行うロボットシステムなどがあげられる．しかし，串刺しに対する汎用的なシステムに関する提案は少ない．様々な串と食材をロボットに扱わせることは難しい．串は形状として，丸串，角串，平串，鉄砲串など多くの種類が存在する．産業用の串刺し専用機は，コジマ技研社によるパレット方式で一度に5本ずつの串刺しを行うことができる．しかし，産業用の串刺し専用機は人間の介入が必要であり，かつ単一の機能しかないので，工場以外の場所には向いていない．串刺し操作を実現することができた場合，汎用的な料理ロボットの発展に寄与することができると思定している．

1.3 研究目的

本研究の目的は，双腕ロボットシステムを用いて串刺し操作を実現することである．この目的に当たって以下のような課題の解決が必要である．

1. 串刺し操作を実現するための要素の検討
2. 実世界における作業の記述を抽象的なロボット操作へ変換する手法の検討
3. ロボット操作の実装

1において，串刺し操作を実現するために必要な要素を洗い出し，実装する具体的な操作の検討を行う．操作は，できるだけ道具や環境に限定されず汎用性の高さを保持するようなものを考える．

2において、実世界における串刺し作業を記述するための記述方法を提案し、ロボットの動作手順を生成する手法を提案する。

3において、提案した手法をロボットシステムへ実装する。本研究でまとめた結果を評価する基準を用いて、提案手法に対する評価実験を行う。

1.4 論文構成

本論文の構成を紹介する。第2章は串刺しを作成するために必要な要素を洗い出し、幾つかの手法を提案する。第3章は実験のためのロボットシステムについて説明する。第4章は2章で提案した手法を実装する。第5章では提案した手法を検証するための実験を行う。第6章は現在実装されている手法やハードウェアの不足について検討し、多様な食材に対応するための拡張を行う。第7章は最後のまとめ、および今後の展望である。

第2章 串刺し操作に関する提案および 検討

本章では串刺し操作を実現するため、操作の要素を検討し、それらに基づいたロボットのための手法を提案する。料理作業における操作に関して述べ、串刺し操作の実現に必要な操作を抽出し、各操作の実装について考察していく。

2.1 前提条件とその妥当性

本研究の前提条件は以下の通りである。

1. 串や食材のおおよその位置は分かるが正確な位置は分からない（よって位置計測が必要）
2. グリッパは平行2指のものを対象とする
3. 食材は置かれた状態から把持し、持ち替えなどは行わない

料理ロボットの汎用性を保つためには、食材や串を固定位置とするのではなく、作業範囲内で自由に置くことが適切であると想定している。また、本研究で対象物を把持するためのグリッパやエンドエフェクタに対する適用実験を行った。結果から見ると、食材や串の把持動作は平行グリッパに実装されたエンドエフェクタで十分実現することができる。最後に、持ち替えなどの動作は、動作の計画が複雑となるだけでなく望む置かれ方で食材が必ず安定するとは限らない。従って、本稿では食材の持ち替えは考慮しない。

以上の条件は我々が想定している料理ロボットとして適切である。その条件を付けることで機能や適用範囲が大きく制限されないと想定している。

2.2 串刺し操作に関する要素

串刺しはその種類も多岐にわたり、取り扱う飲食店が多数存在するほどである。しかし、作り方は基本的に1つまたは複数の食材を串に刺すことである。串刺しの種類の多さは使用する食材に大きく依存する。つまり、多様な食材を扱うことができれば、串刺しの多様性を保つことができる。

串刺し作業に対して、まず串を掴んで持ち上げる操作が必要になる。串の3次元位置情報を用いて、串を確実に掴んで、準備位置で待機する。これを、串の把持操作と呼ぶ。次に、串に刺す食材に対する操作内容は食材の状態によって大きく分かれる。まず、食材は様々な形のものがあり、さらにロボットハンドの形状によって把持方法が異なる。そして、食材の置かれ方の違いにより、把持方法も異なる。食材を認識し、適切な動作で把持し、準備位置に移動させる一連の操作を食材の把持操作と呼ぶ。最後に食材を把持した後、串に刺す操作を行う。刺す際に、一般的に把持の状態に応じて望む方向から串を刺す。既に準備位置にある食材を望む方向から串に刺すことを、刺す操作と呼ぶ。

2.2.1 串の把持

本項は串刺し操作における串の把持操作について説明する。この操作の目的は、串を正確に把持することである。この操作により、正確に把持された串の先端位置を取得することができる。

串を把持する前に、まず串の位置姿勢などの3次元情報が必要となる。本研究では、3次元情報の取得にRGB-Dカメラを利用する。RGB-Dカメラで取得した点群にPoint Cloud Libraryを用いた点群処理を行うことで串の点群を抽出することが望ましい。しかし、1視点から取れる点群では串の側面全てをカバーすることはできない。そこで、多視点から点群を取り、合成する。これにより、把持する際に必要となる3次元情報が取得できる。

次に、串を把持し、串先端の3次元における位置情報を用いて、刺す操作の段階に進む。精度の高い串先端の位置が求められる。よって、串を把持するグリッパは串を既知かつ唯一

の位置に固定することが必要となる。他に、以降の作業は食材を刺し通す時に発生する串に当たる力があり、その力を受けても位置ずれしない滑り止め施策も必要となる。

2.2.2 食材の把持

本項は串刺し操作における食材の把持操作について説明する。この操作の目的は、手先座標系と食材座標系を一致させ、手先座標系における刺す方向の候補を挙げることである。

食材を把持する前に、まず食材の形や置かれ方など3次元情報が必要となる。RGB-Dカメラで食材の点群を取得してから、特徴を抽出し、食材座標系を立ち上げる。把持する際に、食材座標系に基づいて把持を行う。例えば、食材の一番長い両端を上方から片腕のハンドで掴む場合、食材の両端の幅がグリップの最大開閉距離より長い場合、把持するのは不可能である。

次に、串刺し操作における食材の把持は、単なる食材の把持とは異なる部分がある。両方共通する部分は、食材の形と置かれ方から抽出した特徴に応じて、把持を行う。単なる食材の把持は、重力に拮抗して食材を持ち上げるだけでよい。しかし串刺し操作を行う際には、重力だけではなく串の刺す力などの外力を受ける。その際に食材の位置がずれないような安定性を求められる。外力と拮抗するには、多くの場合摩擦力が作用する。食材と食材グリップの間の摩擦力は、グリップから食材に対する圧力により生じる。大きな外力と拮抗するため、大きな摩擦力が必要となり、大きな圧力も必要となる。しかし、大きな圧力は柔らかい食材を潰す恐れがある。よって、柔らかい食材を潰さないように把持して外力と拮抗する手法とパラメータの実装が必要となる。

2.2.3 刺す操作

本項は串刺し操作における刺す操作について説明する。この操作の目的は、串の把持から得られた串先端の座標と串における直線と、食材の把持から得られた刺す方向における直線を一致させ、その直線に沿って目標位置に到着することである。

最後の刺す作業の前提として、全ての対象物(串, 食材)を把持していることである。刺す動作の軌道を動的に生成するにあたって必要なのは、目標の刺す方向、串先端の座標、食材座標系における刺す方向である。これらの情報は、目標の刺す方向以外、RGB-D カメラ得られる点群情報から抽出することができると考えられる。

そして、作業を終了とする条件は、食材が目標位置に到着した場合とする。食材が目標位置に到着すれば、串刺し操作は完了とする。しかし、作業の安全性を考えた上、力センサを用いて力制御を同時に行う。

2.3 SPG モデル

前節で説明した串刺し操作に関する要素から、実世界における作業の記述を抽象的なロボット操作へ変換する手法について説明する。串刺し作業を記述するには、串を刺す方向や食材の置かれ方から把持動作や刺す動作などの要素が決まると考えられる。そこで本研究では、人間が指示した「串の刺す方向」と机平面にある「食材の置かれ方」に応じて、食材を「把持する動作」を選択し刺す動作を実行する手法を提案する。人間が指示した「串の刺す方向」は英語で Skewering と表記する。「食材の置かれ方」は Posture で、「把持する動作」は Gripping と表記する。提案したモデルの名前はそれぞれの頭文字「SPG」で表す。

2.3.1 食材座標系

本研究では、操作の「対象物」は主に串と食材からなる。串の形は一定かつ十分な剛性を持つ。一般に串は把持と刺す段階で外力を受けても歪みが生じ難い。それに対して、食材は種類や切り方により形状が大きく変わり、一部の食材は外力の影響で形が変形しやすいため、食材の形状を一般的にモデル化することは困難である。そこで本研究では、以下のように食材座標系を設定する。まず、食材の点群から食材の形状を直方体に近似する。これは、食材点群とバウンディングボックスを使用し、境界内にある食材点群を直線で完全に囲むことで近似する。この操作により、3次元の食材点群の真上と側面から2次元のバウンディングボッ

クスで食材点群を囲むことができる．真上の視点から見ると，2次元のバウンディングボックスの長さや幅が食材点群の長さや幅に一致している．同様に，2次元のバウンディングボックスの高さが食材点群の高さに一致している．これより，バウンディングボックスの辺の長さで食材点群のサイズを表示することができる．従って，食材点群の中心部に座標系原点を設置し，バウンディングボックスにおける辺の長い順番で食材座標系の第一から第三軸を決め， w_1 ， w_2 ， w_3 とする．

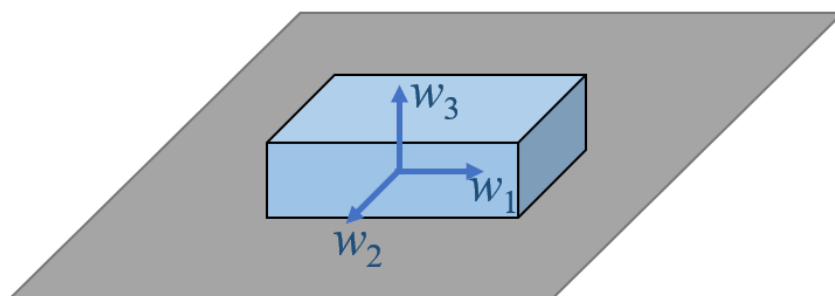


図 2.1: 食材座標系

2.3.2 ユーザーが指示した串の刺し方向 (Skewering)

前項で説明した食材座標系に基づき，本研究で提案するシステムの入力をユーザーが指示した串の刺し方向とする．串刺し作業では，串を刺す方向や食材の置かれ方から把持動作や刺す動作などの要素が決まると考えられる．そこで本研究では，人間が指示した「串の刺す方向」と机平面にある「食材の置かれ方」に応じて，食材を「把持する動作」を選択し刺す動作を実行する手法を提案する．その中に，「串の刺す方向」は入力として，作業が完了した成果物と一致しなければならない．串の刺し方向が決まってから，食材の把持や刺す段階に進む．そこで，食材座標系に基づき，ここで軸の正負は考慮せず，「串の刺す方向」 S_i の表示方向を， i 番目の軸方向 w_i にそって串を刺すことと定義する．

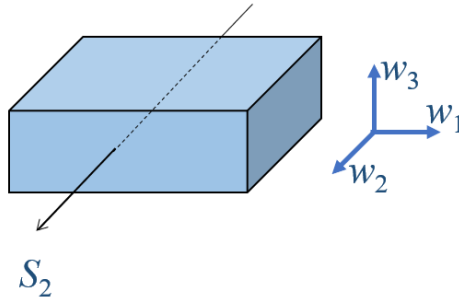


図 2.2: ユーザーが指示した串の刺し方向

2.3.3 食材の置かれ方 (Posture)

本項では、食材の置かれ方について説明する．本研究では、食材は地面に水平な作業台に置かれている．ロボットは食材を把持する際に、食材は操作台における置かれ方の違いにより、把持方法が異なる．目下の食材の置かれ方が現存の機構に対して難しい場合、食材の置かれ方を再調整し、望む置かれ方で食材が必ず静止状態となるとは限らず、かつ再調整動作の計画は複雑である．他に、人間が串刺し作業を行う場合、作業台に置かれた食材を持ち上げて、手の中で姿勢や向きを調整し、望む方向から串を刺す．ロボットが同じ作業を行う場合、平行グリップで食材の姿勢の調整は極めて難しい．よって、食材の置かれ方は食材が把持された状態と密接に繋がり、「食材を把持する」という抽象的な表現を具体的なロボット動作へ変換することが不可欠である．食材の置かれ方 P_j を、食材の第 j 番目の軸方向 w_j が机平面の法線方向であると定義する．

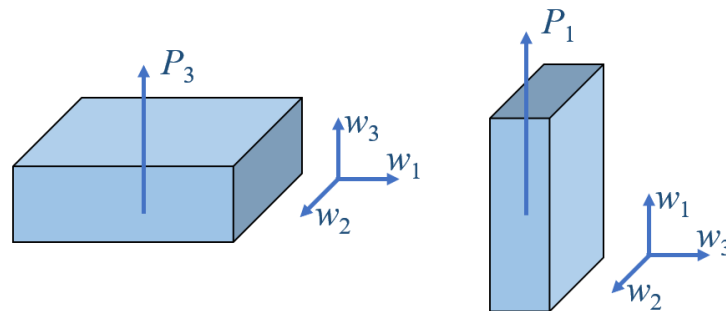


図 2.3: 食材の置かれ方

2.3.4 食材の把持 (Gripping)

本項では、食材の把持について説明する．本研究では、システムへの入力として人間が S_i を与え、 P_j はシステムによって認識されるものとする．そして、串の刺し方 S_i と食材の置かれ方 P_j から、適切な把持動作 G_{ij} を決定して実行する．最終段階である刺す動作の生成には、「対象物」となる食材の把持は不可欠である．そこで、ロボットのグリッパは2本の指が対になって動作する平行グリッパを想定する．グリッパの k 軸・ l 軸方向を食材の軸方向に合わせて把持することとする（図 2.4）．このように決めると、把持方法は全部で6種類となる．（ここで軸の正負は考えない）この6種類について、グリッパの k 軸と l 軸がそれぞれ食材の w_i, w_j 方向と重なる把持方法を G_{ij} と表すこととする．

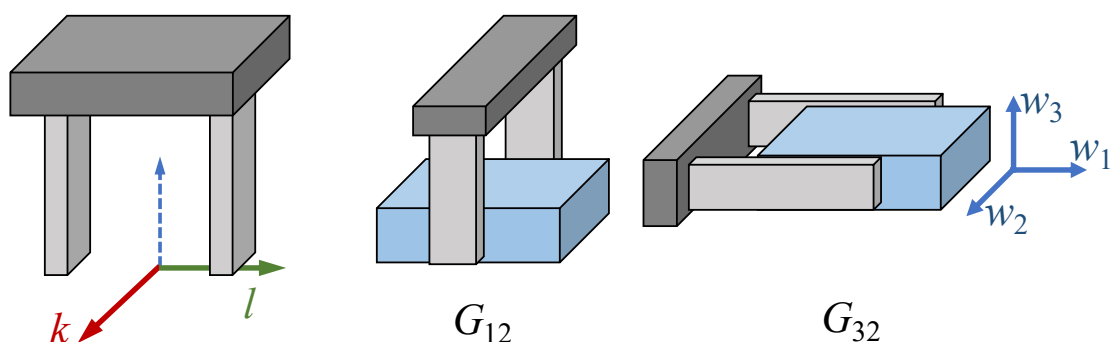


図 2.4: グリッパの k 軸と l 軸（左）と把持表現の例（中・右）

第3章 システム概要

本章は前章で提案した手法を実現するため構築した双腕ロボットシステムの紹介である。基本的に先行研究で構築されたロボットをそのまま利用した。自ら設計、実装したエンドエフェクタは実装の章で個別に述べる。

3.1 ハードウェア

3.1.1 双腕ロボット

三菱重工製7自由度の汎用ロボット PA10-7C を2台用いて、図3.1のような双腕ロボットシステムを構築した。

ロボットは、卓上での作業に従事し易いよう床面から約700mmの高さに設置した。世界座標系は左ロボットのベース部分を原点として、ロボットの前方にx軸、ロボットから見て左側にy軸、鉛直上方にz軸となるように設定した。次に回転について、本論文はxyz軸周りのオイラー角度を使い、それぞれの回転角度は α , β , γ として表す。それぞれアームの手先に専用グリップを取り付けた。ハンドにはIntel製RGB-Dカメラが取り付けられており、食材や環境の三次元情報を取得する。また、アームとハンドとの間には6軸力覚センサが取り付けられている。

