

博士論文

上肢障害者用食事支援ロボットに関する研究  
Research on Meal Assistance Robot for Upper Limb Disabilities

2017年3月

富本 悠公

山口大学大学院理工学研究科

## 目次

第1章 諸言 .....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 従来システム.....	3
1.3 研究目的.....	7
1.4 論文構成.....	9
第2章 食事支援ロボット .....	10
2.1 提案する食事支援ロボットの構造と特徴.....	11
2.2 食事支援ロボットの支援手順.....	17
2.3 制御システム.....	23
2.4 供給可能食物.....	25
2.5 電磁ノイズに対応した食事支援ロボット.....	28
2.5.1 超音波モータ .....	29
2.5.2 超音波モータ制御手法の提案 .....	31
第3章 瞬き操作インターフェース .....	36
3.1 従来 of 瞬き検出.....	36
3.1.1 従来手法 .....	36
3.1.2 従来手法に対する位置づけ .....	41
3.2 瞬き操作インターフェース概要.....	42
3.3 眼部探索.....	43
3.3.1 Haar-like 特徴量 .....	43
3.3.2 Haar-like 特徴を用いた眼部検出 .....	45
3.4 開眼・閉眼判別と意識的な瞬き検出.....	48
3.4.1 黒目領域の抽出 .....	49
3.4.2 円形度による開眼・閉眼判別 .....	52
3.4.3 予備実験 .....	53

3.5 実機評価実験.....	54
3.5.1 実験方法.....	54
3.5.2 実験結果.....	55
3.5.3 考察.....	55
第4章 視線操作インターフェース.....	57
4.1 従来の視線方向推定.....	57
4.1.1 従来手法.....	57
4.1.2 従来手法に対する位置づけ.....	61
4.2 視線操作インターフェース概要.....	61
4.2.1 瞼開閉による眼部位置の特定.....	62
4.2.2 眼部領域の抽出と黒目の分離.....	63
4.2.3 眼と黒目の重心位置による視線方向推定.....	64
4.2.4 食物判別.....	65
4.3 実機評価実験.....	66
4.3.1 実験方法.....	66
4.3.2 実験結果.....	67
4.3.3 考察.....	67
第5章 結言.....	69
参考文献.....	71

謝辞

# 第1章 諸言

## 1.1 研究背景

厚生労働省が5年おきに行っている身体障害児・者等実態調査[1][2]によると、日本の身体障害者数は年々増加傾向にある（図 1.1 参照）。実態調査は、身体障害者を、視覚障害、聴覚・言語障害、肢体不自由、内部障害、重複障害に分けて行われており、図 1.1 を見ると身体障害者の中で肢体不自由者数が最も多い。またその増加が特に顕著である。平成 23 年の全身体障害者数 386 万人に対して、肢体不自由者数は 171 万人であり、全身体障害者数の約 44 %を占めている。本研究では、肢体不自由者のなかでも最も介護が必要であると考えられる重度の上肢障害者に着目した。ここで、重度の上肢障害者とは身体障害者障害程度等

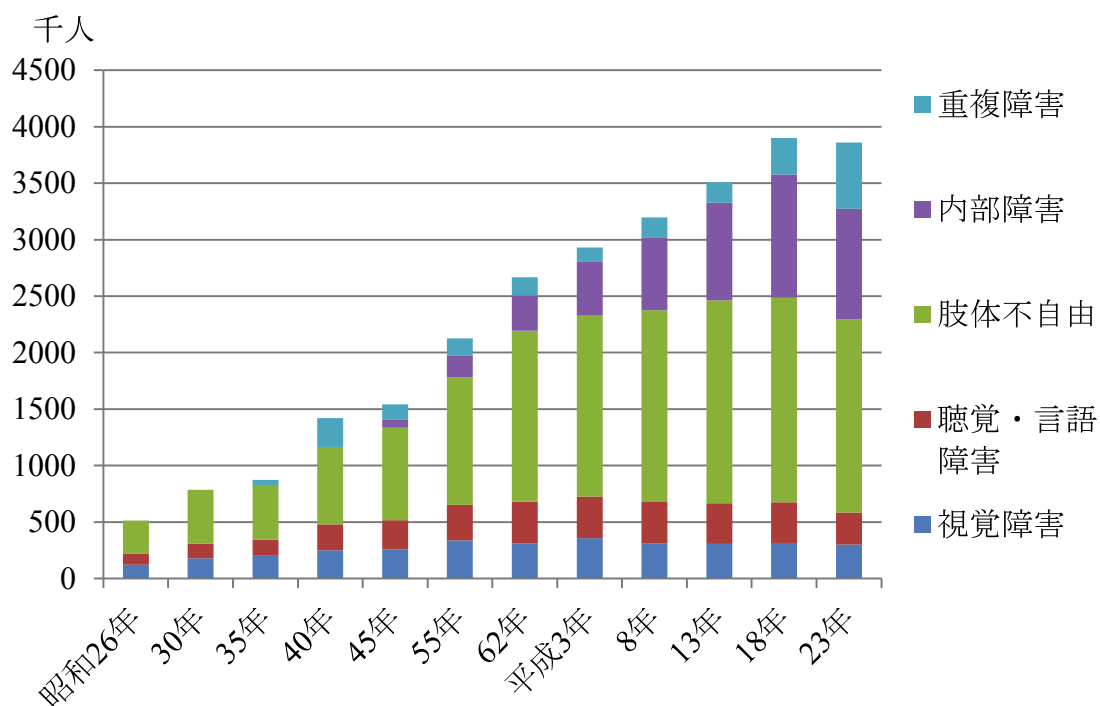


図 1.1 身体障害者数推移

級表[3]の肢体不自由（上肢）1級および2級を示す。肢体不自由（上肢）1級および2級の障害程度を以下に記す。

肢体不自由（上肢）1級

- a. 両上肢の機能を全廃したもの
- b. 両上肢を手関節以上で欠くもの

肢体不自由（上肢）2級

- a. 両上肢の機能の著しい障害
- b. 両上肢のすべての指を欠くもの
- c. 一上肢を上腕の2分の1以上で欠くもの
- d. 一上腕の機能を全廃したもの

肢体不自由（上肢）1級および2級に該当する人は現在42万人いる[2]。彼らは自力での食事、入浴、排せつなどが非常に困難であり、介護が必要である。食事、入浴、排せつは介護の中でも三大介護とよばれており、被介助者の身体に触れて介助を行い、日常生活の支障を補うためのものである。三大介護は介護福祉士法でも定義されており、身体介護の基本であり、なくてはならないものである。

本研究では三大介護の中でも食事介助に着目し、食事を支援するシステムの開発を目的としている。食事介助では、特に被介助者の摂食ペースに合わせる必要がある。適切なペースで行わなければ誤嚥の危険や、それによる摂取量の低下にもつながるため、自分のペースで食事を摂取できることが重要である。また食事介助は対一で行うが、施設では介助者が一人で複数人の介助を行うため一人の被介助者に十分に時間をかけることができない。このため、被介助者にとって最適なペースで食事が行えないといった問題もある。

## 1.2 従来システム

上述した背景から、介助者に代わって上肢障害者の食事介助を行い、自分のペースで摂食できる食事支援ロボットの研究開発が国内外で行われてきた。

上肢障害が軽度の人に対しては手の動作をサポートする食事支援ロボットの研究が行われており、代表的なものとして高齢者用食事支援ロボット MARo[4][5][6]がある。これは軽度の障害者が自力で食事ができるように使用者の手を誘導するシステムである。本研究で対象としている重度の上肢障害者とは障害程度が異なるため簡単な紹介までとする。

重度の上肢障害者を対象とした食事支援ロボットの研究も様々行われており、特に大学機関で次のようなものが提案されている。

- トラックボールで操作する筋力低下患者用食事支援ロボット[7]
- 携帯が可能な食事支援ロボットアーム[8]
- 柔軟ホース・ワイヤ駆動の食事支援ロボット[9]
- 箸で支援を行う食事支援ロボット[10][11][12]

しかし、どのロボットも研究の域にとどまり実用化されていないのが現状である。一方、実際に市販されており、上肢障害者用の食事の支援が可能なロボットがある。その代表的なものが、HANDY1[13][14][15]や iARM[16][17]、マイスプーン[18][19][20]である。本節では特にこれらのロボットについて説明する。

### HANDY1

HANDY1 はイギリスの Rehab Robotics 社が開発、販売している上肢障害者のための生活支援ロボットである（図 1.2 参照）。エンドエフェクタ部を換えることで様々な支援を可能としているが、基本的にはエンドエフェクタ部にスプーンを取り付けることで食事の支援を行う。この他に、髭剃り、歯磨き、化



(a) HANDY1 外観



(b) 使用風景

図 1.2 HANDY1

粧などの支援も可能としている。食事の際の操作方法は、使用者がフットスイッチで指示した食べ物をロボットがスプーンで1杯分ずつ掬い、口元まで持ってくることで食事を行う。

しかし、食物の支援はスプーンで掬い口元まで運ぶため、スプーンで掬いにくい食物（麺類、転がりやすい食物等）は支援が困難である。また、多関節構造であるため、関節が連動しており、1軸で発生した振動が他の軸にも影響を及ぼす。このため、食物が供給中にこぼれ易いといった問題点もある。また図 1.2 を見て分かるように、ロボットが人と同じくらいの大きさであるため、広いスペースを必要としたり移動が困難であったりする。

## iARM

iARM はオランダの Exact Dynamics 社が開発、販売している上肢障害者の生活全般を支援するためのロボットアームである（図 1.3 参照）。このロボットアームは主に電動車いすに装着して使用する。食事に限らず、買い物時の商品



(a) iARM 外観



(b) 使用風景

図 1.3 iARM

の授受や髭剃り，化粧なども支援可能としている。その操作はジョイスティックやキーボードを用いて行うが，ロボットアームであるため，生活の様々な動作を支援するには操作が複雑になる。そのため，重度の上肢障害者には操作が困難であり，特に食事の場合は繊細な操作が必要となるため彼らには向いていないと考えられる。

