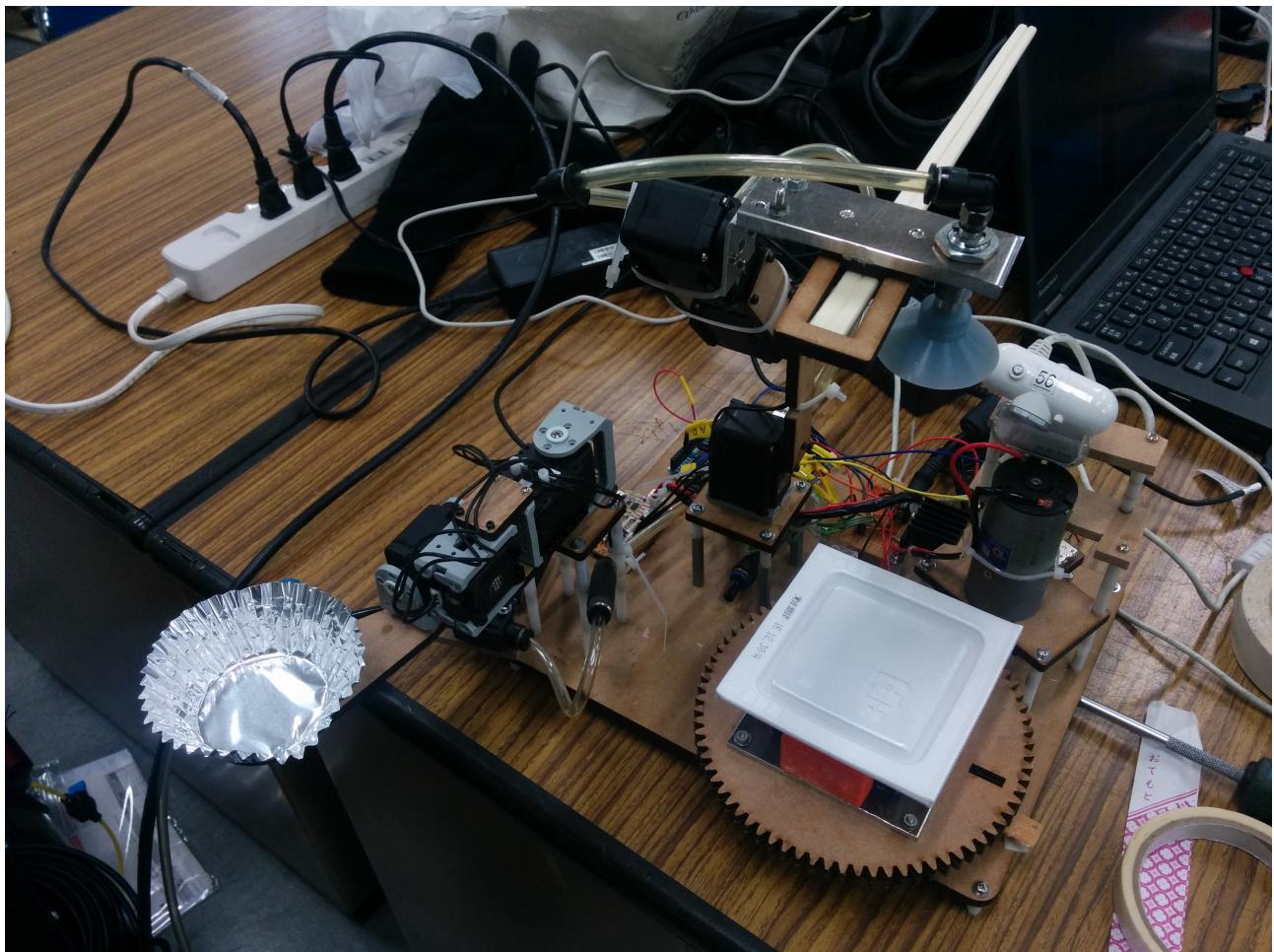


# 自主プロジェクトレポート 「フルオート納豆メーカー」



# 1.目的

納豆をパックされた状態から開封し、かき混ぜるまでを全て全自動で行う。

## 2.動作の説明

上記目的を達成するためには数多くのタスクが存在するある。例えば以下の7つに分けられる。

- ①納豆の固定
- ②蓋の開封
- ③蓋の分離
- ④醤油袋の除去
- ⑤からし袋の除去
- ⑥シートの除去
- ⑦醤油の投入
- ⑧かき混ぜ

今回はこれを「吸盤・箸付き平面三自由度アーム」「回転土台」「醤油投入機構」の3機構で実現した。

動作動画は youtube にアップロードしたので、よろしければそちらも見ていただきたい。

<https://youtu.be/wH06XyBaflc>

CAD・プログラム・プレゼン資料は github にアップロードした。