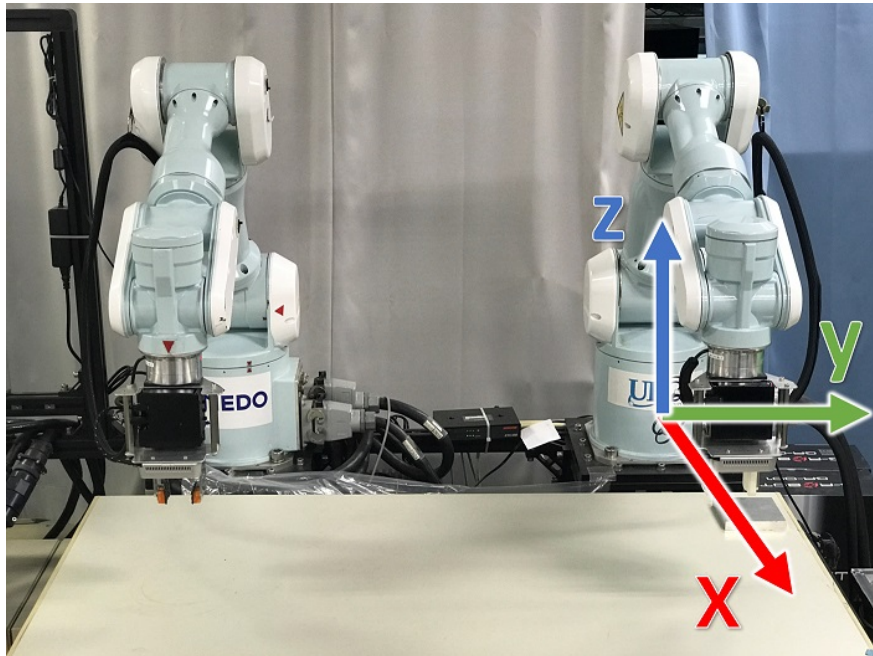


図 3.1: ロボットシステム

3.1.2 ツール座標系

本研究において，ツール座標系を用いて，食材座標系のある目標軸に一致した，SPG モデルの最優先把持動作を実行する．動作を実行する際に，直接ツール座標系を操り，目標姿勢に向かって移動する．

ツール座標系は以下の通り定義する．まず，ツール座標系の中心は PA10 手先座標系の中心である．そして，ツール座標系の各軸は，図 3.1 の状態で世界座標系と同じ向きになるよう設定された．つまり，ツール座標系の回転もベース座標系と同じである．グリッパに異なるエンドエフェクタを装着する際に，エンドエフェクタの先端位置に合わせるため，ツール座標系の中心オフセットを調整することが可能である．

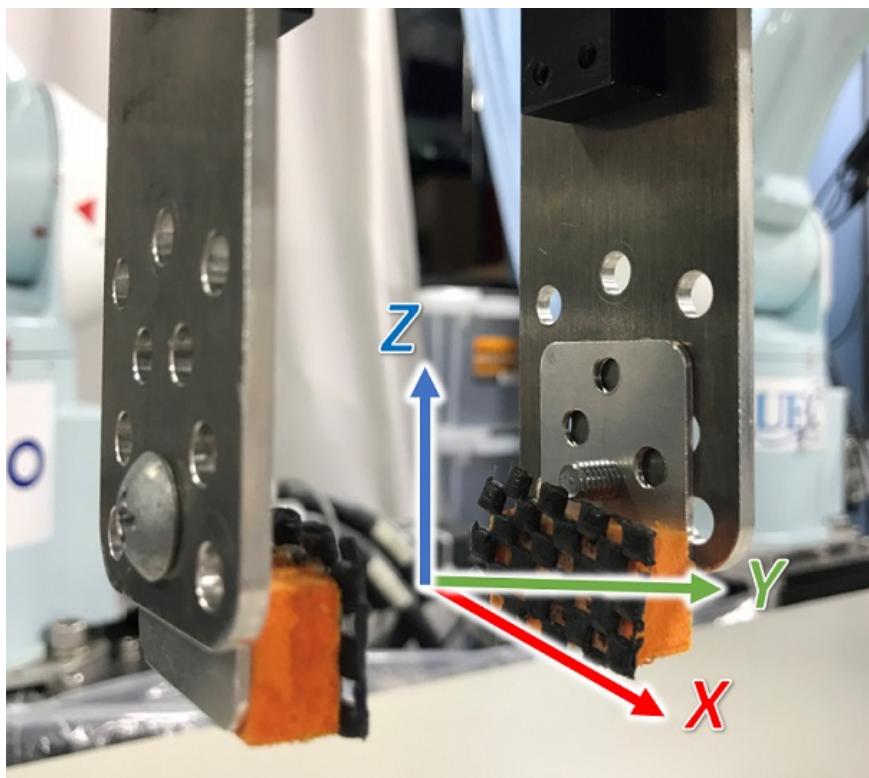
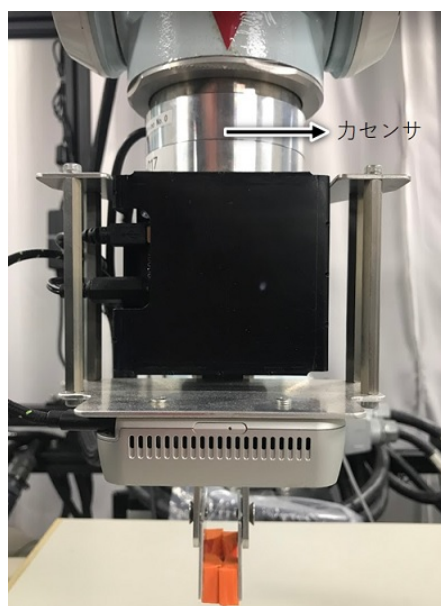


図 3.2: ツール座標系

3.1.3 力覚センサ

腕の部分に，Leprino 製の 6 軸力覚センサ PFS080YA501U6S(図 3.3) を装着した．串刺し作業において，各軸の力の目標値および上限を設定した上で，力制御を行う．



	080YA501
定格容量 $F_x F_y (\pm \text{ N})$	250
定格容量 $F_z (\pm \text{ N})$	500
定格容量 $M_x M_y (\pm \text{ Nm})$	20
定格容量 $M_z (\pm \text{ Nm})$	20
許容過負荷 ($\pm \text{ \%R.C.}$)	200
非直線性 ($\pm \text{ \%R.O.}$)	1.0
他軸干渉 ($\pm \text{ \%R.O.}$)	1.0
分解能 (\pm)	1/4000
外形寸法 (mm)	$\phi 80 \times H35$

図 3.3: 力センサおよび性能データ

3.1.4 視覚センサ

図 3.4 のように，本研究で使用している視覚センサは，Intel 製 RealsenseD435 (RGB-D カメラ) である．D435 はグローバルシャッターと広い視野角を備え，移動体を測定したい場合やデバイス自体が動く場合に高分解能の深度情報を提供する．また，死角を最小限に抑え，より広いエリアをカバーする．本センサは以前の視覚センサより，反射の強い材質 (金属製の串やトマトの表面など) に対して表面のデプスデータを取ることができ，精度も従来より高い．したがって，RealsenseD435 を使えば，より完全や高精度の点群データが得られる．

今回は一度の刺す操作で様々な角度から点群を撮る目的で，RealsenseD435 を両手に取り付けた。

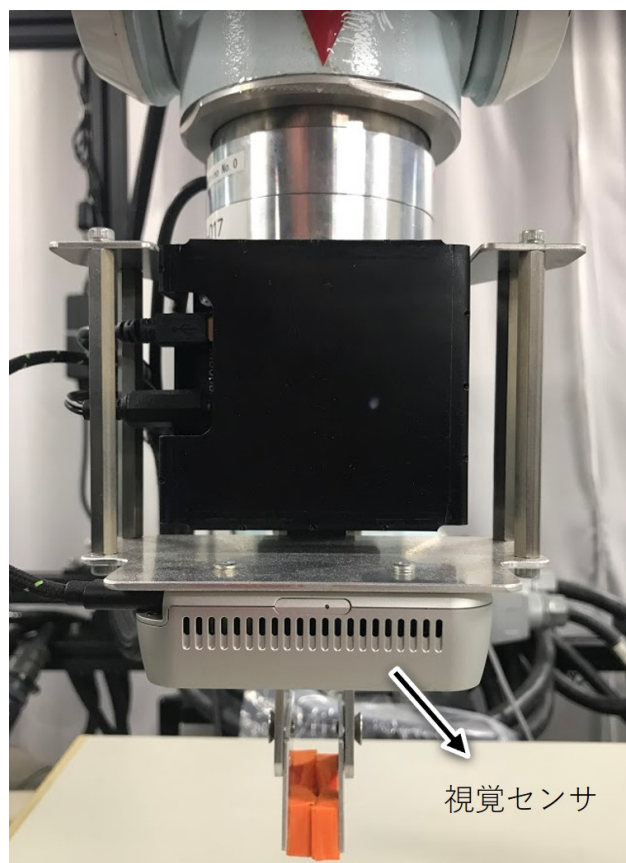


図 3.4: Realsense D435

3.1.5 グリッパ

本研究では，対象物を把持するため，平行グリッパを装着した．平行グリッパは 1E-HM01 HAND を使い，図 3.6 のように，長野らによって指先のアルミ板は様々な姿勢でツールを取り付けできるようにデザインされている．[6]．多数の穴が空いているため，各角度からエンドエフェクタを装着することが可能である．ハンドの穴には摺動性を上げるためにブッシュを入れ，さらにピンの挿入口に座繰りをいれることで多少の位置誤差が生じてもしっかりとした挿入を可能とした．インターフェースは直径 5 mm のダウエルピンを取り付ける．これも位置誤差を修正

する能力を高めている．ロボットアームに平行な姿勢を0度とすると，-90，-67.5，-45，-30，30，45，67.5，90度の姿勢に対応している．



図 3.5: 平行グリッパ

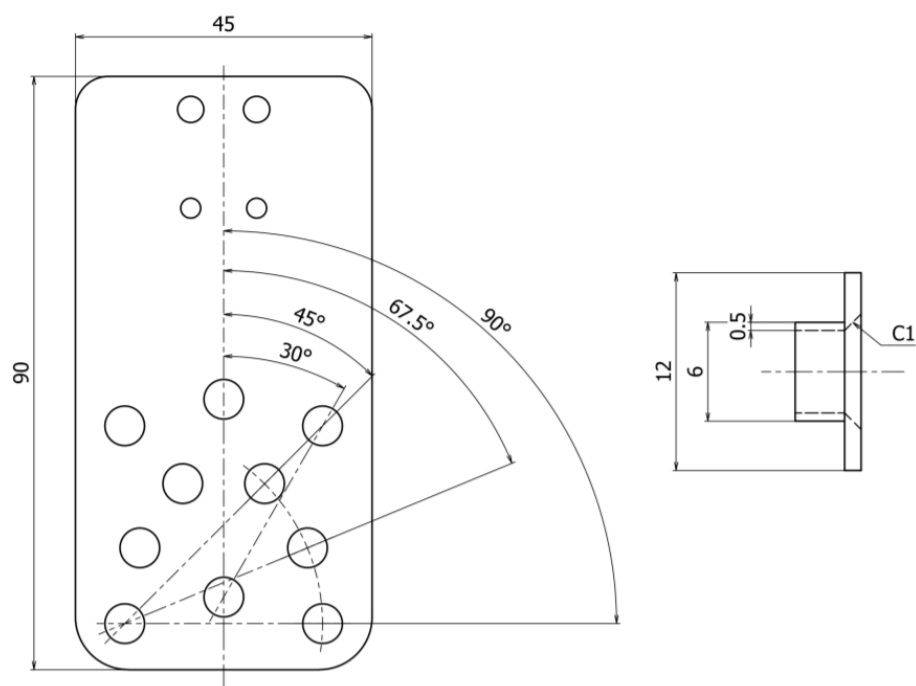


図 3.6: 平行グリップ設計図

3.2 ソフトウェア

3.2.1 OpenRTM

本研究では RT-Middleware の実装のひとつである OpenRTM-aist [7] を用いてコンポーネント指向のロボット操作システムを構築した. 図 3.7 の通り, システム全体の接続を示す. 前節で述べた各ハードウェアを RT-Component(RTC) として作成し, RTC-handle [8] を用いてこれらをつなぎ合わせ, 全体を統括した. Python のスクリプトから関数をコールすることで rtc-handle を介して各 RTC に指令を送る.

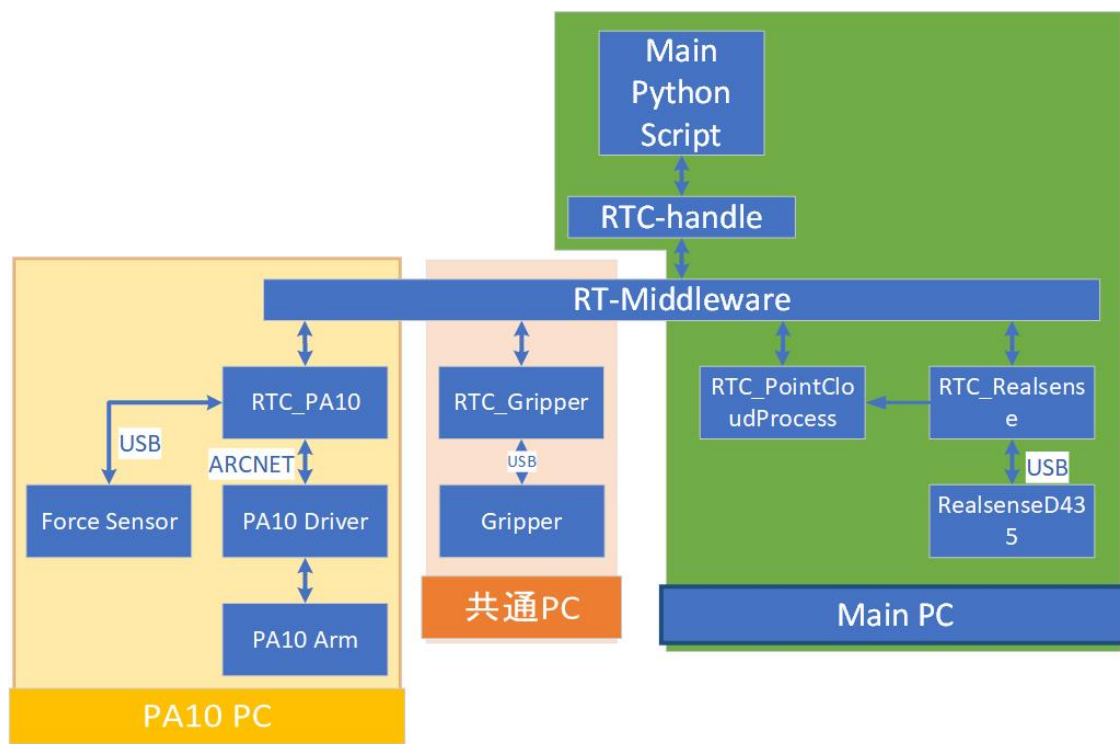


図 3.7: 全体の接続

まず, PA10 に対する操作は RTC_PA10 を介して行う. RTC_PA10 は独立の PC に実装し, ARCNET を通じて PA10 のドライバと通信し, PA10 を制御する. 制御する場合, 安全性を保证するため, 図 3.8 のように, 目標位置でツール座標系などの情報を VPython でリアルタイムで監視する. そして, 力センサは各アームに対応する PC に接続し, RTC_PA10 を介して指令を受ける. 次に, グリッパの開閉やサーボモーターの出力の制御は共通 PC に実装し

た RTC_Gripper を介して行う。

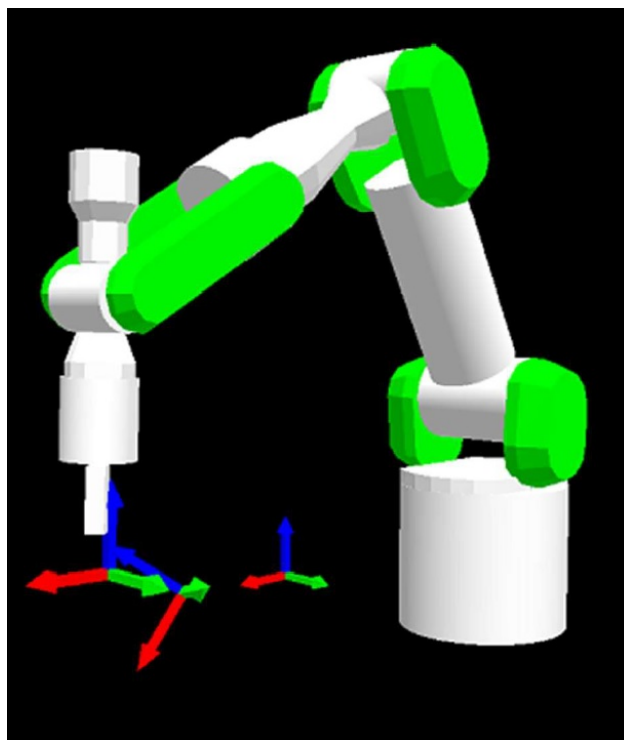


図 3.8: VPython

串刺し作業において、視覚に関するデータや指令は RTC_Realsense と RTC_PointCloudProcess を介して転送される。視覚センサから取得したカラー画像、赤外線画像、デプス画像を RTC のタイプに変換し、RTC_PointCloudProcess に送る。データ量が極めて多いため、処理機能を保つために各データチャンネル(カラーや赤外線2つやデプス)にキューを設置した。これらのキューはいつも最新のデータをキューの末端に入れ続けている。もし、キューが満たされた時に新しいデータが来ると、新しいデータを末端に入れ、最も古いデータである先端のデータは捨てられる。よって、キューから読み出すデータはいつも最新のデータである。ここで、データの遅延を少なくするため、キューの大きさは5個に設定する。他に、RTC_PointCloudProcess は PCL を使い、RTC_Realsense が取得した点群データを処理する RTC である。