### マイスプーン

マイスプーンは日本のセコム社が開発，販売している上肢障害者のための食事支援専用のロボットである（図 1.4 参照）。上述した 2 つのロボットとは異なり，マイスプーンは食事専用のロボットであるため食事以外の支援を行うことはできない。マイスプーンは水平多関節構造のロボットで構築されており，その形状はロボットアーム状である。エンドエフェクタとしてスプーンとフォークを備えており，その操作はジョイスティックで行う。介助者が一口大に切った食物を専用トレイに並べ，使用者が顎でジョイスティックを操作して，所





(a) マイスプーン外観



(b) 使用風景

図 1.4 マイスプーン

望する食物のところにエンドエフェクタを移動させる。あとは自動でスプーンとフォークで食物を掴み、口元までその食物を供給する。専用のトレイは、内部が正方形の 4 区画 (2 行 2 列) に仕切られ、その 1 区画内は仮想的に 3 行 3 列の 9 領域に区切られており、それぞれの領域ごとに 1 つの食物を置いて使用する。スプーンとフォークで掴んだ食物は、マイ Spoon が自動で使用者の口元まで食物を運搬することで食事を支援する。日本で唯一市販に至った

食事支援ロボットであるため、マイスプーンを改良する研究も行われている [21]。

しかしマイスプーンは、Handy1 と同様に多関節構造であるため食物が供給中にこぼれ易いといった欠点がある。また、スプーンとフォークで食物を挟んで運ぶ方式であるため軟らかいものやすべり易いものは支援に適していない。さらに、マイスプーンを操作するために用いられているジョイスティックは、本来手で操作するものであるため、顎で操作するには練習・訓練が必要であったり操作が困難であったりする。

### 1.3 研究目的

3つの従来ロボットの特徴を表 1.1 にまとめる。共通する点としては、どれもが多関節型構造で構築されており、介助者の手をモチーフにしていると考えられる。特に iARM は生活全般を支援するためのロボットアームであるため人の手のような動作をする。しかし食事には特化しておらず、食事を行うためにはスプーンをエンドエフェクタで掴んで操作する。このため、食事の観点からす

表 1.1 食事支援が可能なロボットの特徴

	HANDY1	iARM	マイスプーン
食事支援専用度	特化	汎用	専用
構造	多関節型	多関節型	多関節型
エンドエフェクタ	スプーン	グリッパー	スプーンおよびフォーク
食物供給方法	掬う	—	掴む
対応食物	流動	—	固形
操作 インターフェース	フットスイッチ タッチパネル	ジョイスティック キーボード	ジョイスティック

るとその操作が難しく熟練を要する。また、HANDY1は食事以外の支援も可能だが特に食事の支援に特化したロボットである。しかしスプーンで掬って食物の供給を行うため、その対応食物は流動食が基本である。固形食物の場合は転がりやすいものは掬いにくかったり、流動食の場合でも供給途中にこぼれたりするといった問題点がある。一方でマイスプーンは、食事支援専用のロボットであり、他の機能は搭載されていない。本研究で開発するロボットも食事支援専用であるため、マイスプーンを比較対象とする。ここで、マイスプーンには次のような欠点がある。

- 多関節型構造かつ食物の供給方法がスプーンとフォークによる把持であるため振動により供給中に食物がこぼれ落ちることがある
- 把持であるため、やわらかい食物や滑りやすい食物の供給が難しい
- アームの可動域が広いため人体に当たりやすく、安全装置が作動しなかった際には喉を突く恐れがある
- ジョイスティックを顎で操作するには訓練を必要とする

以上の欠点に対して本研究では次の目的で食事支援ロボットの開発を行った。

- 振動が発生し難い構造にすることで食物の落下を防止する
- より多くの種類の食物を供給可能とする
- 暴走したとしても構造的に安全である
- 重度の上肢障害者が操作しやすい操作インターフェースを搭載する

## 1.4 論文構成

本稿の構成は次の通りである。第 2 章では、直交座標構造で構築して食物を押し出す方式で供給する食事支援ロボットについて提案する。直交座標構造のロボットの特徴として、多関節構造のものに比べて剛性に優れているため振動が生じにくい。加えて各軸は独立しており、自由度を小さくすることで、より振動を軽減した構造となっている。また、押し出す方式は振動に依存しにくい食物供給方法であり、安定して食物を供給することができる。この方法により、提案ロボットは全固形食物に対応しているといった特徴も併せ持つ。

第 3 章では、2 章で提案したロボットを操作するため、瞬きにより操作可能なインターフェースを提案する。本インターフェースでは自然な瞬きと操作するための意識的な瞬きの分別をつけ、瞬きのみで操作することが可能である。また本インターフェースに計装している瞬き検出手法は、単純なアルゴリズムであることを特徴としており、提案ロボットを操作するに十分な認識率が得られている。

第 4 章では、視線を向けるのみで操作する視線操作インターフェースを提案する。提案ロボットの使用環境、操作に必要な分解能を考慮し、瞬き操作インターフェースと同様に単純なアルゴリズムで操作可能なことが特徴である。

本論文では 2 種類の操作インターフェースを提案しており、上肢障害のなかでも各人の状態に合わせて選択できるようにしている。視線操作インターフェースでは、視線を向け注視のみで操作可能なことから、直感的であり、操作性が良いと考える。しかし、注視の場合は眼精疲労を感じやすい人もいる可能性があり、そのような人には瞬き操作インターフェースが向いているという位置づけをしている。最後に、第 5 章では本研究のまとめを述べ、今後の課題を提示する。

## 第2章 食事支援ロボット

提案する食事支援ロボットは、上肢障害者のなかでも体幹を保持できる人を対象としている。これについては従来ロボットも同様であり、寝たきりの人やふらつくような人には対応していない。ただし、体幹が保持できるのであれば、テーブルやベッド上などの食事環境は限定しておらず、年齢に制限も設けていない。

従来ロボットでは多関節型で構築されていたが、提案ロボットはそれらとは全く異なる機構として、直交座標型で構築した食事支援ロボットである。そのため、食物供給方法においても「掬う」や「把持」といった一般的な供給方法ではなく、食物を押し出して供給を行うことも特徴である [22][23][24]。

直交座標構造のロボットの特徴として、多関節構造のものに比べて剛性に優れているため振動が生じ難い。さらに各軸を独立してロボット本体に固定することで、自由度を小さくし、より振動を軽減した構造となっている。また食物を押し出して供給することで、把持して持ち上げるといった動作が生じないため、振動が発生したとしても供給途中で食物がこぼれ落ちることがない。すなわち振動に対して頑健であり、安定して食物を供給することができる。さらに、押し出すことから柔らかいまたは崩れやすい食物にも対応しており、全固形食物の供給を可能としている。この他にも、多関節型ロボットに比べて直交座標型ロボットは制御コストが非常に低いといった特徴も有しており、提案ロボットは制御コストが低いことも利点である。さらに、構造的に軸の可動域を限定しており、使用者に届かないようになっている。このためエンドエフェクタ（スプーン）が喉を突いたりすることがなく、構造的に安全性の高いロボットとなっている。

本章では、これらの特徴について1節でその詳細を述べ、2節で提案ロボットの構造や食事を支援するための動作、3節でその動作を行うための制御システムについて説明する。そして4節では、従来ロボットでは供給が困難であると考えられる食物を含め、市販の弁当を対象として実際に食事を行うことで供給可能食物の検証を行う。最後に5節で、超音波モータを搭載し電磁ノイズに対応した食事支援ロボットを説明する。本ロボットは年齢に制限を設けていないため、医療福祉の分野で近年注目されつつある小児や妊婦への影響を考慮し、それに対応したロボットである。

また、提案ロボットは上肢障害者に対応するため残存機能として目の機能により操作することができるインターフェースを搭載している。手を遣わないため上肢障害者に簡便に操作できるインターフェースとなっており、これについては3章および4章にて説明する。

## 2.1 提案する食事支援ロボットの構造と特徴

提案ロボットの外観を図 2.1 に示す。稼働部は Plate, Spoon, Shutter, Pusher の計 4 軸であり、各軸の役割を表 2.1 に示す。Plate には食物を配膳しておき、Pusher と Shutter により使用者が選択した食物を押し出す。押し出した食物はスプーンに載せられ、Spoon が伸長することで使用者の口元まで運ぶ。以下、断りがない限り本ロボットについて“スプーン”はエンドエフェクタを、“Spoon”は軸を意味する。

各軸の駆動にはラック・アンド・ピニオン方式を用いており（図 2.2 参照）、これは円形歯車（ピニオン）と歯を付けた平板状の棒（ラック）を組み合わせ、モータの回転力を直線運動に変換する機構である。アクチュエータとして Plate, Spoon, Pusher には直流モータを、Shutter にはサーボモータを用いており、

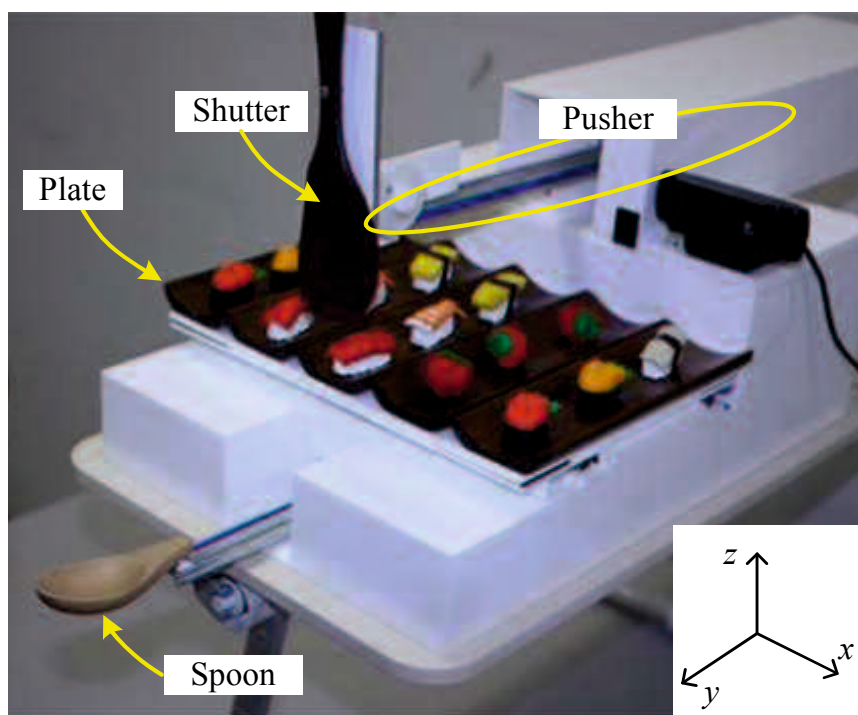


図 2.1 食事支援ロボット外観

表 2.1 各軸の役割

軸名称	駆動方向	役割
Plate	$x$	食物を 3 行×5 列で盛り付ける。食物を選択した後、その食物が載る Plate がシャッターの正面にくるように移動する。
Pusher	$y$	食物をスプーン上に押し出す。
Shutter	$z$	Pusher で食物を押し出す際に食物の背後に下ろすことで、Pusher が食物を押し出せるようにする。
Spoon	$y$	本ロボットのエンドエフェクタにあたり、食物を口元まで運ぶ。