<https://github.com/Forest-S/Jishupro>

### 2.1 納豆の固定

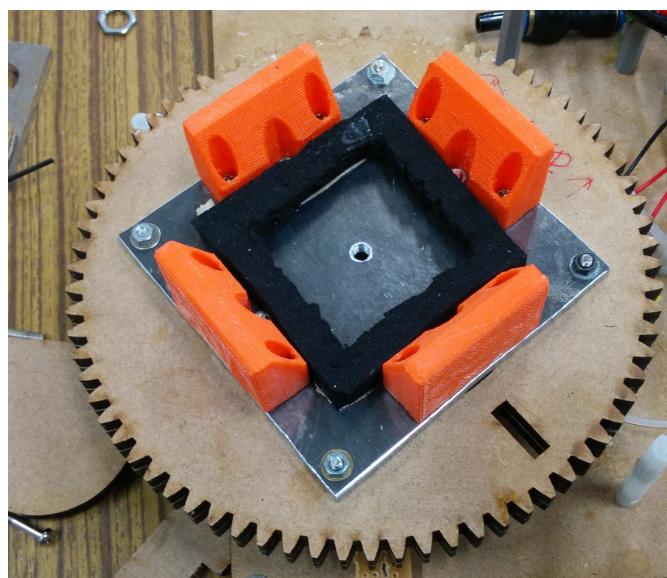


図 2.1 土台

回転土台は上図のようなものである。これに納豆を両面テープで固定することで納豆を固定した。

当初の設計では、土台に吸着固定する予定であったが、製作後以下の問題が判明した。

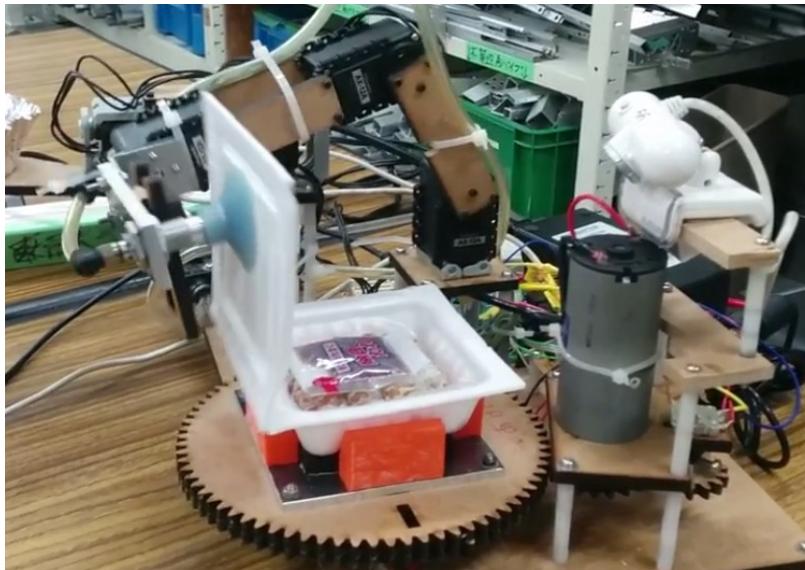
・納豆パックの底面は凹凸が激しく、高い負圧を発生させた上でしっかりと抑えつけなければ固定されない

・減圧に用いた圧縮空気の消費が非常に激しい

圧縮空気エアコンプレッサで常に供給し続ければこの方式も不可能ではなかつたが、発表ではペットボトルを使用する予定だったので、この方式は無理だと判断し、テープ固定にした。