3.2.2 PCL(Point Cloud Library)

本研究において、視覚センサから取得した点群データはPCL(Point Cloud Library)を用いて処理する。対象物に対する認識はいくつかのアルゴリズムを用いて実装した。これから紹介する。

PassThrough filter

PassThrough filter とは、指定された範囲の外側の値を切り捨てる処理である。本研究において、串の把持部を認識するため、串の容器の上部エッジから串の末端までの範囲以外の点群を削除する。食材を認識する場合は、机平面に置かれた食材の点群と机平面の点群を分離するために、机平面以下の点群を削除する。

VoxelGrid filter

VoxelGrid filter とは、3D ボックスにおいて、存在するすべての点は、それらの重心を用いて近似されるという。本研究では、このフィルターの役割は2つある。第一に、複数の視点から合成した点群のデータ量が非常に多い場合に、含まれる点の数を減らし、処理速度を高める役割である。第二に、点群を正しく分析するための下処理の役割である。対象物の点群から特徴を抽出する際に、PCA 主成分分析を行う必要がある。しかし、PCA 主成分分析は点群の密度に大きく依存する。正しい主成分分析結果を得るため、VoxelGrid filter を用いることで、点群の密度を均一にすることが必要となる。

StatisticalOutlierRemoval filter

StatisticalOutlierRemoval filter とは、各点の近傍について統計分析を行い、すべての近隣点までの平均距離を計算し、得られた分布が平均および標準偏差を有するガウス分布であると仮定することにより、孤立した外れ値を削除する処理である。本研究ではこれを用いて点群のノイズを削除する。

Euclidean Cluster Extraction

Euclidean Cluster Extraction とは、組織化されていない点群モデル P をより小さな部

分に分割し，P の全体的な処理時間を大幅に短縮するアルゴリズムである．本研究において，目標食材が複数存在する場合，各食材の点群を分割し，独立で処理を行う．

第4章 串刺し操作の実装

4.1 串の把持

4.1.1 串の認識

「対象物」として串を把持するためには，串の点群モデルを取得し，特徴を抽出する必要がある．また串の材質が金属となる場合，表面が反射しやすいため複数の視点から串のデプスデータを取る．

第3章で述べた通り，今回の実験ではロボットアームに取り付けた RealsenseD435 というカメラで点群データを取得した．点群データはデプス画像とカメラの内部パラメータを用いて計算することで得られる．得られた点群はノイズ除去，PCA 主成分分析などを行い，把持に対して不可欠な特徴を抽出する．

串点群モデルを取得する手法

本研究において，串は先端を下に向けた状態でコップなどの容器に立てて置かれる．持ち上げる際には串の末端を把持し，串の先端は食材に向けた状態で次の段階に進む．従って串の全体的な点群を取得する必要はない．コップからはみ出た末端の把持部だけを抽出すれば串の特徴を捉えることができる．そのため，コップが置かれた机平面からコップのふちまでの高さにある点群を全て取り除く．そして金属製の串の場合，一方向からの撮影では反射の影響で把持部の点群を十分に取得できないことを考慮し，今回は複数の方向から串の撮影を行う．

具体的には，カメラのベース座標系から見た位置姿勢 ${}^bT_c(p_{\text{center}}, \theta_{\text{view}}, \theta, r)$ は以下の式を満

たす：

$${}^bT_c(p_{\text{center}}, \theta_{\text{view}}, \theta, r) = {}^bT_{vc}(p_{\text{center}}, \theta_{\text{view}}) * {}^{vc}T_c(\theta, r)$$

ここで、 $p_{\text{center}}, \theta, r, \theta_{\text{view}}$ はカメラの位置姿勢のパラメータ、 p_{center} はベース座標系から見た視点中心の xyz 座標である。 θ_{view} は視点方向の角度であり、視点座標系 z 軸回りの回転角度である。 θ は視点の角度であり、カメラ座標系 y 軸回りの角度である。 r はカメラ座標系から視点座標系までの距離である。

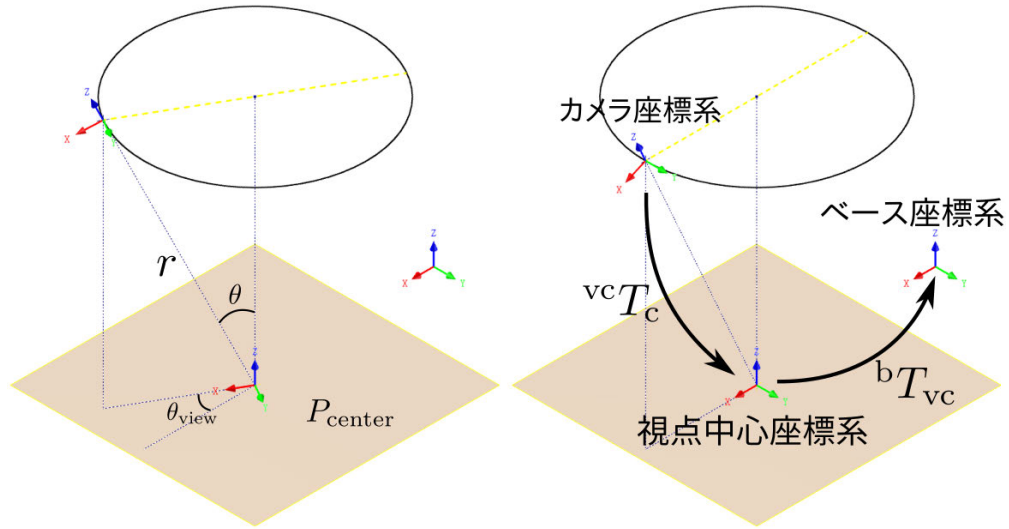


図 4.1: 視点の説明

認識作業において、 p_{center} は容器の中心である。 θ_{view} は 25 度以下、つまり撮影回数は少なくとも 4 回以上となる。

点群の合成

点群の合成とは多視点から撮影した点群を一つにすることであり、各視点において不十分な把持部の点群データを補うことができる。

合成する方法については、ロボットの手先の位置姿勢から、カメラの位置姿勢を導く。そして、それぞれロボットの手先の位置姿勢から見た各視点の点群を世界座標系に変換すれば、全て合成することができる。具体的には、左手のある視点で撮影した点群は以下の式で世界

座標系に変換できることを利用する.

$${}^wP = {}^wT_{lb} * {}^{lb}T_{lh} * {}^{lh}T_c * {}^cP \quad (4.1)$$

ここで, wP は世界座標系に変換した点群である. ${}^wT_{lb}$ は左手ベース座標系から世界座標系に変換する変換行列である. ${}^{lb}T_{lh}$ は左手の手先座標系から左手ベース座標系に変換する変換行列である. ${}^{lh}T_c$ はカメラ座標系から左手の手先座標系に変換する変換行列で, cP は RealsenseD435 で取得したカメラ座標系の下での点群である. また, 世界座標系は左側のロボットのベース座標系と同一である. つまり, 今回の実験では ${}^wT_{lb}$ は単位行列である. 次に, 右手で撮影した点群について, 右手ベース座標系から左手ベース座標系への変換行列 ${}^{lb}T_{rb}$ を求め, 以下の式で合成する.

$${}^wP = {}^wT_{lb} * {}^{lb}T_{rb} * {}^{rb}T_{rh} * {}^{rh}T_c * {}^cP \quad (4.2)$$

特徴抽出

得られた点群から串の姿勢ベクトルを抽出すれば, 把持することが可能である. そこで, 撮影した点群に対して PCL の PassThrough フィルターを使うことで串の把持部以外のノイズを除去する. そして, 把持部の点群に対して PCA 主成分分析を行い, 点群の第一主成分である姿勢ベクトルを抽出する.

4.1.2 串把持用のエンドエフェクタ

細長い串を把持するためには, 通常の平行グリッパでは困難である. そこで串を把持するためのエンドエフェクタを設計し, 実装した. 串刺し作業において, 串に対する操作から得られる結果とは, 串の先端位置である. 串の先端位置から食材を串に沿って刺す. 従って, 串を把持した後に, 串の先端位置を導き出すことが出来なければならない. 串把持用のエンドエフェクタは以下2つの要求がある.

1. 串の位置が推測できる

2. 食材からの外力を受けても串の位置姿勢が変わらない

以上の要求から，試作エンドエフェクタを設計し，実装した．識別の誤差を考慮し複数の切り口を用意したので串を固定できると想定していた．しかし，毎回把持する際に，串がどの切り口に固定されたのか確認する必要があり，かつ切り口が浅いため，串に対する拘束力がやや足りない．

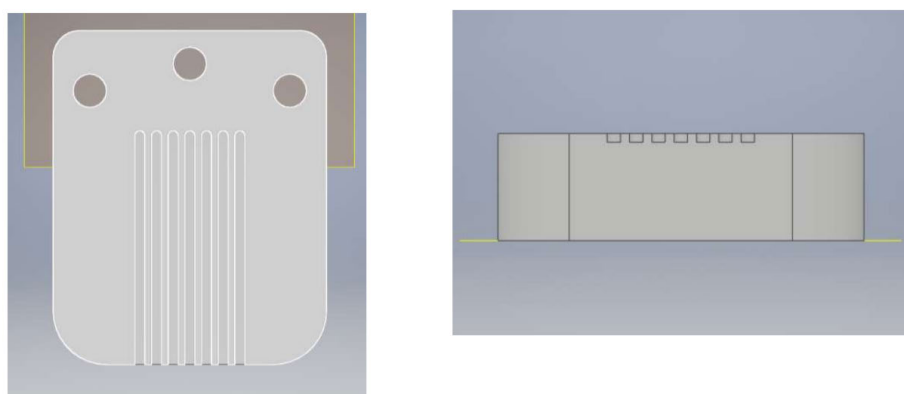


図 4.2: 串把持用のエンドエフェクタその 1

試作エンドエフェクタの結果を踏まえて，改良版を設計し，実装した．

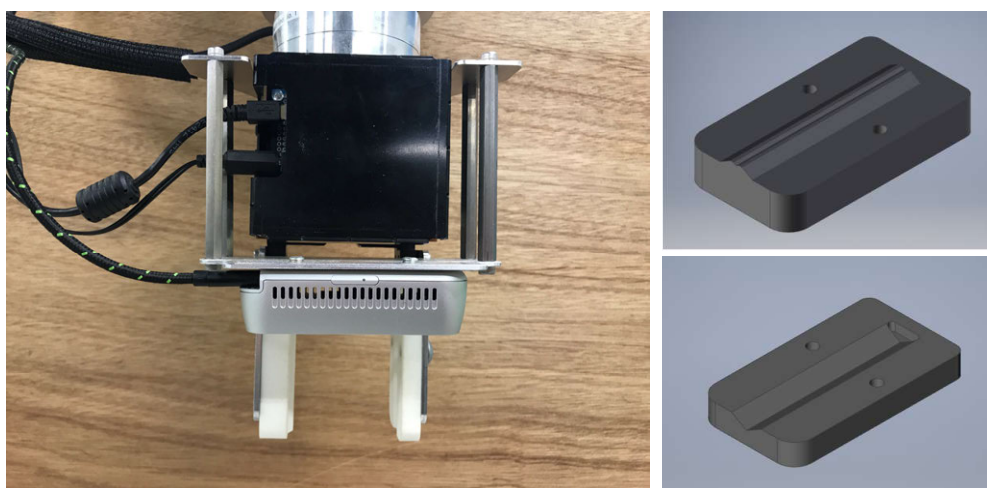


図 4.3: 串把持用のエンドエフェクタその 2

串刺し作業を正確に行うためには，串の位置を正確に制御することが必要となる．そのため，常に一定の位置でしっかりと串を把持するためのエンドエフェクタを図 4.3 のように製

作した。把持の際に串がグリッパの V 字の溝にはまり、多少の誤差が生じても毎回同じ位置でしっかりと固定される。

4.2 食材の把持

「対象物」として食材を把持するため、食材の点群モデルを取得し、特徴を抽出し、SPG モデルによる把持を行う。串と同様に、RealsenseD435 というカメラで点群データを取得する。そして、食材点群を立方体に近似し、食材座標系を立ち上げる。最後に食材座標系とツール座標系を用いて、SPG モデルによる目標「串の刺し方向」に対する把持方法を評価し、一番適切なパターンを適用する。

4.2.1 食材の認識

本項は食材の認識について説明する。

まずは食材を上から撮影し、その点群から関係のない点を除去する。食材を認識する目的とは、食材の点群をモデル化することにより、食材座標系で食材の状態を表し、最後の刺す操作まで状態を提供することである。食材の世界座標系下で、RGB-D カメラにより点群を取得する。複数の食材が存在する場合、PCL の EuclideanClusterExtraction という手法を用いると食材の点群を区別することができ、それぞれ一つの食材の点群として独立する。食材の点群には、まずベース座標系の xy 平面に対して PCA 主成分分析を行う。これより、一番長い点から点の距離 l と、 xy 平面において l に直交する点と点の距離 w が得られる。そして、点群の一番高い点、つまり机平面から食材点群の頂点までの距離 h を検出する。 xy 平面において点の間の距離と食材点群の頂点までの距離を比較し、 l , h の最大値を食材座標系の第 1 軸 w_1 とする。複数食材が存在する場合、各食材点群に対して以上の処理を行う。以上のようにして、各食材の認識は完了する。

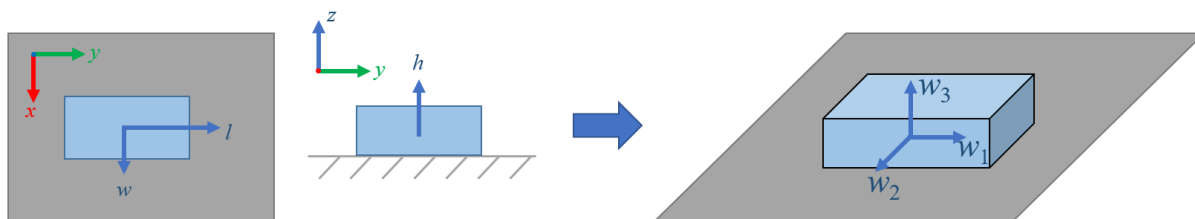


図 4.4: 食材の認識

4.2.2 食材把持用のエンドエフェクタ

本研究で実装したグリッパは開く距離が 100 mm であるため、体積が小さい食材や細長い食材などを掴むのは難しいと想定される。その場合でも把持を可能とするために、アルミ板上に小さなスポンジをつけることで閉める際の隙間を無くし、食材表面との摩擦力を増やした。

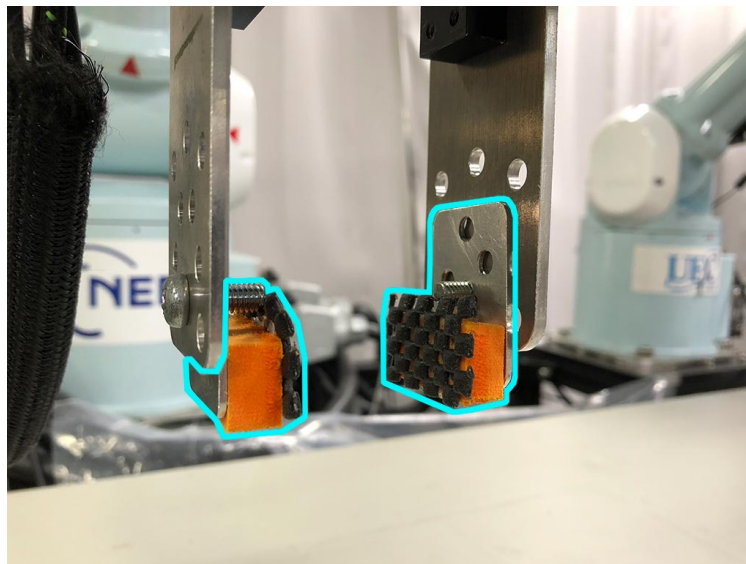


図 4.5: 食材把持用のエンドエフェクタ

4.2.3 食材の把持動作

本項では，食材の把持動作およびその評価について述べる．

前項で述べた食材把持用のエンドエフェクタを用いて，食材座標系を参照しながら把持動作を行う．把持する食材が机平面に置かれてある場合は，エンドエフェクタが机に接触するまで下降する必要があると想定している．接触判定は，鉛直方向の力が一定値を超えることとする．本稿では，この力を 1 N と設定した．