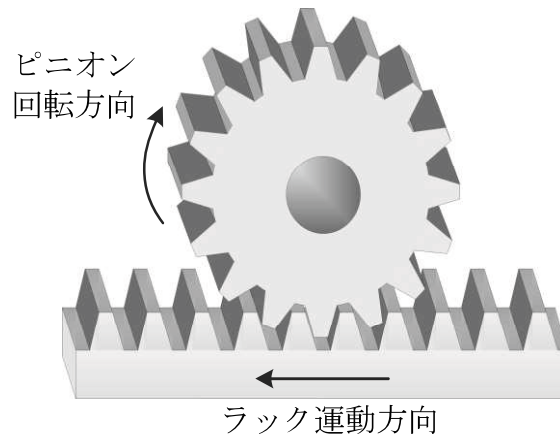


図 2.2 ラック・アンド・ピニオン

モータの回転力をピニオンからラックに伝え、各軸を駆動させている。このように直線運動のみの軸で構成されたロボットを直交座標型ロボットという。

ここで、提案ロボットの特徴である“安定な食物供給”，“構造的安全性”，“対応食物”，“操作性”について、その概要を説明する。

### 安定な食物供給

直交座標型ロボットに対して、マイスプーンのように人間の腕に近い動作をするロボットを多関節型ロボットという。多関節型ロボットは制御コストは高いが、上下左右の動きを組み合わせることで複雑な動きに対応できるといった特徴を持つ。しかしながら多関節型ロボットは剛性に劣るため振動が発生しやすい。マイスプーンでは食物を把持して持ち上げることで供給を行うため、振動に弱く、供給中に食物がこぼれ落ちるといった欠点がある。この原因は構造が多関節型であること、および食物供給方法が把持であることである。これに対して、本ロボットでは直交座標型ロボットで構築することで振動を抑制し、食物を押し出して供給することで振動が発生したとしても安定して供給することができる。多関節型ロボットに比べ直交座標型ロボットは構造が単純である



ため剛性に優れており、振動が発生し難いといった特徴を有する。また各軸を独立してロボット本体に設置し、自由度を最低限に抑えており、シンプルな構造である。これにより一般的な直交座標型ロボットに比べて構造的に剛性に優れ、振動を抑制している。そしてマイスプーンの場合、把持して持ち上げるといった動作があるため供給中にこぼれ落ちることがあった。一方提案ロボットでは、食物を押し出すため振動が発生したとしてもこぼれ落ちることがなく、安定して食物供給を行うことが可能である。

### 構造的安全性

提案ロボットではエンドエフェクタにスプーンを用いている。スプーンで供給されてきた食物を、使用者が体または首を少し傾けて自分から食べに行く。そのため本ロボットは寝たきりのような重度の障害者へ対応していないが、これは従来のロボットに対しても同様である。ここで、自分から食べに行く機構としているのは安全性のためでもある。マイスプーンでは接触センサを用いて人体が触れた際に非常停止するようになっているが、エンドエフェクタは伸びしろを持っており暴走した場合には喉を突く恐れもある。そこで、本ロボットでは使用上 Spoon の延長線上に使用者の口がこないようにしている。言い換えると、スプーンで食物を供給する際にそのスプーンの高さは口よりも下にくる。また、Spoon の最大可動域が使用者の手前までにしているため Spoon が最大限伸びたとしても口まで届かないようになっている。これらのことから、もし暴走したとしても喉を突く等の危険がなく機構的に安全性を確保したロボットとなっている。

## 対応食物

マイスプーンでは食物の供給方法が把持であるため、桃や絹ごし豆腐、ゼリーのように滑りやすかったり崩れやすかったりする食物は供給が困難である。一方で、本ロボットは押し出すことで食物の供給を行う。これにより全ての固形食物に対して供給を可能にしている。この供給可能食物については後述する2.5節にて検証実験を行っており、そこで詳しく説明する。

## 操作性

本ロボットには、図2.3に示すようにPlateの下にLEDを取り付けている。本稿では説明の便宜上、Plateの各列に①から⑤までの番号をふる。使用者はPlate番号に対応するLEDを見ることで視覚的に選択している食物が分かるようになっている。操作インターフェースの種類によりLEDの動作が異なり、瞬き操作インターフェースでは、Plate①から順にLEDが点灯する。所望する食物が載るPlateのLEDが点灯した際に意識的な瞬きをすることで食物を選択する。視線操作インターフェースではLEDに目を向けることでLEDが点灯し、3秒間の注視で食物を選択することができる。上肢障害者が簡便に本ロボットを操作できる

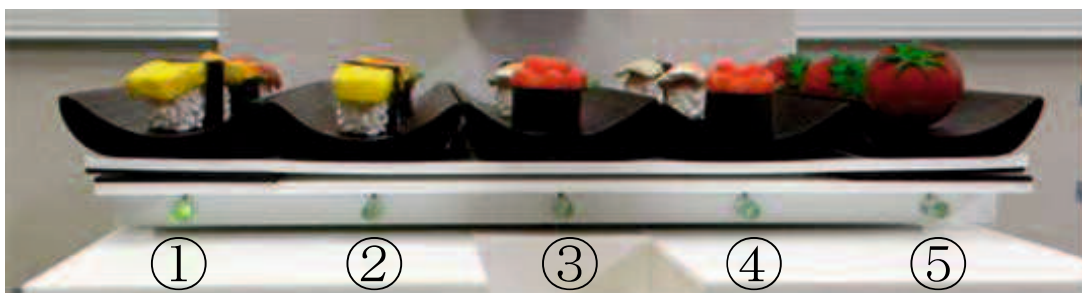


図 2.3 Plate 選択用 LED

ように、手を遣うことなく目で操作できるインターフェースを開発した。操作インターフェースの詳細については各章（瞬き操作インターフェースは 3 章，視線操作インターフェースは 4 章）で述べる。

以上、説明した提案ロボットの特徴についてマイスプーンとの比較を表 2.2 にまとめる。本ロボットは従来になかった直交座標型で食事支援ロボットを構築し、各軸を独立して設置することで振動を抑制し、安定して食物の供給を行うことができる。そして、マイスプーンが苦手とする、滑りやすい、崩れやすい食物にも対応するため、押し出すことで食物の供給を行う。これにより全固形食物を供給可能としている。また、安全性の面では構造上スプーンが喉まで届かないため、暴走したとしても安全である。そして、重度の上肢障害者が操作しやすいように目で操作可能な 2 種類インターフェースを提案している。

表 2.2 マイスプーンとの比較

	マイスプーン	提案ロボット
構造的安全性	×	○
安定な食物供給	×	◎
対応食物	○	◎
操作性	×	○

## 2.2 食事支援ロボットの支援手順

使用者が提案ロボットを用いて食事を行うまでのロボットの動作を説明する。ここでは、操作インターフェースとして Handy1 にも利用されているフットスイッチを用いたとする。フットスイッチは図 2.4 のような形状をしており、足で踏むことで食物の選択を行う。ただし、本ロボットの主要な操作インターフェースは 3 章, 4 章で述べる目で操作するものであり、本節では従来ロボットにも用いられているインターフェース（フットスイッチ）を例にとって支援手順を説明する。

提案ロボットは、図 2.5 に示すフローチャートの手順で各軸が稼働し、食事の支援を行う。その動作は主に、「Plate が移動する」、「Shutter を下ろす」、「食べ物を Plate から押し出して Spoon の上に載せる」、「Spoon を口元へ運ぶ」の 4 動作であり、これを踏まえて本ロボットは次の順に稼働する。ここで、図 2.6 は下記の説明における各軸の動作を示している。

### (a) 初期位置と食物選択：

ロボット本体のスイッチを入れると、Plate, Pusher, Shutter, Spoon が初期位置に移動する。Plate①から Plate⑤までの LED が順に点灯する。