吸着を用いようとしたのは、実用性も考えて固定の手間を省こうとしたことによる。

## 2-2.蓋の開封

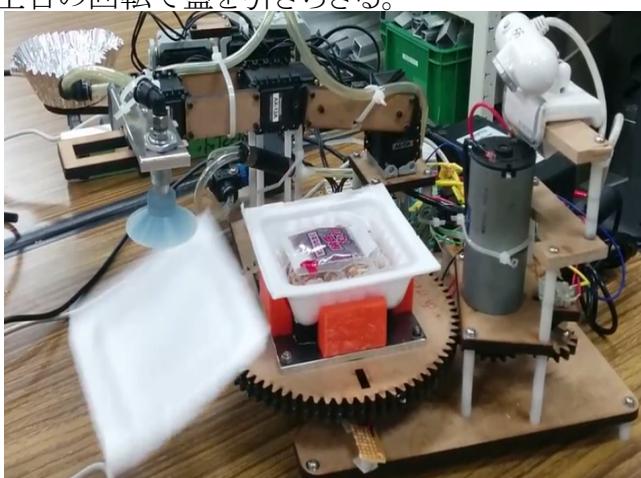


吸盤のアームを用いて蓋を開封する。吸盤は減圧することで、対象に吸着する。

## 2-3.蓋の分離

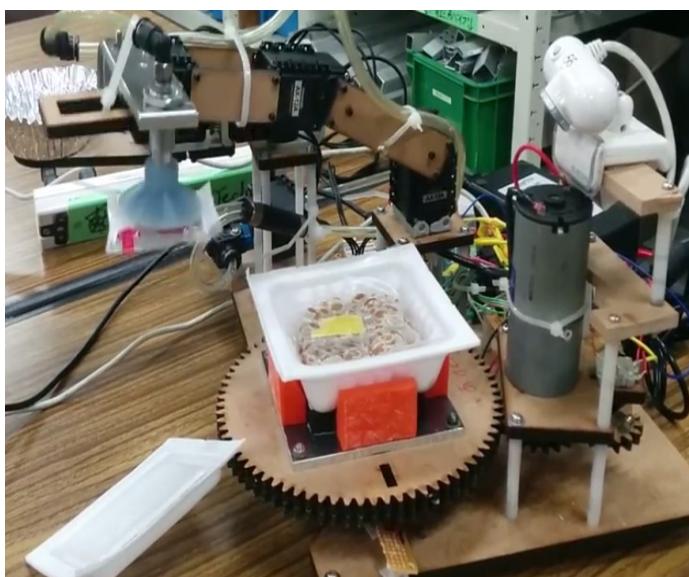
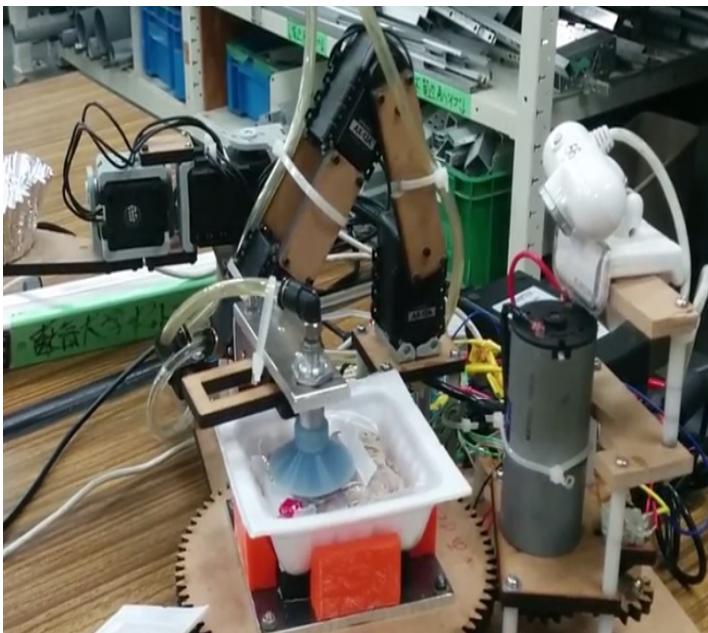


土台の回転で蓋を引きちぎる。



その後横に落とす。

## 2-4.醤油袋の除去



アームの吸盤で醤油袋を掴んで横に落とす。

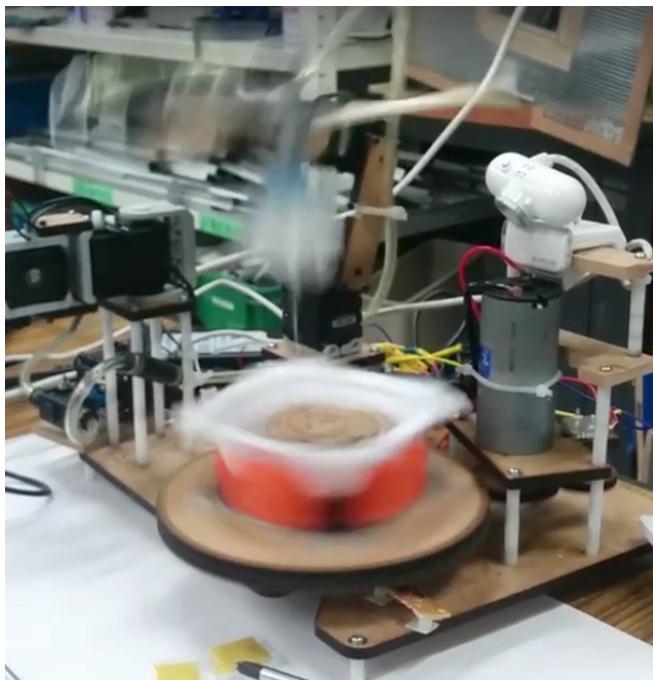
醤油袋はそこそこ大きいため、およそ真ん中に決め打ちしても高確率で除去することができたが、たまに失敗するためUSBカメラによって位置の認識を行った。アームは平面内しか動けないため、土台の回転と組み合わせることでどこに醤油袋があっても除去することができる。