そこで，本研究で提案した SPG モデルにより，串刺し方 S と食材の置かれ方 P に対する，食材の把持動作 G の良し悪しを示す．

悪い例その 1

まず，食材が全て机平面に置かれてある．食材の底面，つまり食材の机平面と接触している面を把持することはできない．例えば，ある食材の置かれ方は P_3 であり，この食材を G_{23} の把持動作を行う場合，グリッパと机平面が干渉してしまうため，悪い把持動作として認められる．

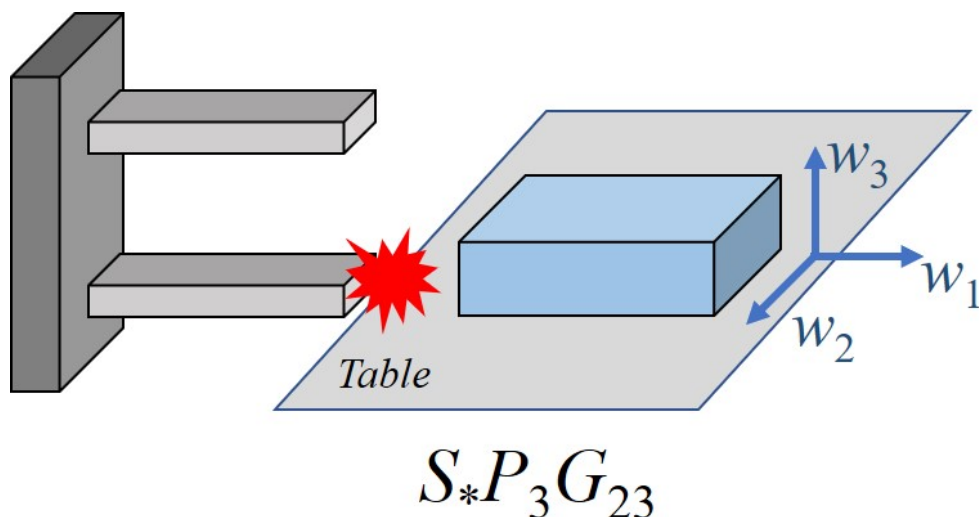


図 4.6: 悪い例その 1

悪い例その2

また，串を刺す面と把持する面が同じだとグリッパと串が干渉してしまう．串の刺し方向はグリッパのアルミ板があり，刺す目標点が遮られる．例えば，ある食材の指定された刺す方向は S_2 であり，置かれ方は P_3 である．この食材を，把持動作 G_{12} で持ち上げる．その場合，食材座標系第2軸 w_2 は刺す方向でありながら，グリッパと干渉してしまう．このような状況は悪い把持動作として認められる．

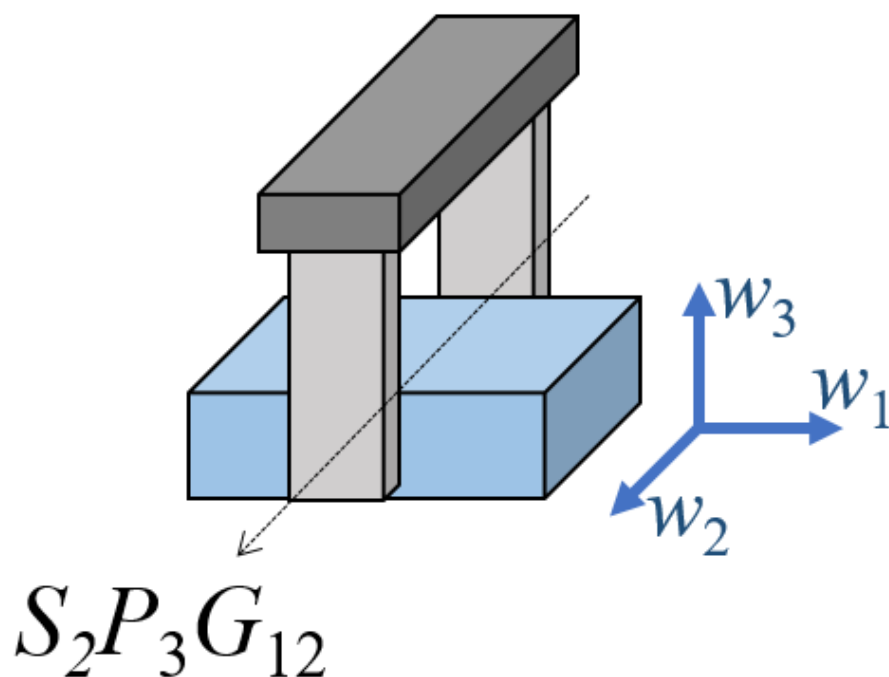


図 4.7: 悪い例その2

可能であれば避けたい例

次に，グリップが机と平行になる把持方法は不可能ではないが推奨されない．ハンドの機構と机との接触を避けるために動作計画が複雑になるため，把持方法を決める際には可能なら避けたい．例えば，ある食材の指定された刺す方向は S_1 または S_3 であり，置かれ方は P_3 である．この食材を，把持動作 G_{32} で持ち上げる．食材の高さ h が低い場合，ハンドの機構と机がぶつかる恐れがある．よって，このような把持動作は推奨されない把持動作として認められる．

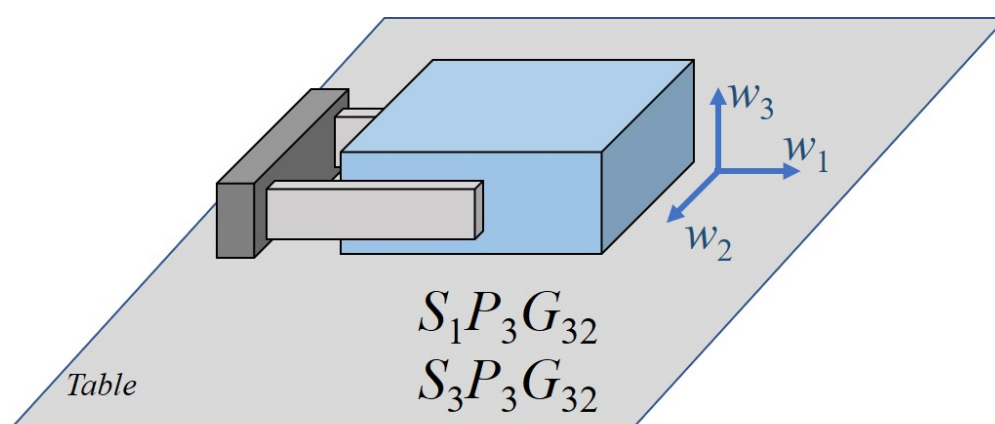


図 4.8: 可能であれば避けたい例

良い例

以上のような例に該当しないケースであれば、優先的に選択されるべき把持動作として認められる。つまり、現在のロボットシステムに対して食材を把持するには一番成功率が高い動作である。システム全体の再利用性を高めるため、どのような刺す方向 S と置かれ方 P に対しても、必ず優れた把持動作が存在する。優れた把持動作の例として、とある食材の指定された刺す方向は S_1 または S_3 であり、置かれ方は P_3 である。この食材を、把持動作 G_{12} で持ち上げる。この場合、干渉する恐れのあるものが存在しないため、良い把持動作として認められる。

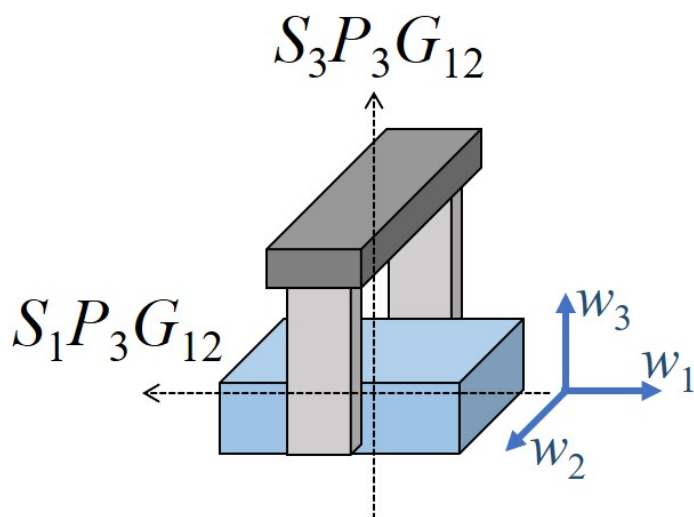


図 4.9: 良い例

把持動作の評価

以上のことより，把持動作を評価できる．まず，机に接触した食材の面を把持することはできない．また，串を刺す面と把持する面が同じだとグリップと串が干渉してしまう．これらの制約に抵触するケースは×と表した．次に，グリップが机と平行になる把持方法は，不可能ではないが，動作の過程でハンドの機構と机との接触を避けるために動作計画が複雑になり，推奨される把持方法ではないので，これらに該当する把持は△と表した．最後に，これらに該当しないものは，優先的に選択されるべきものとして○と表した．加えて，一つのケースに対して複数の○が存在する場合，優先度は左から下げる．

	G_{12}	G_{13}	G_{21}	G_{23}	G_{31}	G_{32}
S_1P_1	△	△	×	○	×	○
S_1P_2	×	○	×	△	×	×
S_1P_3	○	×	×	×	×	△
S_2P_1	×	△	×	○	×	×
S_2P_2	×	○	△	△	○	×
S_2P_3	×	×	○	×	△	×
S_3P_1	△	×	×	×	×	○
S_3P_2	×	×	△	×	○	×
S_3P_3	○	×	○	×	△	△

表 4.1: 食材の把持動作 G の評価

4.3 刺す操作

本節では最終段階として、刺す操作について説明する。「対象物」として串と食材が把持された後で、刺す操作に進む。しかし、刺す操作は単なる位置制御では達成できない。本研究では、現在のロボットシステムで、再利用性の高い刺す操作を実装した。

4.3.1 刺す操作におけるロボットの姿勢

本項では、刺す操作におけるロボットの姿勢について説明する。一般的に、串を把持し、先端位置を推測してから、串を水平にし、横から食材を刺す。これは水平刺しと呼ぶ。しかし食材が複数存在する場合、食材の重量で串が下方向に曲がる恐れがあり、串の先端位置の推測が出来なくなるため以降の刺し作業に大きな影響を与える。これを解決するため、把持した串を鉛直上向きに固定し、食材を上から下に刺す手段をとる。これにより、食材の重量は串に影響を及ぼすことがなくなり、複数の食材を刺すことが可能となる。

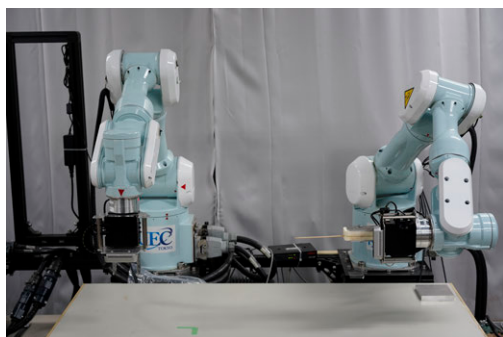


図 4.10: 水平刺し姿勢

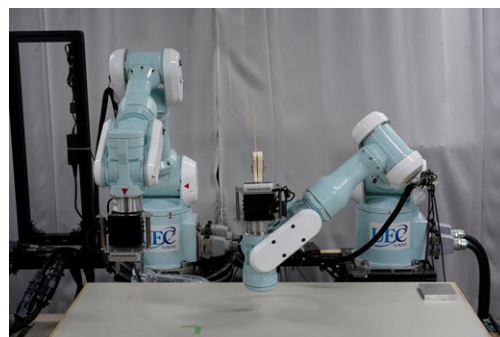


図 4.11: 垂直刺し姿勢

4.3.2 力制御による刺す操作

串刺し作業の刺す操作には位置制御だけではなく、力制御が必要である。もし位置制御だけだとしたら、刺し通しに必要な力がグリッパと食材の間の摩擦力を超える恐れがあり、食材を安定的に把持できなくなる。また、単純な位置制御は硬い食材を刺し通す際に速度を制

御できない．そのため刺し通した瞬間にアームが暴走し突進する恐れがあり，非常に危険である．よって，刺す操作には力制御が必要となる．

今井らの手法 [9] に基づいて力制御を行う．目的の手先反力の制御より，手先速度ベクトルの目標値 $v_h = \{v_{hx}, v_{hy}, v_{hz}, v_{h\alpha}, v_{h\beta}, v_{h\gamma}\}$ を生成する．

垂直刺し操作においては，食材を上から下方向に刺していくため，鉛直方向，つまり z 軸方向に関してのみ力覚フィードバック制御を行う．もしも他の軸方向の力制御が必要な場合は，力覚フィードバック座標変換により調整可能である．

z 軸方向の手先速度 v_{hz} は， f_z を手首の力覚センサによって計測される反力であり， $f_{z\text{target}}$ を串を把持するアームの出力目標値として，式 4.3 に従って生成される．

$$v_{hz} = a |\Delta f_z| \left(\frac{1}{1 + e^{-b \Delta f_z}} - 0.5 \right) \quad (4.3)$$

$$\Delta f_z = f_{z\text{target}} - f_z \quad (4.4)$$

v_{hz} と Δf_z の関係を図 4.12 に示す．基本的に v_{hz} と Δf_z は線形に近い関係で， $\Delta f_z = 0$ 付

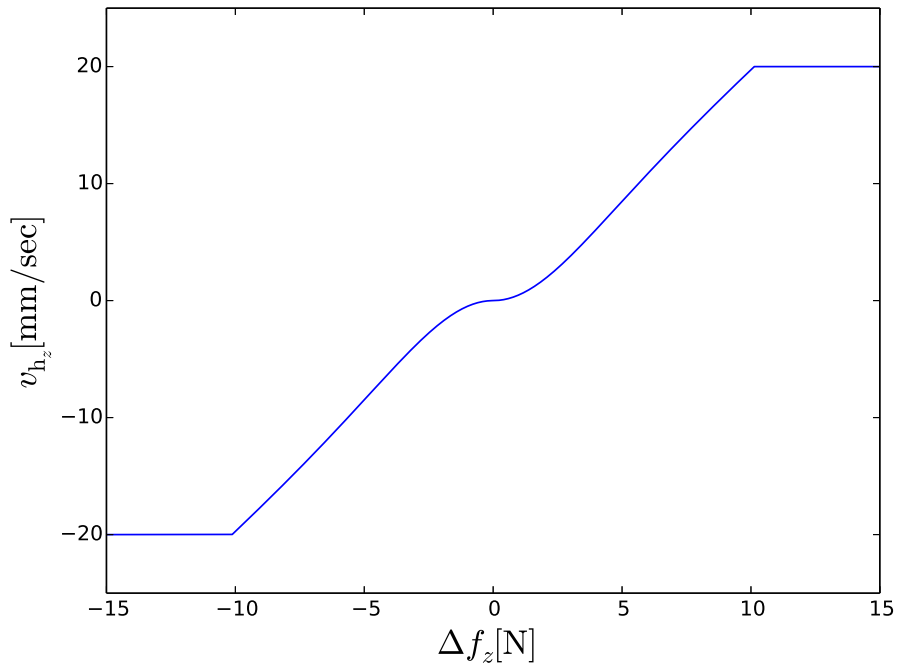


図 4.12: 力制御における力と速度の関係

近で不感帯を持つように設計されている． a は線形関係の傾きの強さを与えるハイパーパラメタ， b は不感帯の幅を与えるハイパーパラメタである．また，手先速度の絶対値の上限を 20mm/s とし，これを越えるものはクリッピングした．制御に遅れが存在しない理想のハードウェアでは不感帯は必要ないし， a の傾きも大きいほど素早く Δf_z が 0 に収束することになる．

また，このままでは Δf_z が片側から 0 に近づくととき， v_{hz} が 0 に漸近し， Δf_z が目標値付近に収束しない可能性があるので，手先の絶対速度の下限值 $lim_{v_{h,under}}$ を設け， $|v_{hz}|$ がこれを下回らないように，式 4.6 に従って修正する．

$$\begin{aligned} v_{hz} &\leftarrow \begin{cases} v_{hz} & , \quad v_{hz} = 0 \\ sign \max\{|v_{hz}|, lim_{v_{h,under}}\} & , \quad otherwise \end{cases} \\ sign &= \frac{v_{hz}}{|v_{hz}|} \end{aligned} \quad (4.5)$$

今回の実装では $lim_{v_{h,under}} = 0.1$ mm/s とした．

以上より，食材の把持操作には手先をまっすぐ降下させ，机平面に接することによって生じる一定の反力を検知するまで降下を継続させる．刺し操作を実行する事前， $f_{ztarget}$ を適切に設定することで，式 4.3 に従って手先速度を生成し，目的の反力を得るような動作を実現する．刺す動作を終了させるための条件は，以下の通りである．