図 2.4 フットスイッチ

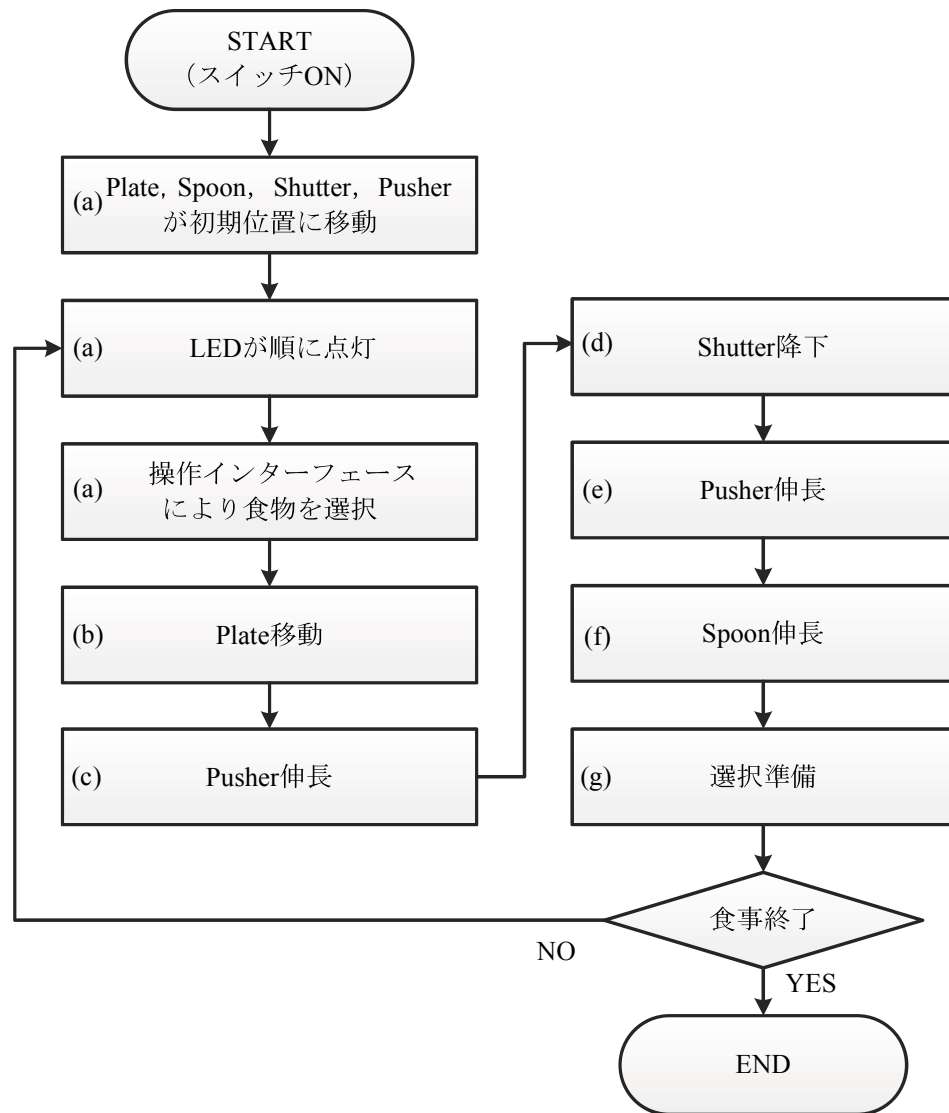


図 2.5 提案ロボットの動作フローチャート

所望する食物の LED が点灯しているときにフットスイッチを踏むことで食物の選択を行う。

(b) Plate 移動 :

選択した食物が載る Plate がロボット中央に来るように移動する。図 2.6 では Plate④を選択した際の動作を示している。

(c) Pusher 伸長 :

Pusher が伸長し, 食物の直後で停止する。

(d) Shutter 降下 :

Shutter が Plate 表面の高さまで降下する。

(e) Pusher 伸長 :

再度 Pusher が伸長し, 選択した食物を押し出すことで Spoon に載せる。

(f) 食物供給 :

Spoon が口元まで伸長し使用者の口元付近で停止する。これにより使用者が選択した食物を食することができる。

(g) 選択準備 :

(f)で Spoon が伸長した直後, 次の食物選択を円滑に行うため Plate, Pusher および Shutter が初期位置に移動する。

(h) 再び(a)の食物選択を行う。このとき, ロボットは Plate ごとに何回食物を供給したかを記憶しており, 1 列目の食物が供給済みの場合は(c)の際に 2 列目の食物の直後で停止し, Shutter が下りる位置を変更している。このため Plate ごとに前列の食物を供給した後に後列を選択することができる。

本ロボットの Plate は 3 行×5 列に分けて食物を載せられるようになっており, その全てを供給した後に食事終了となる。

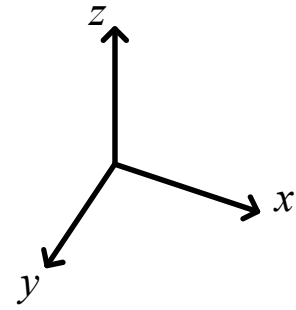


図 2.6 (a) 初期位置

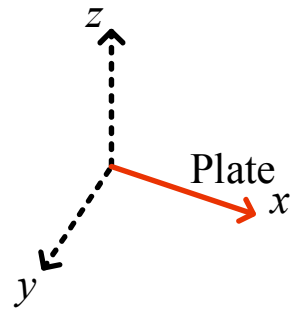


図 2.6 (b) Plate 移動

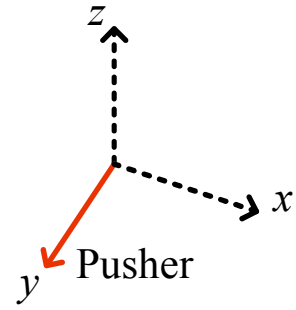


図 2.6 (c) Pusher 伸長

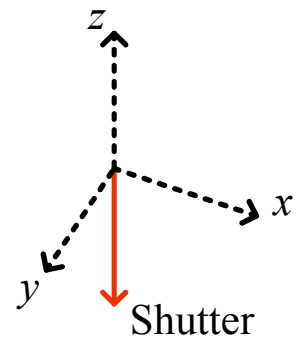


図 2.6 (d) Shutter 降下



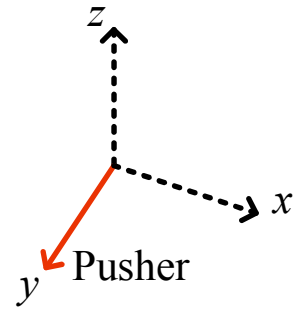


図 2.6 (e) Pusher 伸長

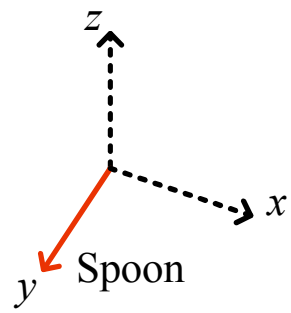


図 2.6 (f) 食物供給

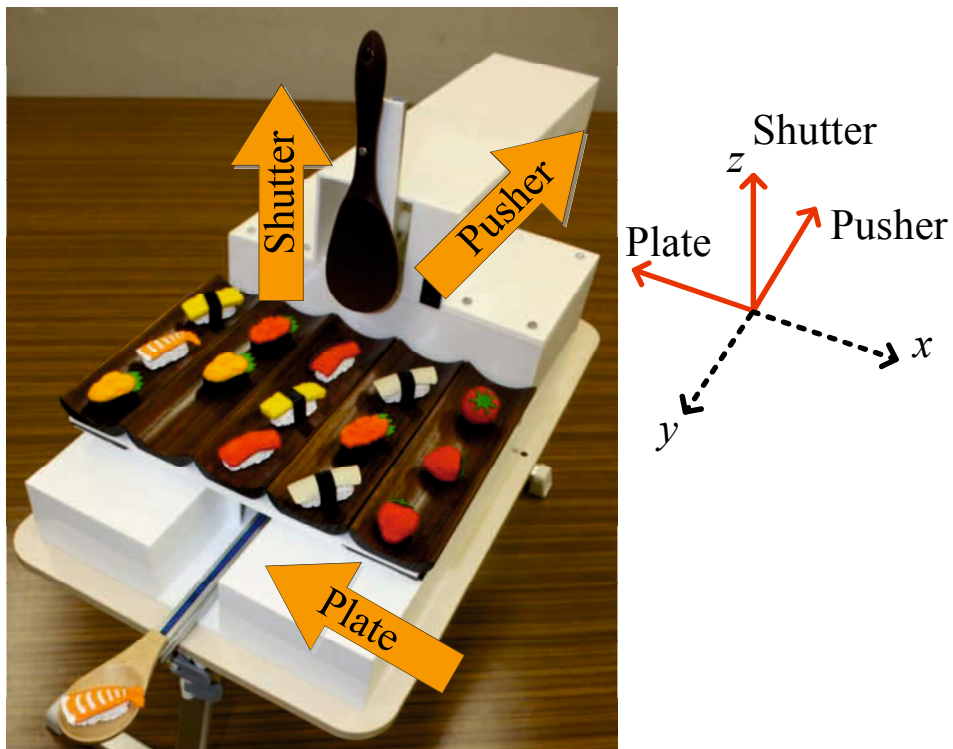


図 2.6 (g) 選択準備

## 2.3 制御システム

各軸を駆動させるための制御システムについて説明する。提案ロボットの制御はマイコンを用いて行う。本ロボットは直交座標型で構築されているため、従来の多関節型に比べて制御コストが非常に小さい。そのため、マイコンの CPU 性能は低いものでよく、安価である PIC (Peripheral Interface Controller) を用いている。

制御システムの構成を図 2.7 に示す。その構成は主に、通信部、制御部、駆動部の 3 つに分けられる。

通信部は、操作インターフェースと通信を行い、インターフェースを用いて選択された Plate 番号を受信する。そして制御部にその Plate 番号を送信する。この通信方式には PIC が標準搭載しているシリアル通信 (RS232C) を用いてい