## 2-5.からし袋の除去

醤油と同様にからし袋も除去する。

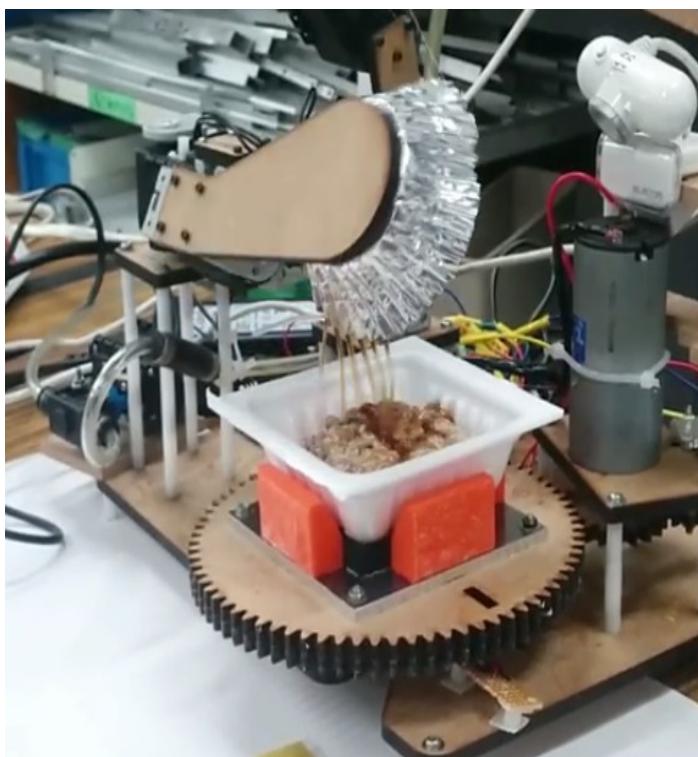
からし袋は非常に小さいため、こちらは決め打ちで除去できる確率はかなり低かったが、画像認識を用いることでほぼ確実に成功するようになった。

## 2-6.シートの除去



アームの吸盤でシートも除去する。  
納豆の糸を切るため、アームを上下し、土台を回転させる。

## 2-7.醤油の投入



予め別の容器に入れておいた醤油を、専用のアームによって投入する。  
除去した醤油袋を用いることも検討はしたが(例えば針を刺すなど)、難易度が高いと考え断念した。  
からしを入れたければ一緒に混ぜておけば可能である。

## 2-8.かき混ぜ



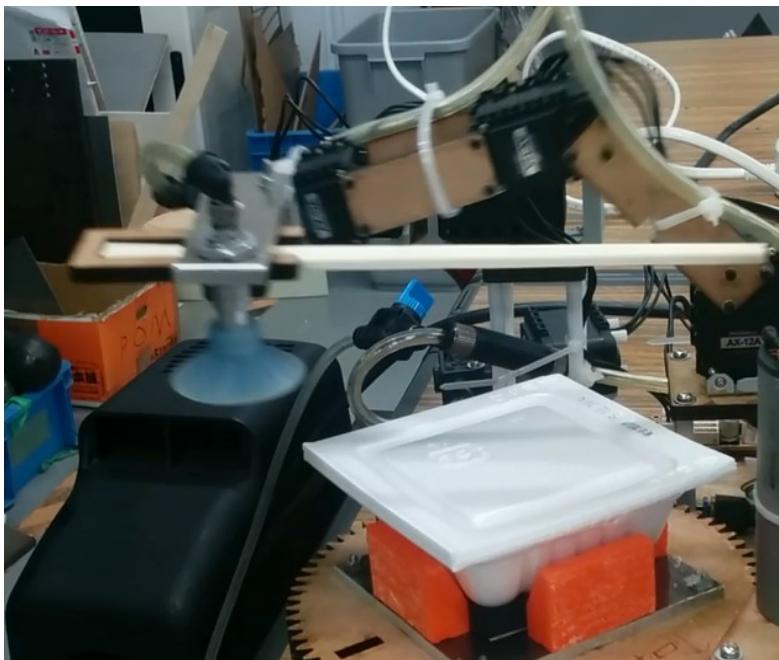
アームに横向きに取り付けられた箸を倒して納豆に挿入し、土台を回転させることでかき混ぜる。箸が回転中心からずれているため、ただ回しているだと納豆が真ん中に集まってしまいあまり混ざらない。そこで混ぜながら箸の位置を少し変える動作を入れている。

### 3.機構

SolidEdge で 3DCAD を作って製作した。

主に MDF ボードのレーザー加工とスペーサーを多用し、安く・早く製作できる設計を心がけた。

#### 3-1.吸盤・箸付き平面三自由度アーム



サーボモータを 3 つ用いた三自由度シリアルマニピュレータである。サーボモーターは機械情報演習で用いた Dynamixel AX-12A を使用している。

先端には吸盤が取り付けられ、減圧することで吸着できるようになっている。減圧には真空発生器を用いている。圧縮空気を高速で流すことで減圧される仕組みである。圧縮空気はペットボトルに自転車の空気入れで充填した。