目標位置に到着

事前に食材が進む距離を設定し，目標位置に到着したら作業を終了させる．

力強さ上限を超えた

安全性を確保するため， Δf の上限を事前に設定する必要がある．その上限を超えたとき，作業を終了させる．

第5章 実験

5.1 実験結果の判定基準

本節では，本研究において実験結果の判定基準について検討する．串刺し作業の結果に対する定量的評価は難しい．そこで，本研究では実験結果の判定は定性的評価と定量的評価の両方から行う．

定性的：外見による判断

串が食材の重心を通じたのか，食材は串における重量の分布が均一であるか，食材を刺し通したのかなど，串刺しに対する定量的評価は難しい．本研究では，完成された串刺しの外見による判断から，定性的に結果を評価する．

定量的：必要な時間

串刺しの開始から終了まで，本研究で提案した手法においてかかる時間による評価をする．

定量的：必要な力の強さ

食材を刺し通すために必要な力の強さを評価する．設備の安全性や人に対する安全性を考えた上で，必要な力の強さをできる限り抑えるべきである．

5.2 串の把持実験

5.2.1 実験内容

本節では，串を把持する動作の実験を行い，提案した手法の適用性を評価する．外見による判断から，把持実験の結果について評価する．直径や材質が異なる串を用意し，紙コップを立てかける容器とした．本研究に提案した串の点群を認識するための軌道を生成し，特徴を抽出する．PCA 主成分分析の結果より，把持する前に串に接触しないように準備位置へ移動してから，把持する目標点，つまり把持部点群の中心をツール座標系の中心に一致させ，グリップを閉めて持ち上げるという計画をした．準備位置とは，把持部点群の第一主成分方向の延長線 50 mm のところである．

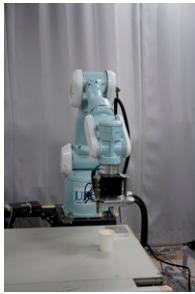
5.2.2 実験用具

直径が 2 mm であり，金属製の串を用意した．他には，直径が 3 mm と 5 mm，竹製の串も用意した．

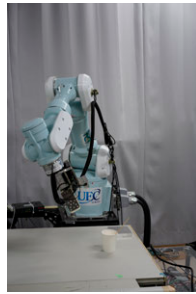


図 5.1: 実験用の串

5.2.3 実験過程



(a) 初期状態



(b) 1 回目撮影



(c) 2 回目撮影



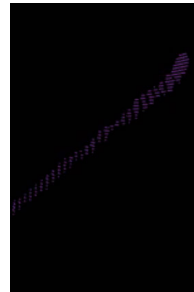
(d) 3 回目撮影



(e) 4 回目撮影



(f) 把持準備



(g) 合成した点群



(h) 準備位置



(i) 目標点に到着



(j) 閉める



(k) 持ち上げる



(l) 完了

図 5.2: 串の把持動作

5.2.4 実験結果

実験結果として、提案した串の把持手法の有効性を検証した。串の直径にかかわらず、把持成功率は高い。しかし、金属など反射が強い材質の場合、より多くの視点から撮影する必要があるため、作業時間は伸びる恐れがある。

5.3 食材の把持実験

5.3.1 実験内容

本実験は、形が違う食材に対して、食材用エンドエフェクタの有効性を検証することである。にんじん、ジャガイモ、トマト、ウインナーの4種類の食材を用意し、それぞれについて、提案手法によって位置姿勢の検出と、それに基づく把持実験を行った。

本実験に用いた実装では、まず食材点群を PassThrough で机平面など不要な部分の除去を行う。そして、Euclidean Cluster Extraction より、各食材点群を分割し、独立させる。最後に、VoxelGrid フィルターで各食材点群内部の分布を均一にする。検出した食材の把持計画は、平行グリッパのツール座標系の x 軸と検出した食材座標系の第一軸 (つまり長手方向) が一致し、かつロボットハンドが上方から食材にアプローチするように、食材座標系の原点を把持するという方針で計画した。検出した食材座標系の中心位置の x 軸および y 軸の座標を、ベース座標系 xy 平面における食材点群の中心座標として、ベース座標系 z 軸の座標は、食材点群における一番高い点の半分とする。食材把持動作は、SPG モデルにより優れた把持動作から選ぶ。把持するまでの動作計画は、ツール座標系は z 軸正の方向に 50 mm オフセットした準備位置を設定し、現在の手先位置から準備位置に手先を移動させつつ平行グリッパを開き、その後手先を食材座標系中心に移動させ、平行グリッパを閉じる。

5.3.2 実験用具

にんじん，ジャガイモ，トマト，ウインナーの4種類を食材を用意した．机平面に置き，食材用エンドエフェクタで把持する．

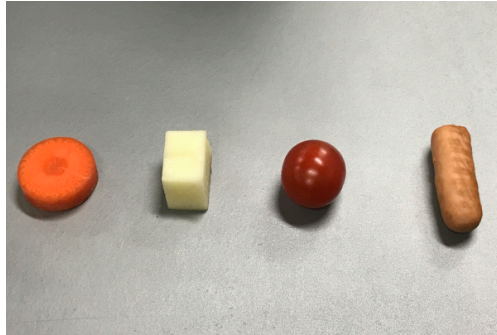


図 5.3: 実験食材

5.3.3 実験結果

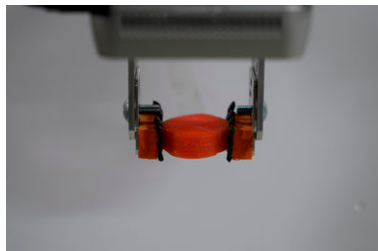


図 5.4: にんじんの把持

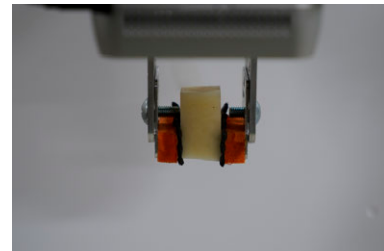


図 5.5: ジャガイモの把持

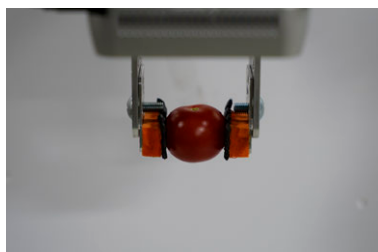


図 5.6: トマトの把持



図 5.7: ウインナーの把持

5.4 SPG モデル検証実験

5.4.1 実験内容

本実験は，本研究で提案した SPG モデルを検証することである．

食材はウィンナーとする．SPG モデルの要素として，まず人間が指示した刺す方向は，長い方向，つまりウィンナーの第 1 軸方向 S_1 と短い方向，つまり第 2 軸 S_2 方向とする．食材の置かれ方は，食材の認識により，第 2 軸が鉛直方向に平行なので， P_2 である．SPG モデルによる把持動作の評価から，最優先とする把持動作は G_{13} である．

把持動作を決めた上で，刺す段階に進む．ある特定の食材把持動作に対して，ロボットの姿勢の変化より，異なる方向から串を挿入することが実現する．今回の実験において，机平面に置かれたウィンナーは提案した認識手法より，食材座標系を立ち上げた．SPG モデルより，把持動作把持動作は G_{13} を選んだ．つまりウィンナーの第 1 軸方向とツール座標系の x 軸と一致している．人間が指示した串の挿入方向 S_1 と S_2 は，第 4 章で提案した水平刺し動作と垂直刺し動作より実現する．具体的に，把持動作 G_{13} を実行した後，手先はベース座標系 x 軸周りに 90 度回転して，水平刺し動作で $S_2P_2G_{13}$ を実行する．そして，初期位置から，手先はベース座標系の x 軸周りに 90 度を， z 軸周りに -90 度回転して，垂直刺し動作で $S_1P_2G_{13}$ を実行する．

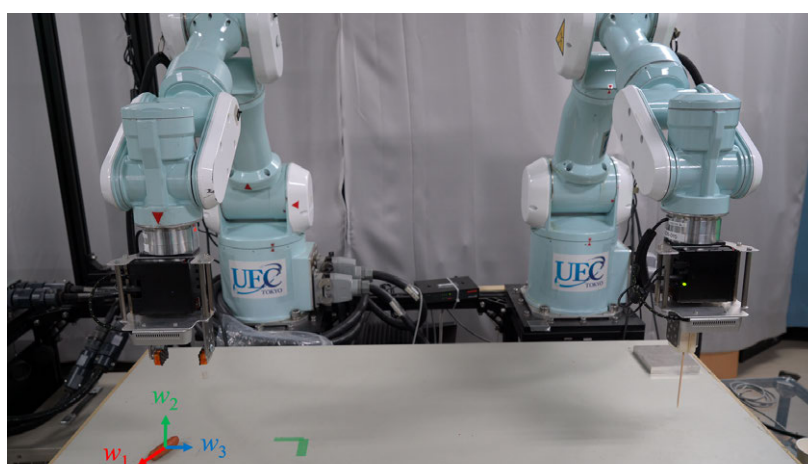
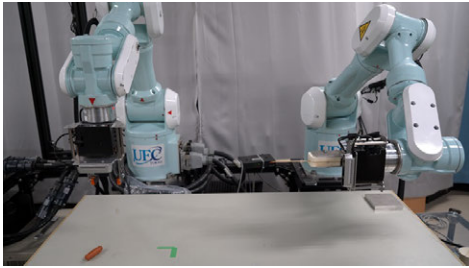
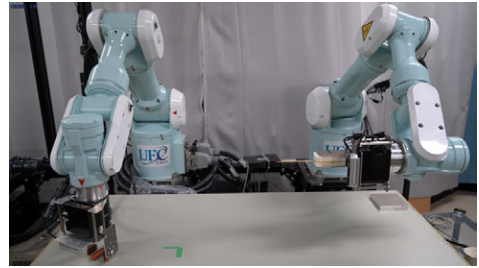


図 5.8: 初期状態

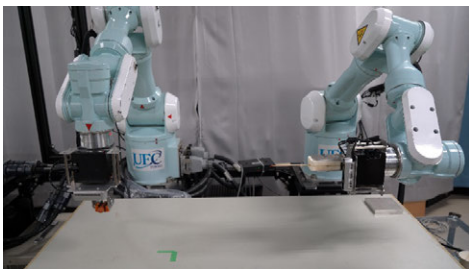
5.4.2 水平刺し動作による $S_2P_2G_{13}$



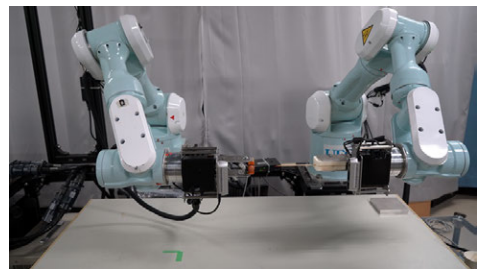
(a) 準備位置



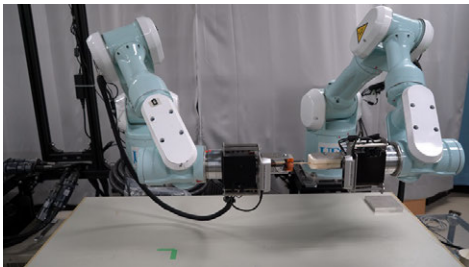
(b) 食材の把持



(c) 食材を持ち上げる



(d) 刺す動作開始



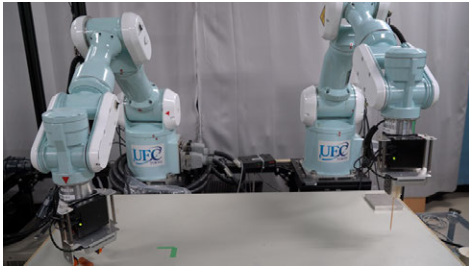
(e) 刺す動作終了



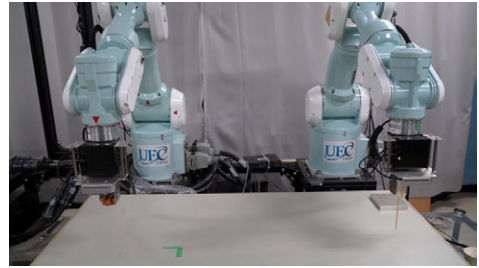
(f) 結果

図 5.9: $S_2P_2G_{13}$ 一連動作

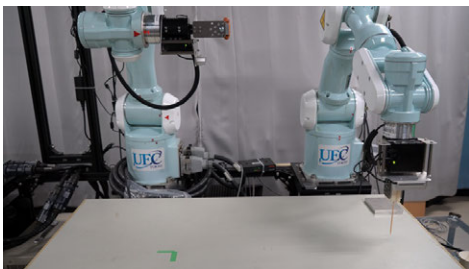
5.4.3 垂直刺し動作による $S_1P_2G_{13}$



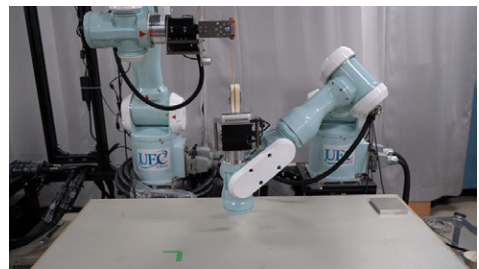
(a) 食材の把持



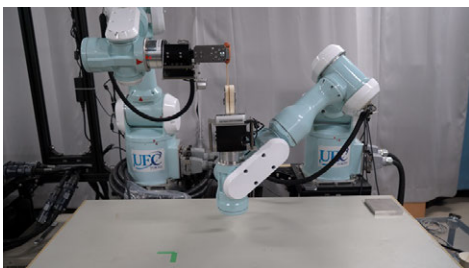
(b) 食材を持ち上げる



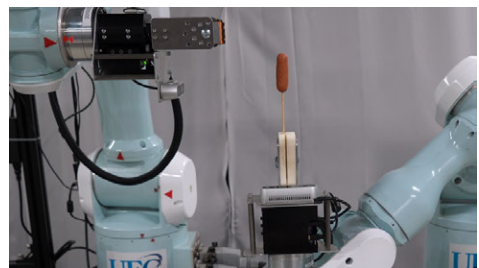
(c) 食材の準備位置



(d) 串の準備位置



(e) 刺す動作開始



(f) 結果

図 5.10: $S_1P_2G_{13}$ 一連動作

5.4.4 結果と考察

本実験では，SPG モデルの有効性を検証した．人間の指示に応じて，食材の把持と串刺し動作を実行する実験を行なった．人間が指示した刺し方は， S_1 や S_2 とした．実験の結果，把持方法としては，両方共に G_{13} が選ばれた．いずれの場合も，安定的な串刺し作業を達成した．SPG モデルの有効性を検証した．

第6章 多様な食材に対応するための拡張

本章では，多様な食材に対応するための拡張を検討する．串刺しはその種類も多岐にわたっているが，作り方は基本的に1個または複数個の食材を串に刺すことである．串刺しの種類の多さは使用する食材に大きく依存する．より多く種類の串刺しを作るため，多様な食材に対応する必要がある．

第5章では，代表的な食材を把持する実験を行った．現在実装されている食材用のエンドエフェクタは全ての食材に対応することは難しい．加えて把持できる食材は，必ずしも刺すことができるとは限らない．そこで，現在実装されているエンドエフェクタや刺す動作などの不足を検討し，より多くの食材に対応するために提案し，それに対する実験も行う．

6.1 現在対応不能な食材の分類

現在対応不能な食材は，主に把持動作が実行不能な場合と刺す動作が実行不能な場合の2種類に分かれている．そこで，具体的に対応不能な食材の種類と原因をまとめた．

6.1.1 平行な面がないもの

本研究では，平行グリッパおよびそれらに取り付けてあるエンドエフェクタから食材の把持操作を実行する．平行グリッパは，平行な面しか把持することができない．つまり，円錐など平行な面が存在しないものを把持することはできない．

6.1.2 崩れやすいもの

現在実装されているエンドエフェクタは，食材に圧力をかけ，摩擦力による食材の安定的な把持を実現する．すなわち，刺し通す最低限の力と拮抗する，食材とエンドエフェクタの間の摩擦力を生み出すためには，食材に圧力を与える必要がある．寒天や豆腐など圧力に対する極めて弱い食材の対応は難しいと想定している．

6.1.3 滑りやすいもの

前述した通り，食材の安定的な把持を実現するため，刺し通す最低限の力と拮抗する食材とエンドエフェクタの間の摩擦力が必要となる．しかし，切った人参やトマトなど把持する面が丸いものは表面が滑りやすい．滑らないために把持する力を増やした場合，食材を潰す恐れがある．