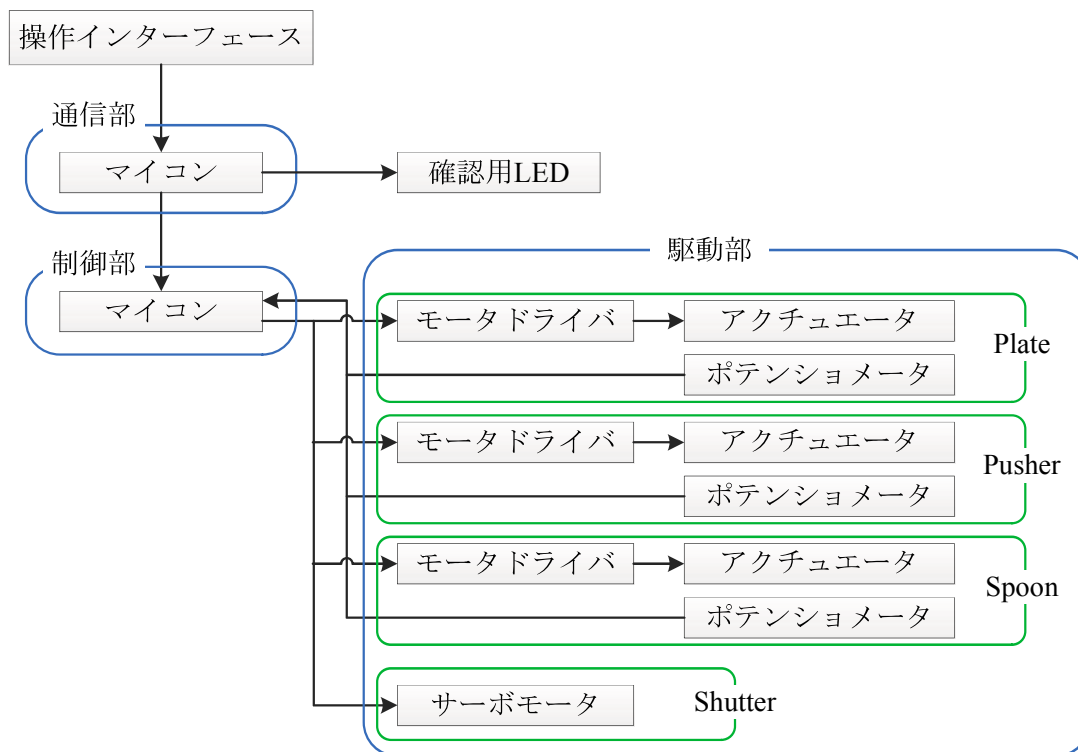


図 2.7 提案ロボットの制御システム

る。またこのとき選択用 LED を動作させているが、操作インターフェースの種類によって LED の動作が異なる。瞬き操作インターフェースの場合はフットスイッチと同様である (2.2 節)。視線操作インターフェースでは注視している LED を点灯させる。

通信部—制御部間は I2C 通信を用いており、制御部は選択された Plate 番号を取得する。そして Plate 番号に応じて駆動部に制御信号を送り各軸の駆動制御を行う。

駆動部は、モータドライバ、アクチュエータ（直流モータまたはサーボモータ）、ポテンシオメータで構成される。Spoon, Plate, Pusher のアクチュエータには直流モータ（日本電産コパル電子社製 HG37-60-AA-00）を用いている。ここで、直流モータの回転力は 2.1 節で述べたようにラック・アンド・ピニオン方式により直線運動に変換し、Plate, Spoon および Pusher を駆動している。直流

モータに接続しているモータドライバには東芝製 TA7291P を用いており、これは正・逆転切り替え用のブリッジドライバである。このドライバは制御用論理入力端子が2端子あり、制御部からの信号（1または0）の組み合わせにより正転・逆転・ストップ・ブレーキの4動作を行う。このとき入力が00であれば無通電でストップ、01では正転、10では逆転、11でブレーキを示す。そしてこの入力により直流モータのサーボ制御を行う。

各直流モータにはポテンシオメータ（BOURNS 社製 3590S-A26-103L）を併設しており、直流モータが動作し回転するとポテンシオメータが連動して回転する。ポテンシオメータの構造は3線式の可変抵抗器と等価であり、直流電圧を印加すると、その印加電圧を最大値として回転量に応じて分圧した電圧を出力する。この出力を制御部にフィードバックすることで制御部が軸の移動量を得ており、供給する食物の位置に応じて各軸が必要な量駆動する。

次に、Shutter のアクチュエータにはサーボモータ（GWS 社製 GWSMICRO /STD/F）を用いる。サーボモータは制御部から目標角度を送信することで目標角度まで駆動する。目標角はパルス信号を0.1~2.0 ms の間で変化させることによりサーボモータが0~180度間を回転する。直流モータの場合と同様にサーボモータの回転力を、ラック・アンド・ピニオン方式を用いて直線運動に変換し、Shutter を駆動している。

## 2.4 供給可能食物

提案ロボットでは、食物を押し出す機構とすることですべての固形食物の供給を可能としている。ここでの固形食物は、一つの塊を形成している食物を指す。また、おにぎりのように一つ一つがまとまりを持った食物も“固形”という意味からこれに当てはまるが、ここでは特別に凝集食物ということとする。

研究目的である「すべての固形食物（凝集食物含む）ならば完全に供給可能である」ことを確認する。そこで、市販されている弁当を対象として実験を行った。

7食の市販弁当およびデザートを対象に、本ロボットを使用して実際に食事の支援を行った。実験に使用した弁当の内容は、ご飯類、麺類、揚げ物、煮物、焼き物、サラダ、フルーツ類等、計42品目である。固形食物、凝集食物および非固形食物に分類し、これらの品目の一覧とその供給回数を表2.3から表2.5に示す。

非固形食物においては、供給途中にその一部がプレート上に残留する、または押し出す際にこぼれ落ちる結果となった。凝集している食物においては、ご飯で29回の供給の内4回、1粒または2粒がプレート上に残留した。これについては、配置の際におにぎり状にすることで改善できる。この他の38品目では、いずれの食物においても完全に支援が可能であった。この中で、桃や豆腐、ゼリーは滑りやすかったり崩れやすかったりする。これらを掴んで口元まで運ぶことは健常者でも失敗しやすいため、従来ロボットでは特に供給が困難な食物であった。これに対して本ロボットは食物を押し出して供給するため、食物が滑ることがハンディキャップとはならずかえって利点となっている。

以上の結果をまとめると、提案ロボットは非固形食物の供給は難しく対応していない。凝集食物に関しては配膳を工夫することで供給可能となり、固形食物の場合は完全に供給可能である。そのため本ロボットはマイスプーンが苦手とする、滑りやすい、崩れやすい食物も供給可能であり、すべての固形食物に対して支援が可能である。

表 2.3 支援食物（固形食物）

食物	支援回数	食物	支援回数
エビフライ	4	ソーセージ	3
唐揚げ	3	照り焼きチキン	2
椎茸の天ぷら	2	エビチリ	3
蓮の天ぷら	2	ハンバーグ	5
コロッケ	4	ミートボール	6
白身フライ	2	肉じゃが	11
磯部揚げ	1	高野豆腐	6
チキン南蛮	8	筑前煮	6
オムレツ	6	ミニトマト	6
チャーシュー	4	苺	6
出汁巻き卵	3	林檎	6
鯖の塩焼き	2	桃	15
絹豆腐	15	ゼリー	15

表 2.4 支援食物（凝集食物）

食物	支援回数	食物	支援回数
ご飯	29	マカロニサラダ	2
赤飯	3	ポテトサラダ	4
巻き寿司	4	卵サラダ	2
わかめご飯	3	酢の物	2
手毬寿司	8	ほうれん草のおひたし	2
稲荷寿司	2	切干し大根	3
チキンサラダ	10		

表 2.5 支援食物（非固形食物）

食物	支援回数	食物	支援回数
スパゲティ	7	千切りキャベツ	4
金平牛蒡	1		

## 2.5 電磁ノイズに対応した食事支援ロボット

上述した食事支援ロボットとは別に、ペースメーカー装着者や妊婦に対して安全であり、また安心して使用できる食事支援ロボットも提案している[22]。この食事支援ロボットはアクチュエータに直流モータを用いており、駆動の際に少なからず電磁波を発生させる。ペースメーカーは電磁波の影響を受けやすいと示唆されており、電波を発する携帯電話の場合ではその使用について注意喚起が行われている[25]。一方で、電磁波が直接人体へ及ぼす影響について、特に小児における癌や白血病の発症率が高くなる[26]。また、小児よりも小さい胎児を宿す妊婦にも影響があると考えられる。この他に、電磁波が人体へ及ぼす影響について様々な報告があげられている[27]。このように電磁ノイズは人体や医療機器に様々な影響を与えている。これに対応するため、電磁ノイズを発生しないアクチュエータとして超音波モータを用いた食事支援ロボットを開発した。

直流モータを用いた食事支援ロボットは軽量で持ち運びが容易であり、制御コストが非常に小さいことが特徴である。一方、超音波モータを用いたロボットでは、駆動原理が摩擦力であるため電磁波が発生せず、ペースメーカー装着者が安全に使用できるといったメリットがある。ただし、超音波モータの入出力特性の非線形性が強いため、制御するための外部回路が大型となりロボットが重くなるといった欠点がある。このため、直流モータを用いた食事支援ロボットと比べると、食事の際に圧迫感を感じることもある。基本的にこれら2つのロボットの異なる点はアクチュエータであるため、本節では主に超音波モータについて説明する。

## 2.5.1 超音波モータ

本ロボットでは図 2.7 のアクチュエータに超音波モータ（新生工業社製 USR30-S3）を，モータドライバには新生工業社製 D6030 を使用している。この超音波モータは図 2.8 に示しているように，ロータとステータが密着し，ステータには圧電セラミックが接している。圧電セラミックに超音波領域(20kHz 以上)の周波数の交流電圧を，位相をずらして印加することで伸縮する。このとき超音波振動が発生し，ステータをたわませて進行波が生じる。進行波は波のうねりのように進むため，この表面上の一点に注目すると楕円軌跡を描いて振動する。ステータのもう一方の面に加圧接触しているロータ表面は進行波の各頂点近傍において接触しているため，楕円運動の摩擦力により進行波と反対の方向にロータが移動し，モータが回転する[28][29]。超音波モータはこの摩擦力で駆動するため，直流モータ等の電磁モータとは異なり電磁ノイズを発生しない。