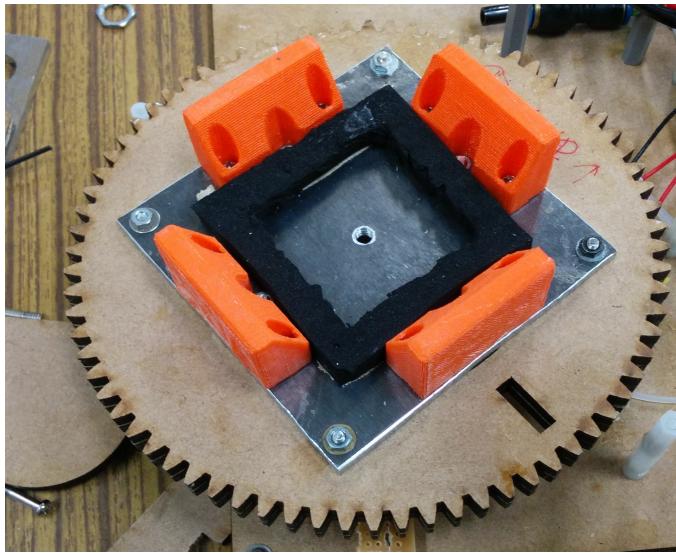
オンオフは手動のハンドバルブをサーボモーターで回すことで制御している。

当初は電磁弁を用いる予定であったが、用意したものが低圧用で有効断面積が小さく、真空発生に十分な流量を確保できなかつたため方針転換した。

この吸盤によって蓋の開封・醤油からシートの除去を達成する。

また横向きに箸が取り付けられる。ネジ二本で板を抑えつけるように固定されており、簡単に交換が可能である。

### 3-2.回転土台



納豆を固定し、DC モーターにより回転する。蓋の引きちぎり、醤油袋及びからし袋の位置合わせ、かき混ぜを行っている。

土台ごと巨大なギヤになっており、回転はギヤを介することで行っている。軸受けはホームセンターにある小さなターンテーブルを使用している。DC モーターは TG-85R というモーターを使用している。定格 12V で出力 17W ほどあり、ギヤによる減速も含め、最大回転数は 5rps ほどである。下にフォトインタラプタがついていて土台のスリットを検知することで、この位置に戻ることが可能である。

ギヤは MDF 板のレーザーカット、その上にある土台はアルミ板、納豆のガイドは 3D プリンタ、固定部分はスポンジによって製作した。

#### (以下没となった機能)

回転数計測用にロータリーエンコーダがついている。これを用いて速度や回転数を制御することを考えていたが、200 円程度の安物で精度が悪く使い物にならなかつたため断念した。

また本来は納豆を吸着固定する予定だったので、そのための工夫がいくつかある。

- ・真ん中にチューブが通る穴が空いている
- ・固定部分は柔らかいスポンジを用いている
- ・空気を通さないよう、MDF 板ではなくアルミ板を敷いている
- ・チューブの接続はワンタッチ継ぎ手という(一応)回転自由度のある継ぎ手を使った接続方法を用いている。これは回転中心についているのでからまることはない

### 3-3. 醤油投入機構



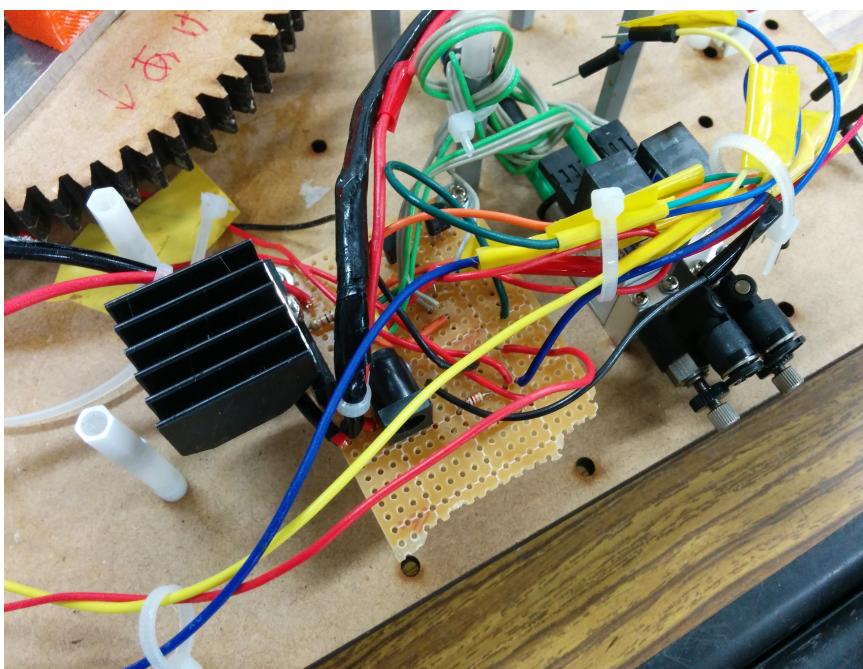
醤油の投入を行う機構である。皿に予め醤油を入れておき、アームにより投入する。納豆の上に皿を持ってくる自由度と、皿を倒して醤油を投入する自由度を持つ。

皿は衛生面も考慮し、使い捨ての銀皿を両面テープで固定することで簡単に交換可能になっている。

あまり速く動かしすぎると加減速時に醤油がこぼれてしまうため、速度を sin カーブで指令することにより滑らかに動作するようにしている。

お好みでからし等を混ぜることで他のものも恐らく投入可能である。但しねぎを入れようとしたところ、醤油で皿にひつついてしまいほとんど入らなかった。

## 4. 回路



大したものはないが、数多くのデバイスを使用したため、いくつか回路が必要であった。

パターン設計まではしてないが全てユニバーサル基板上に実装し、しっかり土台に固定しておいたため製作後に故障することはなかった。またマイコンとして Arduino を用いている。