6.1.4 柔らかく変形が激しいもの

鶏皮，ピーマン，薄切り肉など，圧力を与えた場合元の形や体積が大きく変わる食材に対応することは難しい．このような食材は把持することができるとしても，体積が大きく圧縮されるため，ツール座標系の x 軸と z 軸から串を挿入する空間がなくなる．よって，極めて柔らかく，圧力を受けた場合に変形が激しいものに対応することは難しい．

6.1.5 硬いもの

第5章の先頭で述べた実験結果の判定基準において，必要となる時間と力の強さが挙げられる．にんじんやジャガイモなど簡単に把持できるが，安全を考慮した上で設定された力加減で刺し通すことは難しい．また，刺し通すことができて，作業完了まで多くの時間がかかる．ここで，同じ大きさの切断したジャガイモを用いて，実験を行った．横軸は時間であり，単位は秒である．縦軸は串を把持するハンドの力センサーから取得したデータであり，

単位はニュートンである．力の強さは串刺し作業に対して大きく設定された 14 N から 16 N まで，ジャガイモを刺し貫く仕様としている．結果として，74 秒経過しても刺し貫くことができなかったため，強制終了とした．よって，現在実装された手法では硬い食材に対応することができない．

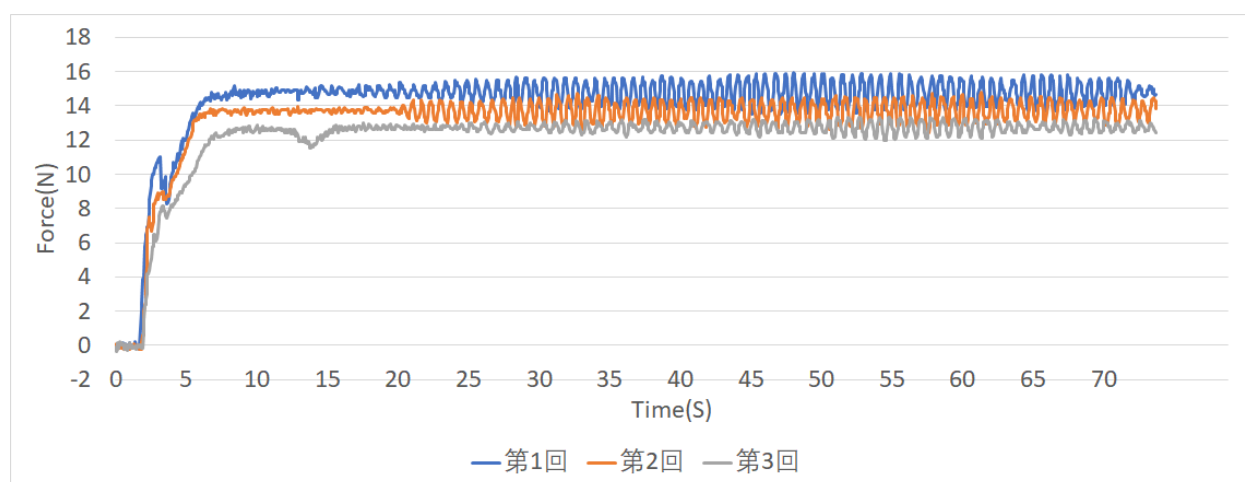


図 6.1: ジャガイモ刺し通し実験

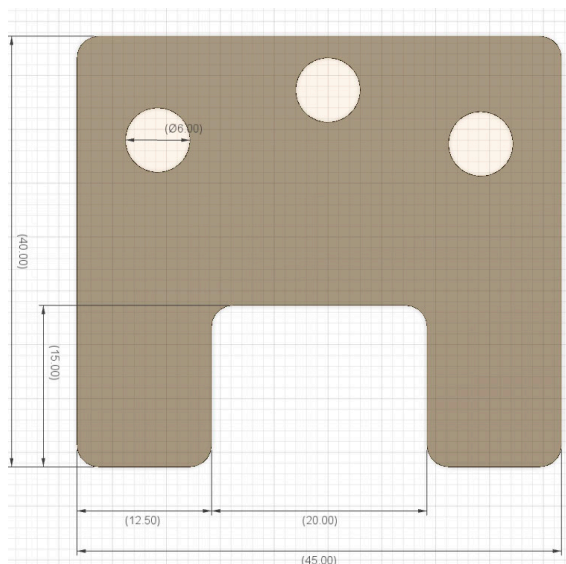
6.2 解決策

6.2.1 新しい食材用エンドエフェクタ

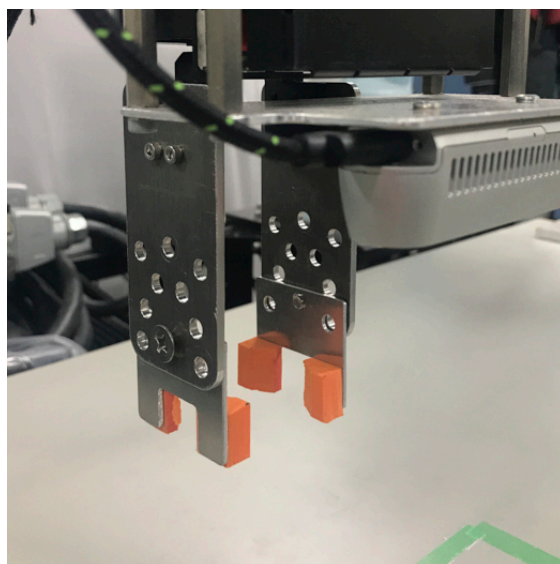
6.1.3 および 6.1.4 で述べた対応するのが難しい食材に対し，新しいエンドエフェクタの考案が必要となる．まず，以前のエンドエフェクタは食材に圧力を与え，生じた摩擦力より食材把持の安定性を保つ．それは大きな不足と考えられる．圧力に弱い食材に対応できるように，圧力と摩擦力以外で食材を抑える方法を考える．他に，現在のエンドエフェクタは SPG モデルにより，串とエンドエフェクタとの干渉が存在する．圧力を受け体積が圧縮され，かつ干渉する刺し動作は実行不能であり，対応できない場合がある．

そこで，現在のエンドエフェクタの弱点に対して，改善された新しいエンドエフェクタを提案し，実装した．元々のエンドエフェクタの 2 点把持から，4 点把持にした．空いている部

分は、串とエンドエフェクタの間の干渉を解消する効果がある。他に滑り止め策として、スポンジが取り付けられており、丸い食材に対応するため、スポンジが尖っている部分を削り、丸い形に合うようにした。



(a) CAD 設計図



(b) 実物

図 6.2: 新しいエンドエフェクタ

これより、まずは丸い食材が滑りやすい問題に対して、食材は串から挿入する力 f_{target} を受け、食材の安定性を保つのは摩擦力だけではなく、図 6.3 のように、後ろに収束する部分は抑える力を提供し、食材を一点にしっかり固定する。

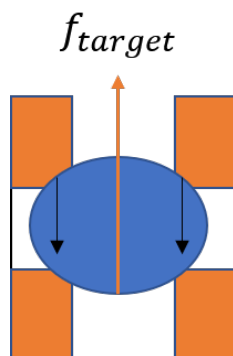


図 6.3: 新しいエンドエフェクタによる力分析

他に，新しいエンドエフェクタは把持点の間に 20 mm を空いてある．それは刺す動作を実行する際に，串とエンドエフェクタの干渉を解消するためのデザインである．

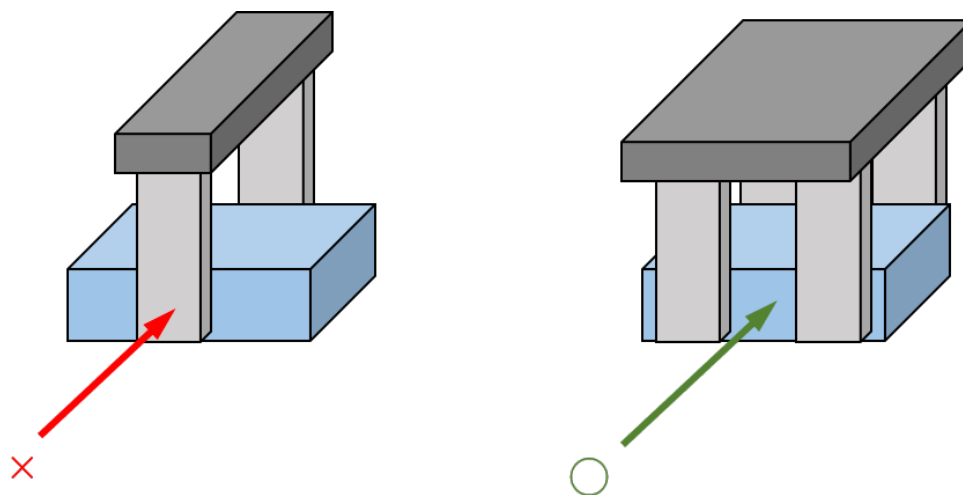


図 6.4: 串とエンドエフェクタの干渉の解消

よって，新しいエンドエフェクタはSPG モデルの把持動作の評価を更新した．串とエンドエフェクタの干渉が無くなり，×と判定された把持動作は○になり，把持動作の判定基準は人間が指示した刺す方向 S にかかわらず，ある食材がある置かれ方で放置され，それを把持して各食材の座標系軸方向から串を挿入することが可能である．

	G_{12}	G_{13}	G_{21}	G_{23}	G_{31}	G_{32}
P_1	△	△	×	○	×	○
P_2	×	○	△	△	○	×
P_3	○	×	○	×	△	△

表 6.1: 更新された食材の把持動作 G の評価

6.2.2 ねじる操作

6.1.5 が述べたように、現在実装した手法は硬い食材に対して対応できない。実際の生活や工業において、あるものを刺し通すとき、先端部が静止状態であることはほぼない。例えば、ドリルなどの機器は、高速回転する切削チップや往復運動するハンマーやチゼルによって穴をあける。より簡単に串を挿入するため、串をねじりながら刺す動作を行うことが効率的だと考えられる。現在実装したロボットにおいて、串をねじりながら食材を移動させ、刺す動作を実行するのはマルチスレッドが必要となる。そして、元々の作業完了条件は目標位置に到着した場合や力の上限を超えた場合である。マルチスレッドの場合、食材が指定位置に到着した後、串をねじる動作も停止し、マルチスレッドから飛び出して、次の動作を実現する。そこで、グローバルパラメータ `GL_is_end` を導入する。プログラムの最初から、このパラメータを `False` に初期化しておく。刺す動作に入ってから、メインスレッド待ち状態となり、食材の移動と串のねじりを同時に行う。食材が無事に目標位置に到着したら、グローバルパラメータ `GL_is_end` を `True` に設定し、串をねじるスレッドはそれを検出した場合に止まる。

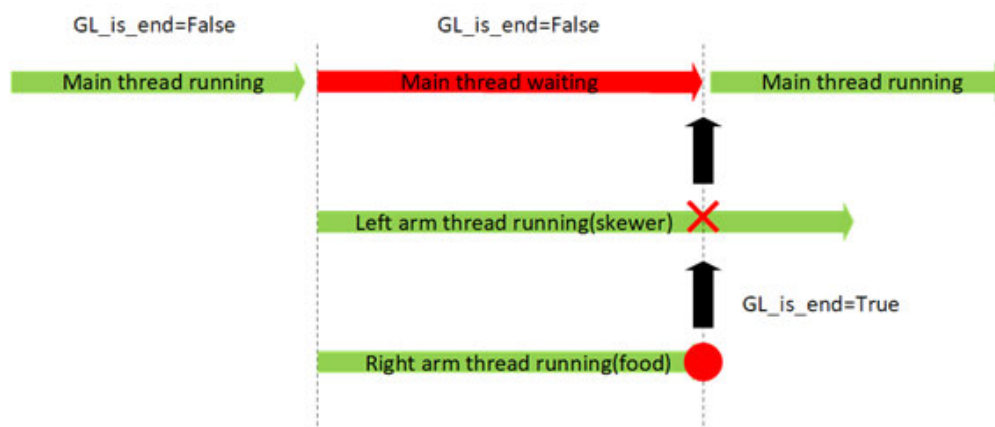


図 6.5: マルチスレッド

6.3 実験

6.3.1 新しいエンドエフェクタに対応可能な食材の検証

丸く滑りやすいトマトに対する実験

本実験では，丸く滑りやすい食材の例としてトマトを用いた実験を行った．

トマトは図 6.6 のように机の平面に置いた．トマトの表面に穴をあけたら，中の汁が漏れる可能性があり，かつエンドエフェクタからの圧力の影響で，吹き出す恐れもある．よって，グリッパのサーボモーターの出力は 70/250 と小さめに設置し，元のエンドエフェクタが実行不能な刺す動作，ツール座標系の y 軸から串を挿入する動作を行った．挿入する力も 7 N と小さめに設定した．トマトの置かれ方は P_3 であり，指示した刺す方向は S_2 とする．更新された SPG モデルより， G_{12} の把持動作を選んだ．刺す動作が完了して手先が初期位置に戻る際に，刺したトマトに接触しないようにするため，ベース座標系 z 軸方向の正方向から移動し，元の位置に戻る．

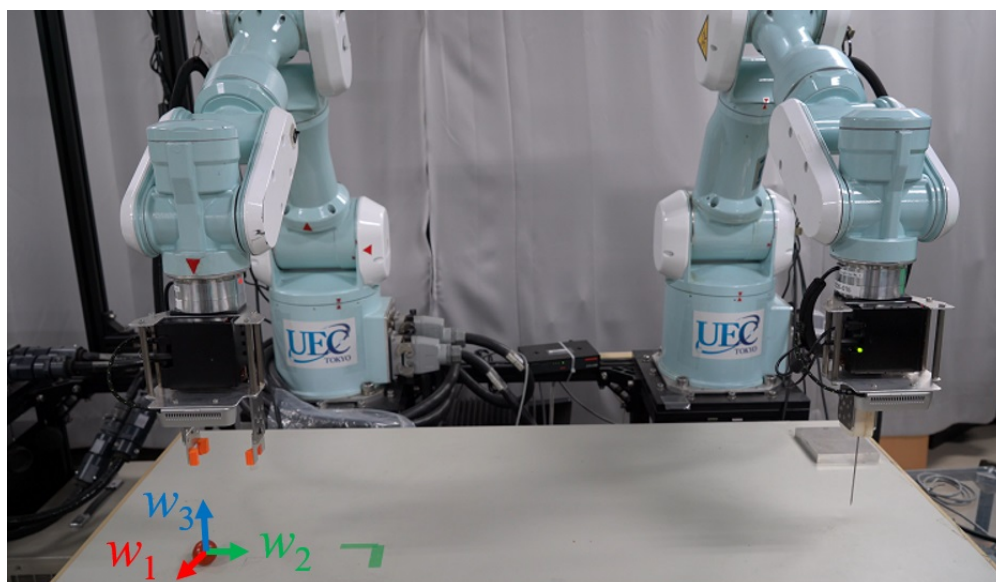
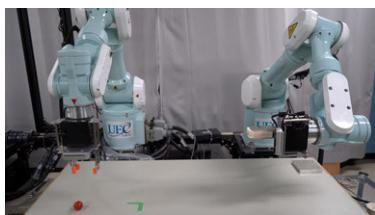
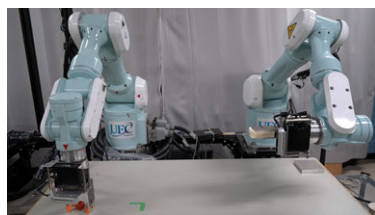


図 6.6: 初期状態

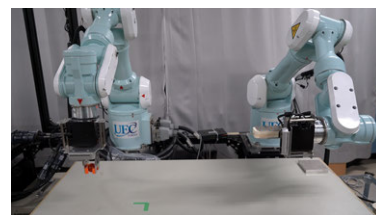
実験過程は図 6.7 で示す。



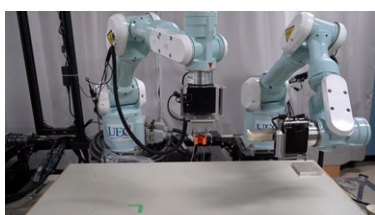
(a) 串の移動



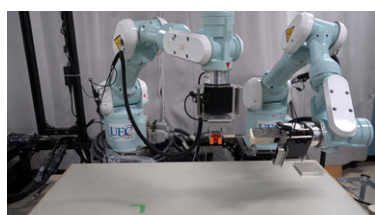
(b) 把持



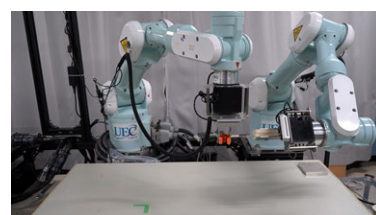
(c) 戻る



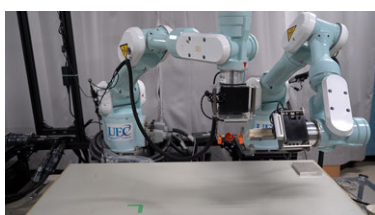
(d) 準備位置



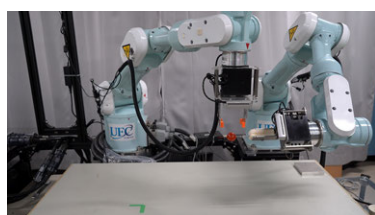
(e) ねじるその 1



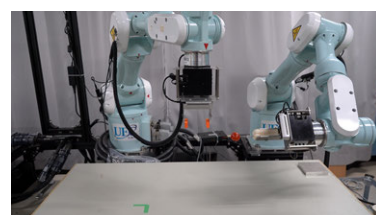
(f) ねじるその 2



(g) 目標位置に到着



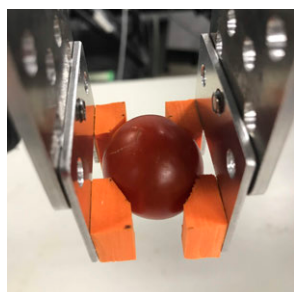
(h) 離れる



(i) 戻る

図 6.7: 丸く滑りやすいトマトに対する実験

実験結果として，まずトマトを把持する際に，サーボモーターの出力は小さめに設定しても，トマトがしっかり固定される．刺す動作が完了した後，串の挿入点と突出点を確認した．どちらも傷なく，汁が漏れずに全作業が終了した．