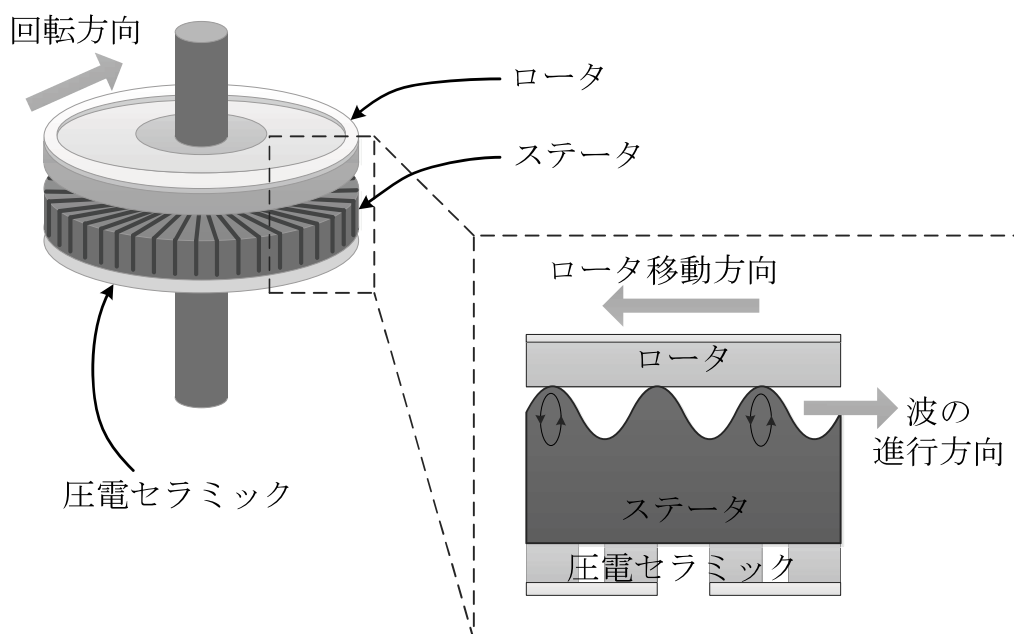


図 2.8 超音波モータ駆動原理図



超音波モータは直流モータと比較した場合、次のような特徴が挙げられる。

- (a) 電磁波を発生しない
- (b) 低速，高トルク性を有する
- (c) 無通電時に保持トルクを有する
- (d) 静粛性に優れる
- (e) 回転子の慣性が小さく，微小な位置決めが可能

超音波モータはローターステータ間の摩擦力で駆動するため，特徴 a のように電磁ノイズを発生しないことが本ロボットに適用した最大の理由である。この特性から電磁波ノイズに対応した食事支援ロボットを構築することができる。また，この他にも食事支援ロボットに適用するうえで，直流モータと比較すると次のような利点がある。

一般的な直流モータは高速低トルクが特徴であるため，低速高トルクを得るためにはギアで減速する必要がある。一方，超音波モータではギアがなくとも低速高トルクを得ることができるため，ダイレクトドライブが可能となる。このため構成部品が少なく済む。

また，ステータとロータが強く密着しているため，電源を切った後も保持トルクを維持する。電磁ブレーキを必要とせず，運搬の際に勝手に軸が動くことがなく，故障し停止した際にも軸が勝手に動くことがないため安全性を確保することができる。

超音波モータは駆動周波数が超音波領域であるため，人は聞き取ることができず，駆動音がきわめて静かである。このため食事を支援するロボットに適用するうえで，アクチュエータの雑音による不快感を与えないため，快適に食事を行うことができる。

以上の点から超音波モータは，食事支援ロボットに適したアクチュエータである。しかし，利点ばかりでなく次のような特徴も併せ持つ。

- (f) 摩擦駆動のため入出力特性が強い非線形性を持つ
- (g) 駆動時の温度変化や負荷変動により入出力特性が変化する
- (h) 物理的な解析が困難でそのモデル化が容易ではない

これら 3 つの特徴から、制御が非常に困難であるといった欠点がある。

## 2.5.2 超音波モータ制御手法の提案

超音波モータの欠点に対応するため制御手法を提案しており[30], 本項ではこの手法について述べる。

超音波モータは摩擦駆動であるため、物理的な解析が困難であり、そのモデル化が容易ではない (特徴 h)。そのため超音波モータの制御には、モデル化を必要としない PID 制御がよく用いられる。しかし非線形性 (特徴 f) やプラントの特性変動 (特徴 g) から、固定ゲイン型 PID 制御では対応できないといった問題があり、PID ゲインの再調整が必要となるが、PID ゲイン (比例, 積分, 微分) を逐一調整することは非常に困難である。そこで PID 制御のゲインを NN (Neural Network) により調整し, NN の結合荷重を粒子群最適化法 (PSO: Particle Swarm Optimization) を用いて最適化することで、PID ゲインをリアルタイムで調整する「PSO 型 NN による可変ゲイン PID 制御」を提案する。これにより超音波モータの非線形性と特性変動を補償する。

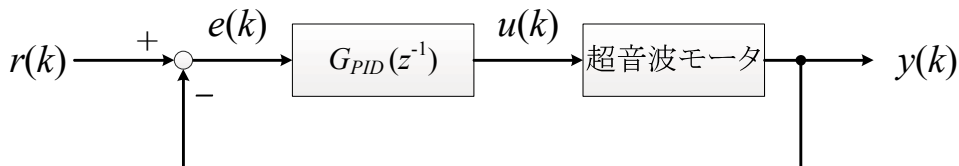


図 2.9 PID 制御の基本構成

PID 制御の基本形を図 2.9 に示す。目標値  $r(k)$  と制御量  $y(k)$  との差を偏差とい  
い  $e(k)$  と表す。この偏差に基づいて操作量  $u(k)$  を定め、PID 制御則より操作量は  
次式で示される。

$$\begin{aligned} u(k) = & u(k-1) + (K_p + K_I + K_D)e(k) \\ & - e(k-1) + K_D e(k-2) \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\text{ただし, } e(k) = r(k) - y(k)$$

これを  $z$  変換すると PID コントローラは次のようになる。

$$G_{PID}(z) = \frac{(K_p + K_I + K_D) - (K_p + 2K_D)z^{-1} + K_D z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (2-2)$$

ここで提案する PSO 型 NN を用いた可変ゲイン PID 制御の構成図を図 2.10 に  
示す。PID 制御における各ゲインの最適化を、NN により行う。このときの NN  
の構造を図 2.11 に示す。NN の入力層は目標回転角に対する偏差  $[e(k), e(k-1),$   
 $e(k-2)]$ 、出力層は PID ゲイン  $[\Delta K_p(k), \Delta K_I(k), \Delta K_D(k)]$  であり、偏差を最小に抑  
えるように PID ゲインを調整する。NN の隠れ層  $H_j(k)$  および出力層  $\Delta K_{P,I,D}(k)$  は  
次式で示し、

$$H_j(k) = f_s(w_{ij}(k) \cdot I_i(k)) \quad (2-3)$$

$$\Delta K_{P,I,D}(k) = f_s(w_{im}(k) \cdot H_j(k)) \quad (2-4)$$

ここで、 $f_s$  は標準シグモイド関数を表す。

$$f_s = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2-5)$$

$w_{ij}(k)$  と  $w_{im}(k)$  で表される 3 つのレイヤー間の重みは、PSO によって更新する。

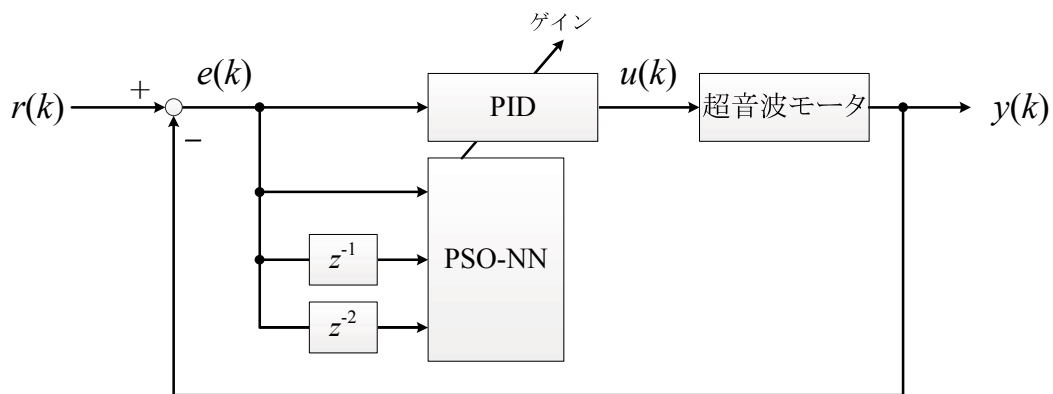


図 2.10 PSO 型 NN による可変ゲイン PID 制御構成

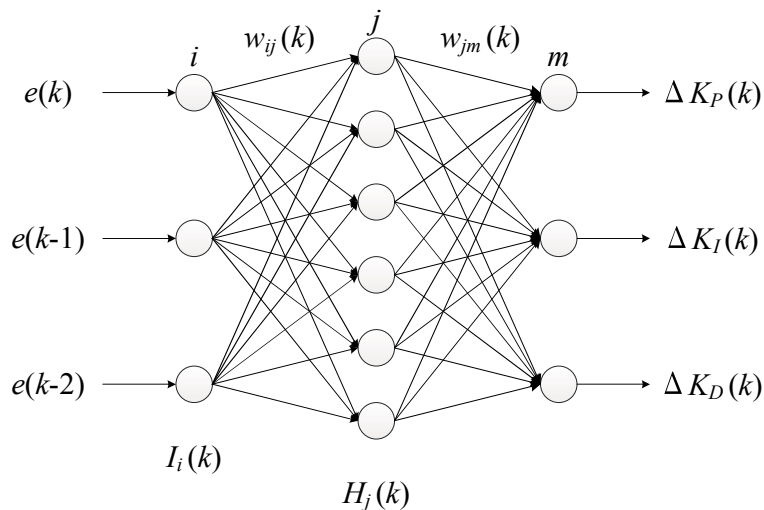


図 2.11 NN 構造

PSO は単純化された社会モデルのシミュレーションを通じて開発された発見的最適化手法の一つである[31]。NN の学習において  $n$  個の粒子に含まれる位置情報として重み係数を定義し、このときの更新式は次のように示される。

$$\begin{cases} v_{n+1} = \alpha \{v_n + c_1 r_1 (pbest_j - x_j) + c_2 r_2 (gbest_j - x_j)\} \\ x_{n+1} = x_n + v_n \end{cases} \quad (2-6)$$