### 3-1.DCモータードライバ

土台回転のモーター駆動用である。TA7291Pを用いた。

Vref端子には常に12Vを接続しておき、IN端子にPWM信号を送ることでduty制御を行った。最初はVrefのVccに対する割合で電圧が出力されると勘違いしており、Vref端子にArduinoからPWM信号を送るものを作ったが、実はVrefの電圧が出力される、つまりこれだと最大5Vしか出力されないことが判明したため、上記の方法に変えた。

### 3-2.12V電源端子

ACアダプタでサーボモーターとDCモーターに12V電源を供給している。

### 3-3.フォトインタラプタ用回路

赤外線LEDを照射するための抵抗、赤外線受信にはプルアップ抵抗が付いている。

### 3-4.電磁弁駆動回路

220mAの電流を流す必要があったため、Arduinoのデジタルpinの信号をトランジスタで増幅した。

### 3-5.エンコーダ回路

GNDを接続しただけである。

### (3-6.サーボ基盤)

市販品。12V電源を供給するためのケーブルのみ自作。

## 4.制御

### 4-1.アーム制御

Dynamixelのサーボモーターは、位置だけでなく様々なパラメータを設定したり、情報を取得することができる。これをを利用してなるべくスムーズにタスクをこなせるよう制御を行った。

#### 4-1-1.位置制御

アームは平面三自由度であるが、最先端は回転中心と吸盤がほぼ一致した設計になっている。よって根本の二自由度で位置を決め、最先端の自由度で姿勢を決めて問題ない。これにより幾何的に簡単な計算式で逆運動学を解くことができる。具体的には以下のような式である。

添字dはx,y,θの目標値である。

$$d_1 = \frac{x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1}$$

$$d_2 = \frac{x_d^2 + y_d^2 - l_1^2 + l_2^2}{2l_2}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \pm \arctan\left(\frac{\sqrt{(x_d^2 + y_d^2 - d_1^2)}}{d_1}\right)$$

$$\theta_2 = \mp \arctan\left(\frac{\sqrt{(x_d^2 + y_d^2 - d_1^2)}}{d_1}\right) \pm \arctan\left(\frac{\sqrt{(x_d^2 + y_d^2 - d_2^2)}}{d_2}\right)$$

$$\theta_3 = \theta_d - \theta_1 + \theta_2$$

解は2つ出てくるが、第二関節のy座標を計算して大きい方を採用することで干渉が起こらないようにした。実はこの方法だとxが正から負となるときに激しい動きをする可能性があったが、今回はそのような状況にはならないため、このような単純な選択法でも問題はなかった。

理論上はこうであるが、実際はズレが生じていてそれが原因で蓋が空けられなかつたりした。トルクのかかり具合などが原因だろうか？

#### 4-1-2.速度制御

単純に上記のような位置指定だけだと負荷の小さい関節が先に収束してしまうため、軌跡が予想できないものとなる。更に最高速で収束させようとするため振動が激しく、不安定になる。これでは少々制御が行いにくいため、速度もきちんと制御を行うことで緩和した。

具体的には毎周期ごとにサーボの現在角度を取得して、先端の現在位置を計算、そこから目標位置まで直進するような角速度を計算し、各サーボに角速度指令を行った。これなら理論上軌跡は直線で、各サーボの収束も同時となり安定するはずである。更に直進速度は任意に与えることができるので、慎重に行いたい場面ではゆっくり動かすといった制御を行うことができた。

具体的には以下の式となる。所詮二自由度でヤコビアンが  $2 \times 2$  なので単純に逆行列を解いただけである。

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{pmatrix} l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & -l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} x_{dest} - x_{now} \\ y_{dest} - y_{now} \end{pmatrix}}{\sqrt{\begin{pmatrix} x_{dest} - x_{now} \\ y_{dest} - y_{now} \end{pmatrix}^2}} v_{dest}$$

これも実際には理論通りの直線の描くのは難しかった。また移動角度が小さいとき、トルクの小さい関節が先に収束してしまつたりした。

#### 4-1-3.収束判定

Dynamixel サーボは現在角度を取得することができる。位置指令を送った後、適当にウェイトを入れる方法もあったが、せっかくなので現在位置を計算して収束判定を行った。

具体的には各サーボの現在角から順運動学で現在位置を計算し、目標位置との距離が一定以下になり次第次の動作に移るというものである。

動作によって位置決めが不要なもの(シートを取って糸を切る動作)はこの閾値を大きく取ることで高速動作させることにした。また納豆の蓋を開けるときはそちらに拘束されてしまい収束しないこともあったため、ある程度時間が過ぎたら強制的に次の動作に移るといったプログラムもされている。