(a) 把持する様子



(b) 挿入点



(c) 突出点

図 6.8: トマトに対する実験結果

力センサーからのデータを収集し，力と時間および速度と時間の関係図を作成した．横軸は時間であり，単位は秒である．力と時間の図における縦軸は串を把持するハンドの力センサーから取得したデータであり，単位はニュートンである．速度と時間の図における縦軸はその時刻の速度であり，単位は m/s である．

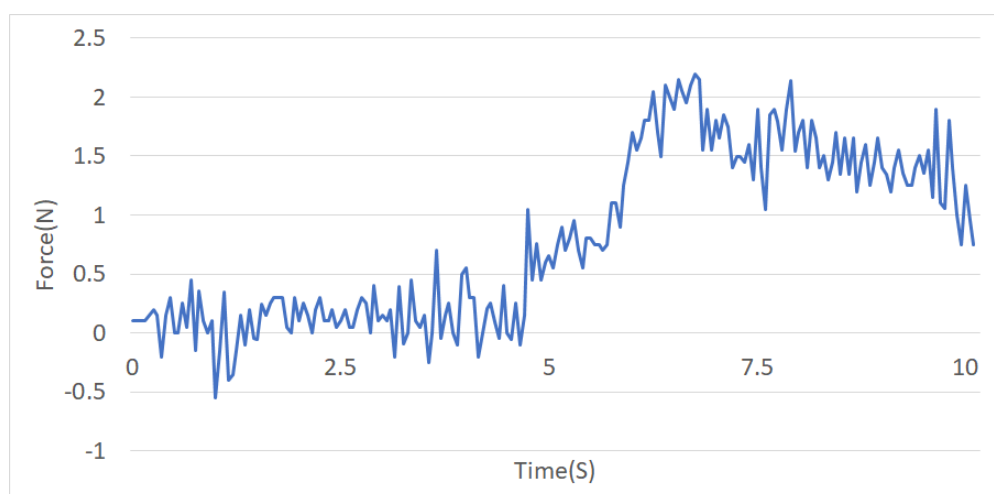


図 6.9: 時間と力の関係図

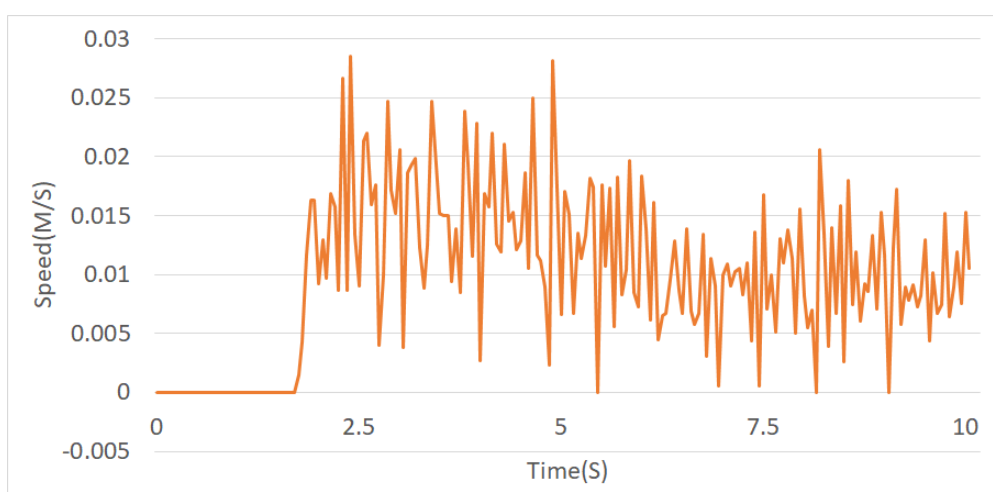


図 6.10: 時間と速度の関係図

結果より，丸く滑りやすい食材は新しいエンドエフェクタで対応することが可能である．

変形が激しい食材に対する実験

6.1.4 で述べた変形が激しい食材に対して，新しいエンドエフェクタの有効性を検証する．食材は薄切り肉を用意した．図 6.11 のように食材座標系を立ち上げた．

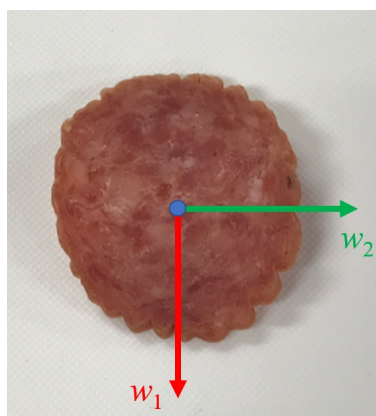


図 6.11: 薄切り肉

SPG モデルより，把持動作 G_{21} を選択した．以前のエンドエフェクタを用いて，把持する際に，食材がツール座標系の xz 平面に圧縮され， x 軸または z 軸から串を挿入する空間が無くなり，かつ y 軸方向は串とエンドエフェクタの間に干渉が存在するため，刺すことができ

ない．現在実装されている新しいエンドエフェクタで把持した場合，第2軸が折り目となり，薄切り肉は山折りにされる．食材の第1軸，つまりこの時のツール座標系の y 軸方向から串を挿入することが可能である．

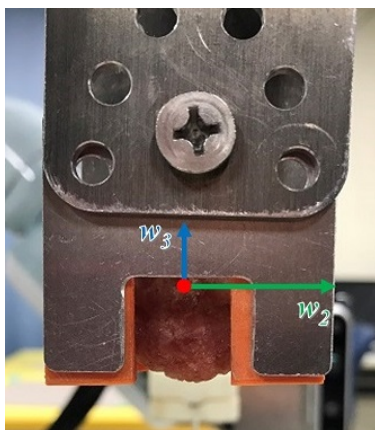


図 6.12: 薄切り肉が把持された様子

SPG モデルを用いた作業記述の表現は $S_1P_3G_{21}$ である．ロボットの動作はトマトの実験における図 6.7 と同じである．結果的に，変形が激しい食材として，薄切り肉に対する串刺し作業が成功した．新しいエンドエフェクタは変形が激しい食材への対応が可能である．しかし，動作が完了した後，把持された食材の様子が一様ではない．想定と実験結果が異なる場合がある．

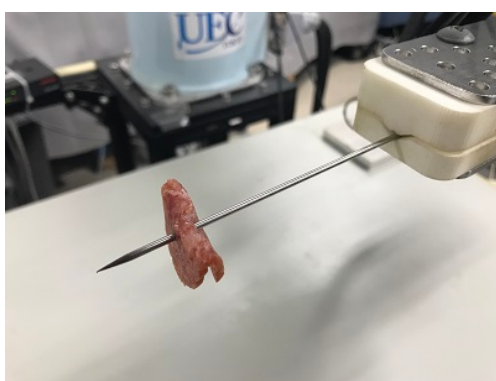


図 6.13: 薄切り肉に対する作業結果

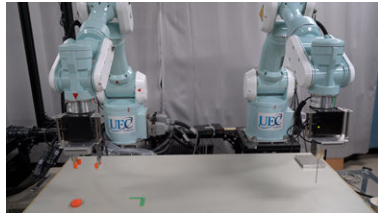
6.3.2 串をねじる操作の有効性検証

6.1.5 で述べた硬い食材への対応は，6.2.2 で提案した串をねじる操作より，有効性を検証する．

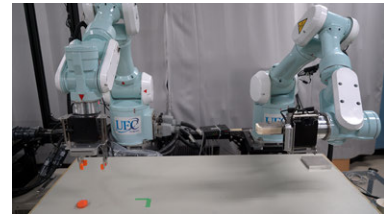
作業終了まで時間の長さと刺し通すために必要な力を両面から評価する．トマトの実験では，柔らかい食材に対してねじる操作の効果を確認していない．そこで，硬い食材として，図 6.14 のようににんじんを同じ大きさの塊に切断したものを用意した．厚さを同じ 10 mm にした．刺す方向は把持してからツール座標系の z 軸方向，つまり切断した面から串を挿入する．力制御の基準となる力 f_{target} の大きさを 10 N とした．直径 2 mm の金属串を使用し，串が 40 mm の深さまで刺さったところで串刺し作業を終了とした．刺す動作の開始から完了まで串を往復 90 度ねじった場合とねじらなかった場合の，串を把持するハンドの力覚センサのデータを収集した．



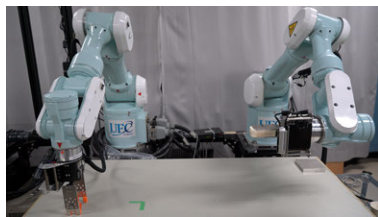
図 6.14: ねじる操作を検証するためのにんじん



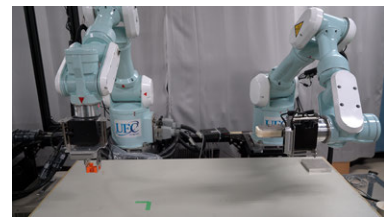
(a) 初期状態



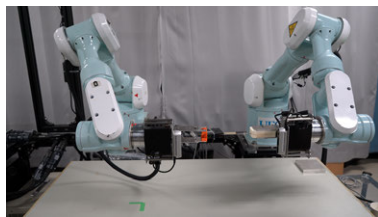
(b) 串の準備位置



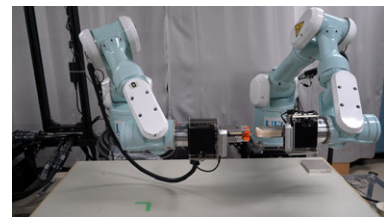
(c) 食材の把持



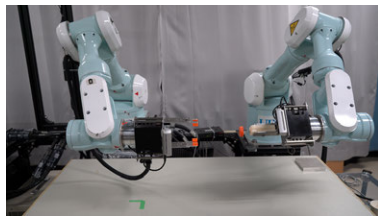
(d) 持ち上げる



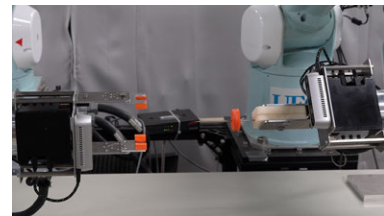
(e) 刺す動作の準備位置



(f) 刺す動作開始



(g) 刺す動作終了



(h) 結果

図 6.15: 串をねじる実験における共通過程

串をねじる実験の共通過程は以上で示す．過程 (e) と過程 (f) の間に，串を往復 90 度ねじったこととねじらなかったことで，ねじる操作を実行したか否かを区別する．

そして，力センサーからのデータを収集し，力と時間および速度と時間の関係図を図 6.16 と図 6.17 のように作成した．横軸は時間であり，単位は秒である．力と時間の図における縦軸は串を把持するハンドの力センサーから取得したデータであり，単位はニュートンである．速度と時間の図における縦軸はその時刻の速度であり，単位は m/s である．青い曲線は串をねじった場合であり，赤い曲線は串をねじらなかった場合である．

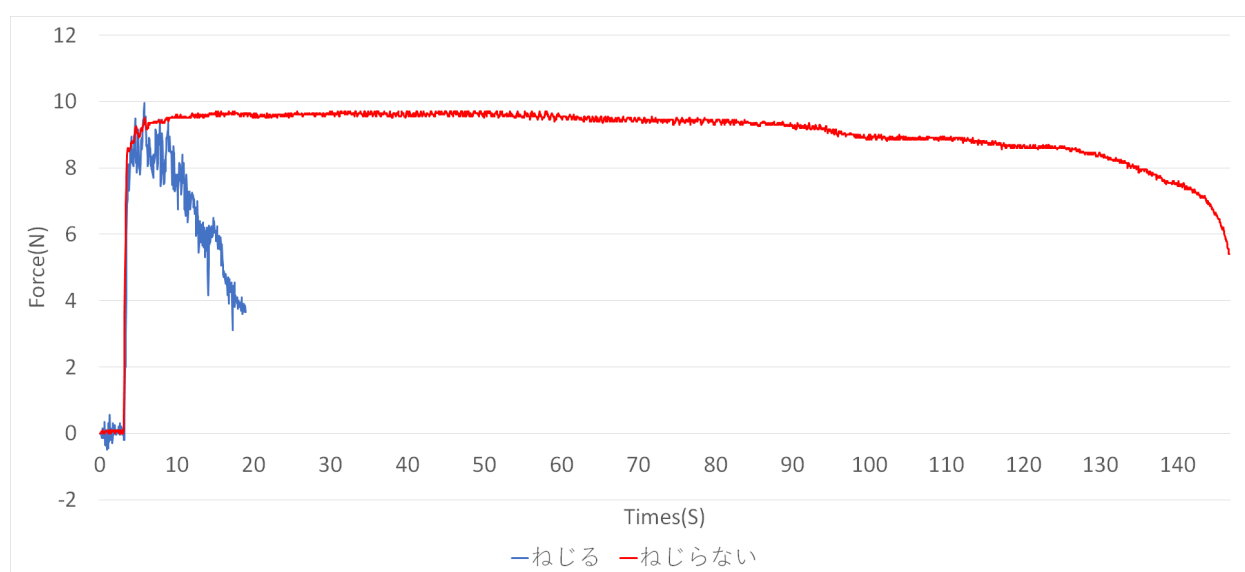


図 6.16: ねじる操作における力と時間の関係図

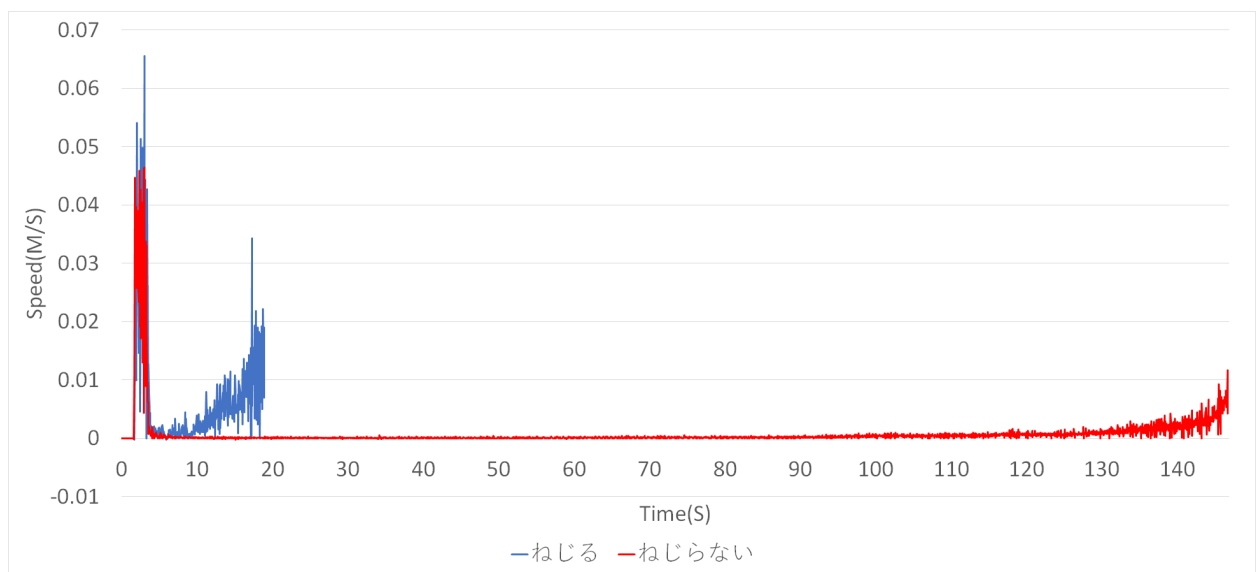


図 6.17: ねじる操作における速度と時間の関係図

刺し通すことが難しい硬い食材に対して，串をねじった場合の方が，終了までにかかる時間が短くなっており，かつ平均的な力の強さが低く，ねじる動作の有効性が確認できる．

6.3.3 複数食材の串刺し操作実験

本実験では，提案した手法を統合し有効性を検証する実験である．複数の食材を用意し，ツール座標系の各方向から串を挿入することで，エンドエフェクタやSPGモデルを検証する．串を串用エンドエフェクタで把持したとき，把持部以外の挿入部の長さは100 mmである．刺せる食材の数と体積を考慮した上で，トマト，にんじん，ウインナーの3つの食材を用意した．提案した食材の認識手法より，食材座標系は図6.18のように立ち上げた．