ここで  $c_1$ ,  $c_2$  は正の定数であり  $r_1$ ,  $r_2$  は  $[0, 1]$  の範囲の乱数である。そしてグロー

バル探索とローカル探索のバランスをとる重み係数は次の式で計算される。

$$\alpha = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|} \quad (2-7)$$

ここで,  $\varphi = c_1 + c_2$  ( $\varphi \geq 4$ )

次に, リアルタイム環境下で更新される PID ゲイン  $\bar{K}_p(k)$ ,  $\bar{K}_I(k)$ ,  $\bar{K}_D(k)$  は次式で定義する

$$\begin{aligned} \bar{K}_p(k) &= K_p (1 + \Delta K_p(k)) \\ \bar{K}_I(k) &= K_I (1 + \Delta K_I(k)) \\ \bar{K}_D(k) &= K_D (1 + \Delta K_D(k)) \end{aligned} \quad (2-8)$$

このとき操作量  $u(k)$  は, 式(2-1)および式(2-8)より次式で示される。

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + (\bar{K}_p + \bar{K}_I + \bar{K}_D)e(k) \\ &\quad - e(\bar{K}_p + 2\bar{K}_D)e(k-1) + \bar{K}_D e(k-2) \end{aligned} \quad (2-9)$$

これにより, オンラインで PID コントローラの各ゲインを更新することができ, 最適化ゲインにより制御入力を推定する。

提案手法の有効性を検証するため, 入力  $r(k)$  として +45 度から -45 度で変化する正弦波を用いて実験を行った。正弦波の周期は 2 秒である。PSO の粒子数は 10 とし, 初期値として -1 から 1 までの乱数で与えられる。各粒子は, 偏差  $e(k)$  を用いて *fitness* 関数により評価し, NN の重みを更新する。

$$fitness = \frac{1}{1 + e(k)^2} \quad (2-10)$$

図 2.12 の正弦波を入力したときの応答を示す。目立つ偏差は見られず, 制御入力に対して十分に応答している。このとき図 2.13 に示す PID ゲインの変化を見ると, 短時間でゲインが収束している。提案手法によりリアルタイムに PID

ゲインを最適化し高精度に超音波モータが制御できることを確認した。

本ロボットに適用する際には食物の重さにより超音波モータへの負荷が僅かに変動するため、提案手法を実装し、その有効性を検証することが今後の課題となる。

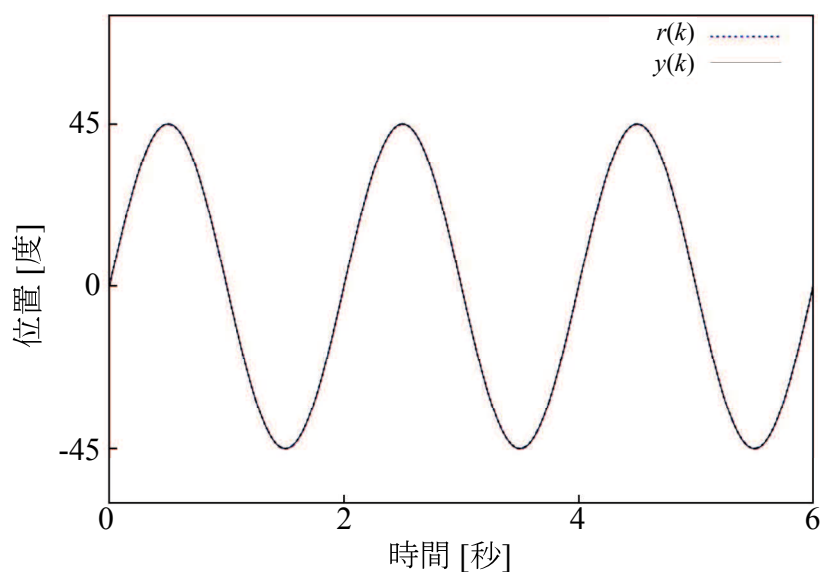


図 2.12 制御入力に対する超音波モータの応答

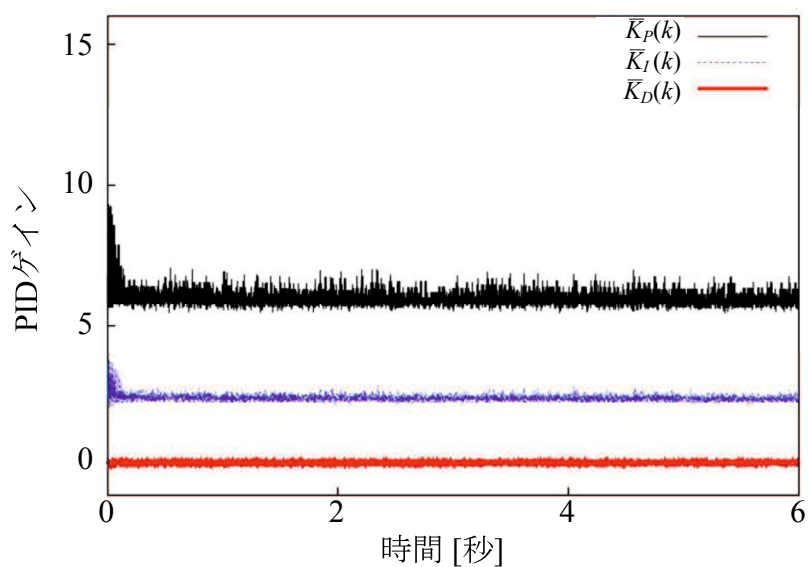


図 2.13 PID ゲインの変化

## 第3章 瞬き操作インターフェース

2.2節ではフットスイッチで操作することを例に本ロボットの動作について述べた。フットスイッチを用いることで足で操作できるため、フットスイッチは上肢障害者にとって簡便に操作できるインターフェースである。しかし、上肢障害者にも様々な症状や状態の人がおり、例えば足にも障害を抱えている場合がある。そのため障害者の状態に合った多種多様なインターフェースが必要とされており、本章ではその一つとして、瞬きにより操作するインターフェースを提案する。この他に、視線により操作できるインターフェースも提案するが、これについては4章で述べる。

### 3.1 従来の瞬き検出

#### 3.1.1 従来手法

すでに瞬きを検出するシステムが提案されており、様々なところで用いられている。例えばコミュニケーションツール、ドライバの居眠り検知システム、医療用検査装置などがある[32]。瞬き検出には接触型瞬き検出手法と非接触型瞬き検出手法があり、本節では、それぞれの瞬き検出手法について紹介する。

#### 接触型瞬き検出手法

##### (i) ひずみゲージ

ひずみゲージを瞼付近に医療用テープ等で貼り付け、瞼を動かす際に生じる変化を観測して瞬きを検出する。センサが非常に軽く、接触型の検出手法のなかでは使用者への負担が小さく、比較的簡単な装置でまばたきの検出が可能である。しかしセンサを貼り付ける位置や貼り付け方法の僅かな違いに

より、検出が困難になることがあるため、装着を行う介護者に負担をかけるといった問題がある。また、長時間連続して貼り付けることによる皮膚への影響（かぶれ等）もあると考えられる。

## (ii) 眼球電図法（EOG : Electro Oculography）

眼球電図法は本来、眼球の垂直運動を電氣的に測定する手法として用いられてきた。眼球の垂直運動の計測波形には、瞬きに伴う電位変動がノイズとして混入する。この現象を利用して、眼球運動に対してノイズであった瞬きによる電位変動を抽出することで、瞬き検出を行うことが可能となる。眼球の上方約 4 cm 前額部、下方約 3 cm の頬骨部に検出用電極と生体アース用電極を使用者に装着し（図 3.1(a)参照）、前額部と頬骨部の電極間の電圧を計測する。開眼時には前額部と頬骨部電極はほぼ同電位となる。閉眼時には上瞼裏の結膜部と角膜との接触面積が増して電位差が生じる。この開眼時と閉眼時の電位差を解析することにより瞬きを検出する[33]。

眼球電図法と同様に電極を直接被験者の皮膚に貼り付ける方法として、EMG（Electromyography）法がある[34]。EMG 法は瞬きの動作筋である眼輪筋の筋電位を測定することによって瞬きを検出する手法である。この手法も眼球電図法と同様の電極を眼輪筋に沿って、瞼と目尻部に装着し、電極間の電圧を計測する。この手法は瞬きの動作筋の活動を記録できるという利点があるが、出力電圧が瞼の運動量と比例する眼球電図法とは異なり、出力電圧を積分して求める必要がある。

## (iii) 磁気検出法

磁気検出法は上瞼に小型の磁石を付け、目の近傍にあるホール素子等の磁気検出素子で上瞼の上下運動に伴う磁気の変化を計測して瞬きを検出



する[35]。生体用アンプ等の電気生理学的機器を必要とする眼球電図法やEMG法と比べて、汎用的な部品で構成でき、検出回路を小型化できるため、眼鏡フレーム等への実装が容易である。実際に Takagi らは磁気誘導素子を用いて、上瞼の動きを検出するセンサを開発している[36]。その構成を図 3.1(b)に示す。上瞼に貼り付けられた磁石から一定の距離にある磁気誘導素子により磁石の変位を検出して瞬き検出を行っている。

### 非接触型瞬き検出手法

#### (i) 反射型フォトセンサ

反射型フォトセンサでは、赤外線 LED とフォトトランジスタを一つに組み合わせたセンサを用いる。眼球に向けて赤外線を照射し、その反射光をフォトトランジスタで検出する（図 3.1(c)参照）[37][38]。開眼・閉眼により反射光の強度に差が生じ、これをもとに瞬きを検出する。また、反射型フォトセンサを眼鏡に取り付けることにより、センサの装着を容易にすることができるが、設置位置の許容範囲が狭いため受光素子が視界に入るといった問題がある。また、介護者が眼鏡の装着位置がずれると誤検出を起こしやすいといった問題もある。