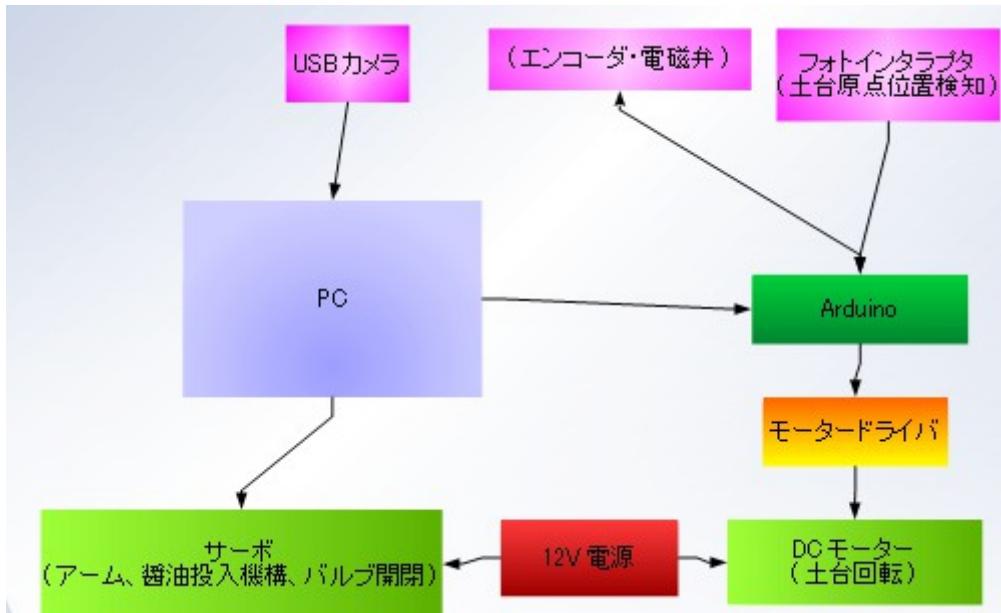
#### 4-2.画像認識

醤油とからしの袋の位置を特定するために、USB カメラによる画像認識を用いている。処理は単純で、OpenCV を用いて

- ① HSV フィルタによる色抽出
  - ② 二値化後膨張・収縮によるノイズ除去
  - ③ 重心を計算し位置座標を特定
  - ④ 現実世界の座標系に変換
- を行っている。

ただしアームが平面内しか動けないため、リーチの範囲内になければ土台を回転させながらこれを行い、範囲内に入ったところで回転を止める。勢いで通りすぎてしまう可能性もあるので少し待ってから再びチェックし、範囲内に入っているれば除去作業を行う。入っていない場合は逆回転しながら画像認識して…を繰り返す。最大でも3回繰り返せば収束した。

## 5.システム構成



大まかに上図のようになっている。基本的にPCを中心にDCモーター・フォトインタラプタ・エンコーダ・電磁弁はArduinoを介している。USBカメラ及びサーボモーター用基盤はPCに直接接続している。DCモーター・サーボモーターはともに12V電源が必要なため、外部電源から供給している。

## 6.製作過程

スケジュールとしては構想3日(11/28~11/30)、機構CAD設計1週間(12/1~12/6)、機構製作3日(12/7~12/9)、回路製作1日半(12/10)、制御1週間(12/11~12/17)という日程で進んだ。およそ計画通りであった。

既に書いた通り、途中で数々の問題に直面したが、仕様変更によってなんとか対応した。

- ・納豆の吸着固定が難しかったため、両面テープ固定に変更
- ・電磁弁が性能不足だったため、サーボによるハンドバルブの開閉へ変更
- ・からしが位置決め打ちでは取れなかつたため、USBカメラを使用することに。
- ・エンコーダがまともに使えなかつたため、全てフォトインタラプタで代用

## 7. 使用部品

### 素材

- ・MDF ボード 300×900×t5.5(300)
- ・t4 アルミ板(メカノデザイン工房から提供)

### 機械物品

- ・サーボモーター Dynamixel AX-12A ×6 (演習物品から借用)
- ・ターンテーブル(500)
- ・DC モーター TG-85R(RoboTech から借用)
- ・真空発生器 PISCO VUL07-66A(RoboTech から借用)
- ・継ぎ手・エアチューブ・ペットボトル(RoboTech から借用)
- ・ネジ付きスペーサ(13C 室から借用)
- ・ハンドバルブ(RoboTech から借用)
- ・吸盤(RoboTech から借用)

### 回路部品

- ・ユニバーサル基板(13C 室から提供)
- ・Dynamixel サーボ基盤 DX-HUB(演習物品から借用)
- ・Arduino UNO(\3240)
- ・モータードライバ TA7291P・放熱板(13C 室から提供)
- ・抵抗(13C 室から提供)
- ・トランジスタ 2SC1815(13C 室から提供)
- ・12V 電源端子(\200)

### センサ類

- ・フォトインタラプタ RPR220(\130)
- ・ロータリエンコーダ RE160F-40E3-20A-24P(\200)
- ・USB カメラ(演習物品から借用)

### その他

- ・納豆 3 パック×15(\1,500)
- ・割り箸 30 本セット×2(\200)
- ・銀皿(\100)