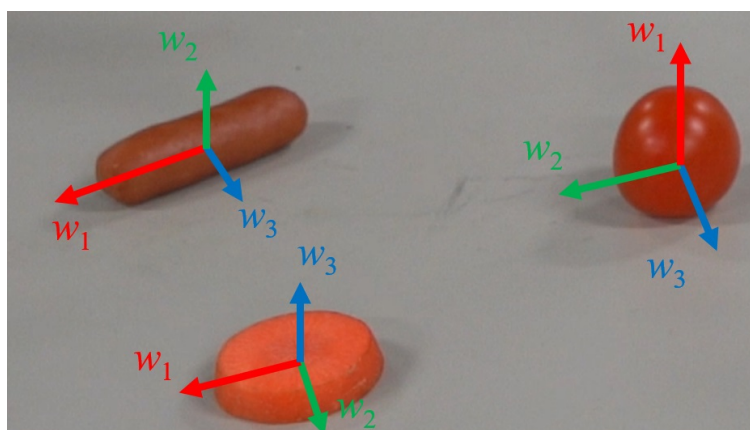
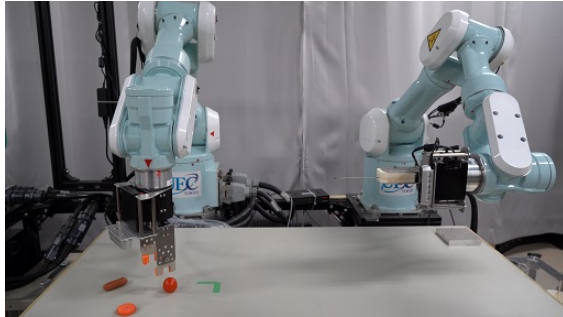


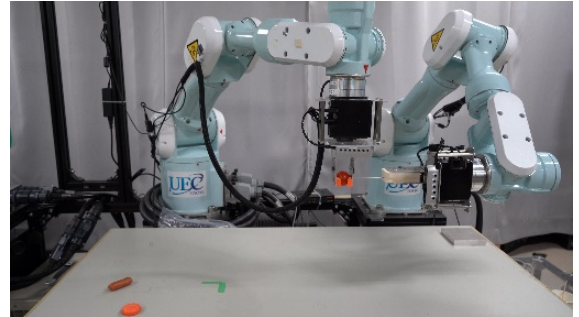
図 6.18: 複数食材の串刺し操作実験の食材座標系

認識手法より，トマトの置かれ方は P_1 であり，にんじんは P_3 で，ウインナーは P_2 である．人間が指示した刺す方向として，トマトとにんじんの S_3 ，ウインナーは S_1 である．

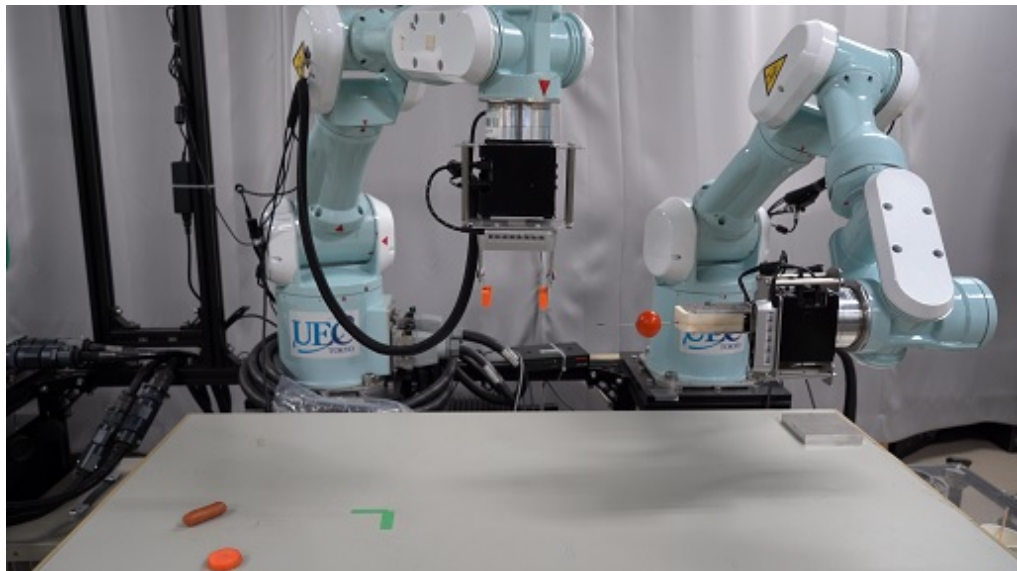
まず，トマトを G_{23} の動作で把持する．そして，食材座標系の第3軸，つまりツール座標系 y 軸から串を挿入する．



(a) トマトの把持



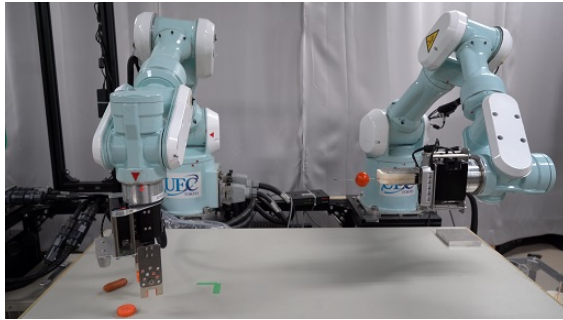
(b) 刺す動作開始



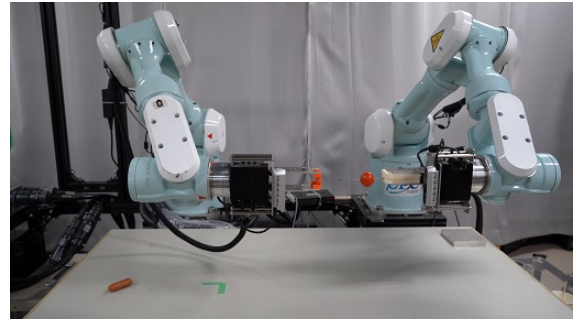
(c) 結果

図 6.19: トマトに対する一連の動作

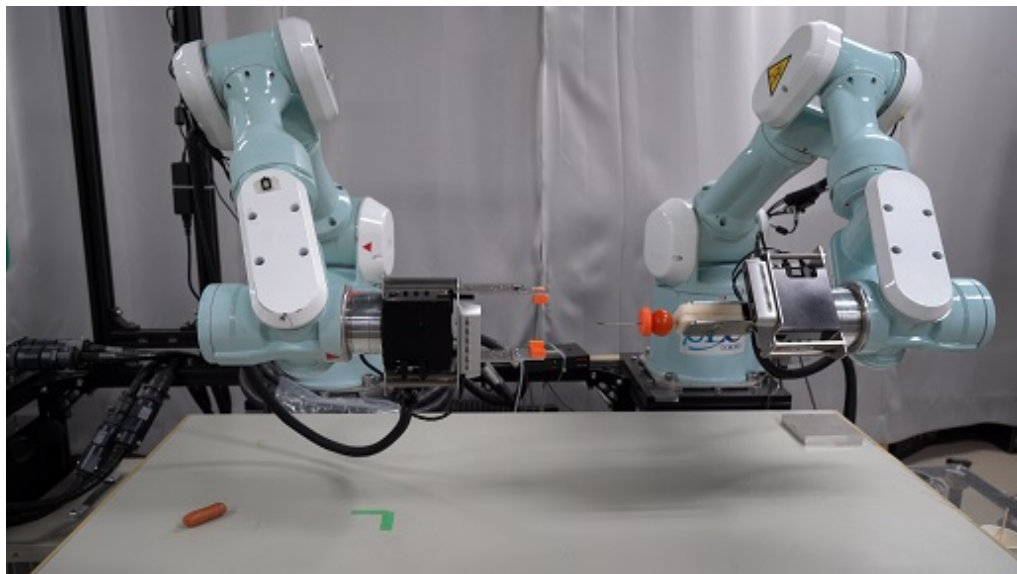
次に、にんじんを G_{12} の動作で把持する。作業が始まる前に、トマトの中心位置と第3軸における長さから、にんじんの目標位置を計算する。そして、にんじんが硬い食材であるため、串をねじりながら食材座標系第3軸、つまりツール座標系 z 軸から挿入する。



(a) にんじんの把持



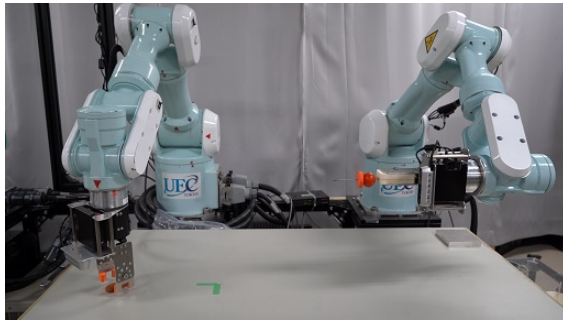
(b) 刺す動作開始



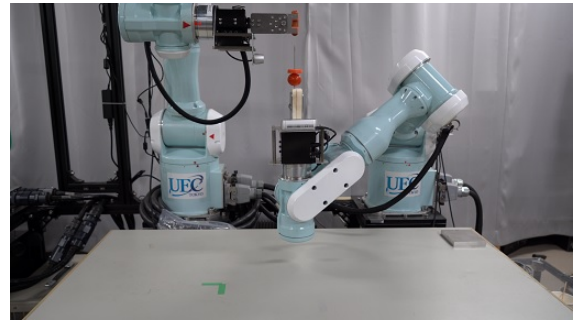
(c) 結果

図 6.20: にんじんに対する一連の動作

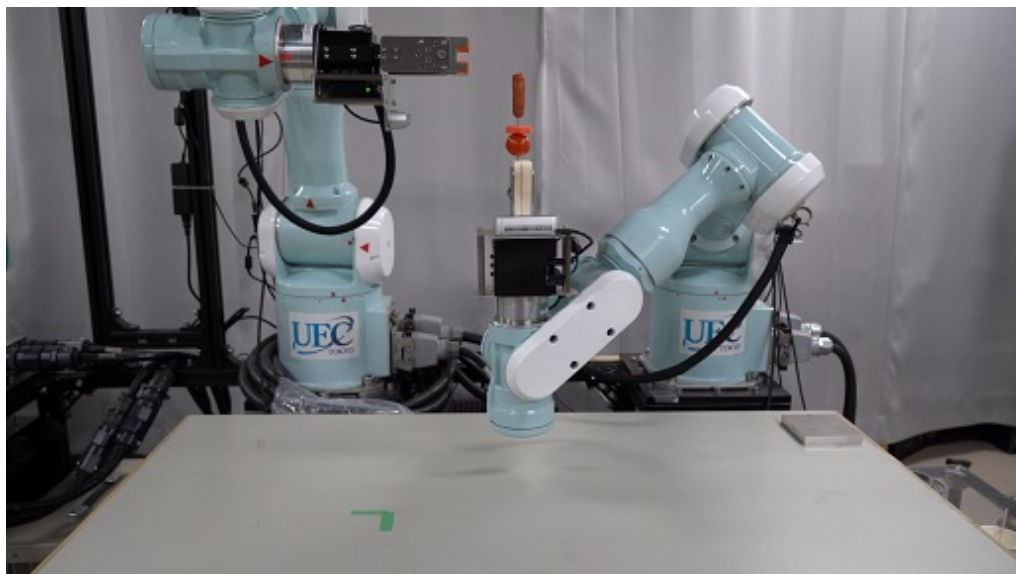
最後に、ウインナーを G_{13} の動作で把持する．作業が始まる前ににんじんの中心位置と第3軸における長さから、ウインナーの目標位置を計算する．そして、この時に串がトマトとにんじんの重量より下に曲がる恐れがある．重力の影響を防ぐため、垂直刺す動作で作業を行う．串を食材座標系第1軸、つまりツール座標系 x 軸から串を挿入する．



(a) ウインナーの把持



(b) 刺す動作開始



(c) 結果

図 6.21: ウインナーに対する一連動作

結果，提案手法に対する統合実験は成功した．本研究で提案した手法の有効性が検証された．



図 6.22: 統合実験の結果

第7章 結言

7.1 まとめ

本論文では，双腕ロボットと視覚情報を用いて串刺しを作成することを題材として，以下のような具体的な課題に取り込んだ．

1. 串刺しを実現するために必要な要素を検討した．
2. SPG モデルより，実世界における作業の記述を抽象的なロボット操作へ変換した．
3. 本研究で提案した手法および拡張手法を実装し，評価実験を行った．

1において，串刺しの要素を串の把持，食材の把持，刺す操作としてまとめて，ロボットにおける操作を実現するための前提条件を確立した．

2において，作業に対する記述方法として，SPG モデルを提案した．人間の指示や食材の置かれ方から，動作の評価をし，ロボットの動作手順を生成した．

3において，提案した手法や拡張手法を実装し，串や食材の扱いに対する評価実験を行い，結果をまとめた．

結果として，本研究は串刺し作業の要素を検討し，作業に対する記述方法を提案し，ロボットの動作手順を生成した．提案した手法を検証するため，検証実験を行った．更に多様な食材に対応するため，新しい食材のエンドエフェクタやねじる操作を導入し，検証した．最後の統合実験において，複数の食材の串刺し操作は成功した．最後に，本研究は双腕ロボットを用いて串刺し操作を実現した．

7.2 今後の展望

まず、実験をする際に、人が事前に決めたのはSPGモデルの「S」だけではなく、食材の種類も人が決定した。現在実装した手法は切断した食材に対する種類の判断ができないため、食材の把持や刺す操作で用いるパラメータを事前に指定する必要がある。よって、食材に応じて自動的にパラメータを選択するシステムの構築は検討している。

そして食材は形や種類が多岐にわたって存在する。全ての形に対応するため、人間の手のような柔軟性のあるグリッパやエンドエフェクタの開発が必要となる。その際に、SPGモデルの更新や適用性の考察も必要となる。

謝辞

本論文を作成するにあたり，最後まで温かく見守り，適切な指導を賜った指導教員の末廣尚士教授や工藤俊亮准教授に感謝いたします。また，先輩としてご指導をいただきました滝澤優さん，董晨宇さんに感謝の意を表します。そして，実験や日本語の修正などご協力頂いた瀬尾篤さん，見ル野雄大さん，ターバーフィールドミシェル潔美さん，于亮亮さんに感謝申し上げます。最後になりましたが，これまで温かい目で見守ってくれたゼミの友人たちや家族に，深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 総務省. 令和元年版情報通信白書. 2019.
- [2] Anders Pettersson, Steve Davis, John O. Gray, Tony J. Dodd, and Tomas Ohlsson. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes. Vol. 98, pp. 332–338, June 2010.
- [3] D. Gallenberger, T. Bhattacharjee, Y. Kim, and S. S. Srinivasa. Transfer depends on acquisition: Analyzing manipulation strategies for robotic feeding. In *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 267–276, March 2019.
- [4] M. Beetz, U. Klank, I. Kresse, A. Maldonado, L. Mösenlechner, D. Pangercic, T. Rühr, and M. Tenorth. Robotic roommates making pancakes. In *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 529–536, Oct 2011.
- [5] Mario Attilio Bollini. *Following recipes with a cooking robot*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [6] 長野恵典. 双腕ロボットによるサンドイッチの作成に関する研究. 電気通信大学情報理工学研究科情報学専攻 2017 年度修士論文, 2017.
- [7] 国立研究開発法人産業技術総合研究所. OpenRTM-aist. <http://www.openrtm.org/openrtm/ja/content/openrtm-aist-official-website>.
- [8] 末廣尚士. RtcHandle - 使い方とそれを用いた rtc 利用環境の構築. http://www.taka.is.uec.ac.jp/~suehiro/rtm0.4.2/rtc_handle.html(2017.01.26 閲覧).

- [9] 今井啓明. 双腕ロボットによる料理作業実現のための食材の切断に関する研究～抽象操作記述と対象認識に基づく動的軌道生成～. 電気通信大学 IS 科 MS 専攻 2015 年度修士論文, 2015.