## 8. 改善点

ひとまず想定した動作を一通りこなすことができたので満足である。しかし改善すべき点はいくつもある。

まずは成功率の低さである。なかなか多数のタスクを全て一連で成功させるのは難しく、制御期間のほとんどは成功率を少しでも上げるために注力していた。しかしそれでも最終的に6~7割程度に留まり、発表本番も失敗に終わってしまった。

最も失敗しやすかったのは蓋の開封とシートの除去である。共通の原因として吸盤の吸着力不足がある。双方とも対象の素材が決して吸着向ければいえず外れやすく、かなりの減圧を要した。真空発生器は圧縮空気の消費が激しく、圧縮空気の圧力が下がっていくに従って吸着力が大きく低下したのも要因の一つである。特にシートの除去は吸盤を使用する最後の段階なのでとりわけ頻繁にあった。ひとまずペットボトルの数を増やすことで一応の解決を見たが、根本的に解決をしようと思うと減圧方法を再考する必要があると思う。例えば DC モーターの真空ポンプを用いて吸着力が落ちないようにする、それでは流量不足が懸念されるのでタンクに予め減圧しておいて真空を一気に開放する、等が考えられる。ただどちらにせよ DC ポンプはそこそこ高価なので今回は

無理であったと思う。

また蓋の開封に失敗するもう一つの原因として、アームの力不足があった。サーボモーターのトルク不足もあるが、借りられるサーボモーターの中では最も高性能なものを使ったのでそれは仕方なかつたと思う。ただアームの配置を工夫すれば十分な力を出せたかもしれない。

発表で失敗した原因是エアチューブがアームに引っかかっていたという単純なものであったが、実はこれもたまに起こっていた。結束帶で縛っていたがもうちょっとしっかりと縛るべきであった。

実用性も一応少しは考慮に入れて製作したが、成功率の低さに加えて準備が非常に手間がかかるため、このままだとまだ非常に難がある。準備には①箸のセット②醤油の皿のセット③醤油の投入④納豆のセット⑤圧縮空気を入れる という手順が必要である。特にこの中で圧縮空気の準備が大変で、空気入れで入れるとほぼ限界の圧力まで貯める必要があり納豆を食べる気も失せるほど疲れる。エアコンプレッサを用いるか、先ほど書いたような DC モーターのポンプを使うべきだと思う。

箸、皿、納豆のセットもテープを貼ったりネジを締めたりと一手間かかるので、何かワンタッチで取り外しができるような機構を用いることができれば楽になるだろう。

加えてパックに同梱された醤油が使えないという大きな問題点がある。これはかなり難しそうなので今回は断念したが、醤油袋を掴んだあとに針を刺したり、ハサミで切ったりすることで一応できなくはないのではないかと思う。また現状パソコンを介する必要があつて面倒なので、RaspberryPiなどを使ってボタンひとつで開始できるようにできれば尚よい。

これらを解決することができれば普段使うためにも不便なく使えるかもしれない。

また納豆を早くかき混ぜると納豆が飛び散ってしまうので、ある程度かき混ぜる速度は抑えなければならなかった。そのためかき混ぜ時には DC モーターの最大スペックの半分しか生かせていない。このせいで僕が満足できるほど混ざるまで 30 秒はかかってしまい、実は作業時間の半分は混ぜる時間である。

土台ではなく箸を回すようにすれば、ある程度軽減はできるかもしれない。恐らく専用の機構が必要になってしまって今回の採用したくない案であった。ただ結局これでも高速で混ぜようすれば大きな遠心力は働いてしまうため、解決できるかどうかはわからない。画像認識で飛び散るのを防止する場所に箸を持っていく、カバーを付けて飛び散ってもいいようにするといった方法も考えられる。

## 9.自己評価・感想等

このテーマを選んだ最も大きな理由として、最終発表が時間の短いプレゼンということで、見た目でわかりやすくダイナミックな動きをするメカの方がウケが良いだろうということがある。納豆という食品の使用もなかなかシユールで一目置いてくれるのではないかとも考えていた。その目論見は成功し、実際に発表では非常に盛り上がってもらえた。技術的にも自分がやりたかったこと、学べたことが多く詰まっていたし、テーマ選定を最も自己評価したいところだ。

僕はサークルで機械設計を行っていて機械はそれなりに製作経験があったが、自分で回路も一から作って自分でプログラムまでして動かすといったことは初めてであった。今後の研究や就職してから役立つのはもちろんのこと、自宅でちょっとした電子機械を作りたいといったときにもこれで気軽にできるようになったと思う。更にはグランプリ賞もいただき、ちょっとした成功体験も味わうこともできた。全体的に非常に良い経験になったと思う。

最後に、自分の所属するサークルである RoboTech からはいくつかの部品借りさせてもらったし、構想・製作の過程では多くの方々からアイディアを頂いた。このような貴重な機会を提供して頂いた教員の方々ももちろん含め、自分一人では決して完成しなかった作品である。

多くの協力して頂いた方々に本当に感謝をしたい。