#### (ii) 光検出法

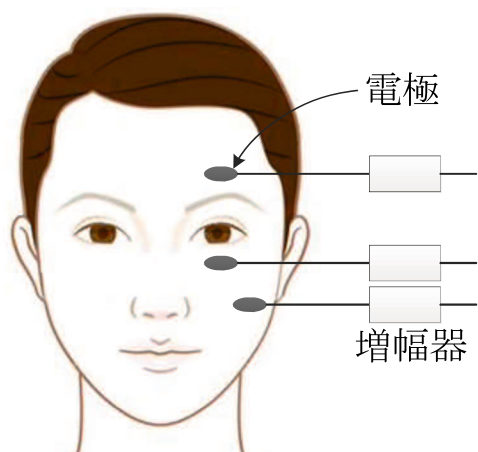
光検出法では光ファイバを例にとって説明する。この手法の概要図を図 3.1(d)に示す。目から前方に設置した光ファイバにより、目とその周囲の光を受光する。入射される光は閉眼時には肌のみから反射する光が主であるが、開眼時には黒目から反射する光も含まれる。黒目からの反射光は弱いいため、閉眼時に比べると開眼時の全受光量は多くなる。この受光量の差によって瞬きが検出される[39]。このように目の前方付近に受光素子をお

き，受光量変化によって瞬きを検出する手法を総称して光検出法とよぶ。

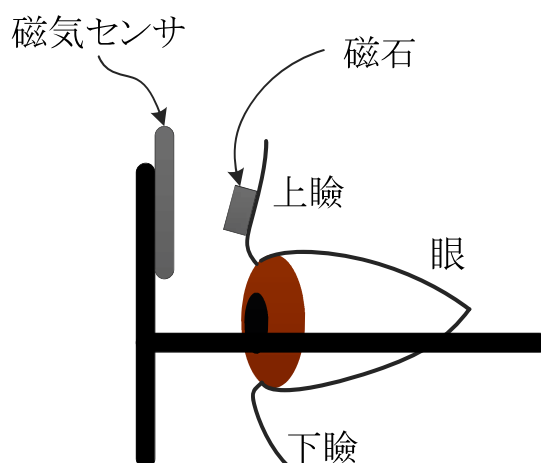
### (iii) 動画像処理による検出法

光検出法を発展させた方式として，動画像処理による瞬き検出手法がある。具体的な瞬き検出のための動画像処理の例を挙げる。宮川らは図 3.1(e)のように CCD カメラにより眼の動画像を撮り込んでいる[40][41][42]。ここでは，黒目の横幅をもとに作製された十文字のテンプレートを基準に眼の画像の計測範囲を定め，その範囲内に含まれるすべての画素の階調値を積分し閾値処理することで，開眼と閉眼を判別している。この手法では，多くの情報と複数の処理を用いて目の開閉を判別しているため，光検出法より精度の良い瞬き検出が可能となる。またこの他にも，テンプレートマッチングを応用した瞬き検出手法が提案されている[43][44]。

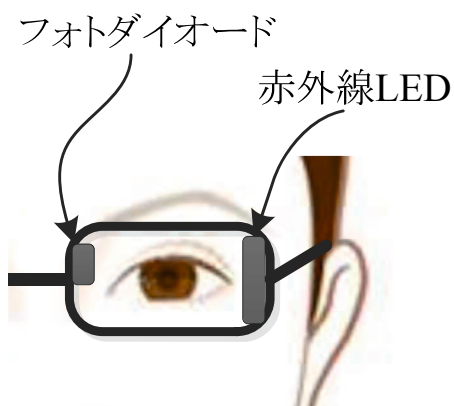
この手法は特に，運転中のドライバの居眠り検出や意識推定を行うシステムに用いられている[45][46][47]。運転中は常に移動しているため太陽光による雑音が多く，自然光を利用した検出方法では誤検出を起こしやすい。これに対応するため，赤外光を照射し瞬きを取得している。一方で，ALS 患者のためのコミュニケーションツールの用途にしているものでは，NN (Neural Network) により開眼・閉眼を学習により判断したり[48]，顔の肌色領域から眼部を探索しその面積の変化で瞬きを検出したりしている[49]。



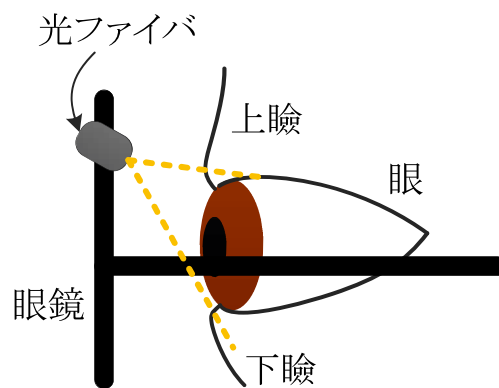
(a) 眼球電図法



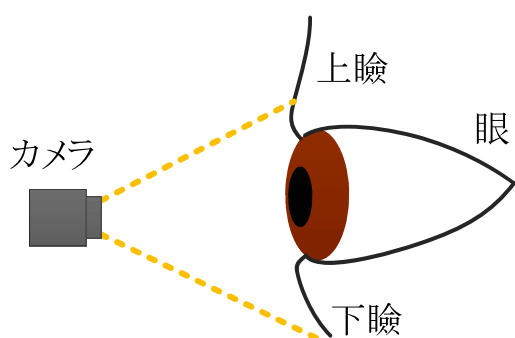
(b) 磁気検出法



(c) 光ファイバ



(d) 反射型フォトセンサ



(e) 動画像処理による検出法

図 3.1 従来瞬き検出手法

近年では、多様な用途に対して動画像処理による瞬き検出手法の提案が行われている。この理由の一つとして、カメラの性能向上に伴い、十分な性能のカメラが安価に入手できるようになったことが挙げられる。また、動画像処理以外の手法に関しては基本的に眼鏡に計装してシステムを構築している。このため少なからず拘束感があるが、動画像処理ではカメラのみを用いて非接触に瞬きを検出できることから最も有用的であると考えられる。そのため本インターフェースにおいても動画像処理法を採用している。

### 3.1.2 従来手法に対する位置づけ

瞬き検出法は、主に ALS 患者等のコミュニケーションツールや自動車の居眠り運転の検出に用いられる。コミュニケーションツールでは、はじめにモニタに文字盤を表示し、“あ行”から順に子音行が点灯する。ここで瞬きをすることで子音を選択し、その直後に母音列が順に点灯しはじめるため、再度瞬きをすることで文字を選択する。これを繰り返すことで言葉にし、意思を伝えることができる。このコミュニケーションツールの瞬き検出手法では、カメラに対して顔の角度が左右 30 度の傾きや、水平方向に 1 m 以上の移動に対応するため、NN で学習し瞬きの判別を行っている。

一方、居眠り運転検出では、太陽光による雑音を軽減するため赤外線照明を使用したり、眼部探索にテンプレートマッチングを用いている。

これらの手法は、使用環境に合わせており、他の用途には不適であると考えられる。例えば、本ロボットの使用環境において、食物を選択する際には使用者の顔はほとんど動かないため、顔の位置や向きを考慮する必要がない。そのため、コミュニケーションツールのようにコストの高い処理を必要としない。また、本ロボットの使用場所は室内であり、室内灯を点けて使用するため外乱

光の影響が小さい。そのため、居眠り運転検出手法のように、赤外光を照射する装置を必要としない。加えて、一般的にテンプレートマッチングは処理コストが高く時間がかかる。

以上のことから、提案ロボットの操作に適した瞬き検出手法として、カメラのみを用いて動画処理を行い、低処理コストに瞬きを検出する手法を提案する。次節で、その詳細を述べる。

### 3.2 瞬き操作インターフェース概要

提案する瞬き操作インターフェースを用いて本ロボットを操作する手順について述べる。はじめに、各 Plate に備えている LED (図 2.3) が Plate①から点灯する。Plate⑤まで点灯すると Plate①に戻り、再び順に点灯する。次に、所望する食物が載る Plate の LED が点灯している間に意識的な瞬きを行う。提案インターフェースがその瞬きを検出し、ロボットの通信部に通知する。そして、ロボットが自動で選択された食物を使用者の口元まで運ぶことで食事を行う。提案インターフェースにより、瞬きのみで食物を選択し食事を行えるため、上肢障害者が簡便にロボットを操作することができる。

本インターフェースは Web カメラ (Logicool 社製 HD Pro Webcam C920t) を接続したシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi 財団製 Raspberry Pi 2 Model B) により構成される。一般的に瞬き検出は、眼部を検出した後、トリミングした眼部画像から瞬きを検出する。提案する手法でもこの手順は同様であり、はじめに、Web カメラから利用者の顔画像を取得し、Haar-like 特徴量により眼部探索を行う。眼部画像を切り出し、眼部の黒色領域に対して円形度を用いて瞬き検出を行う。円形度とは、あるオブジェクトの形状が真円に近いかを表す指標である。眼部の黒色領域は、開眼時では主に黒目 (虹彩および瞳孔) が写るた

め円形状になり、円形度が高くなる。閉眼時では主にまつ毛が写るため抽出領域は細長い楕円状になり円形度は小さくなる。そして、本ロボットを操作するための意識的な瞬きは閉眼の継続時間により判別する。

眼部探索に Haar-like 特徴量を用いることでテンプレートマッチングよりも高速に行うことができ、その詳細については 3.3 節で述べる。次に、瞬き検出は円形度を用いることでスケール不変に瞬きを検出することができ、その詳細を 3.4 節で説明する。その後、本ロボットを操作するための意識的な瞬きについての定義を決定する。

### 3.3 眼部探索

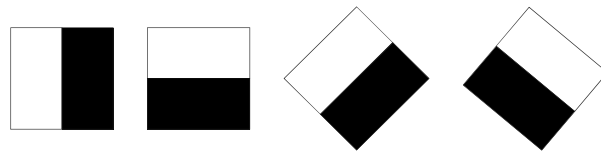
本節では、はじめに眼部探索に利用している Haar-like 特徴量について述べ、その後、眼部探索について説明する。

#### 3.3.1 Haar-like 特徴量

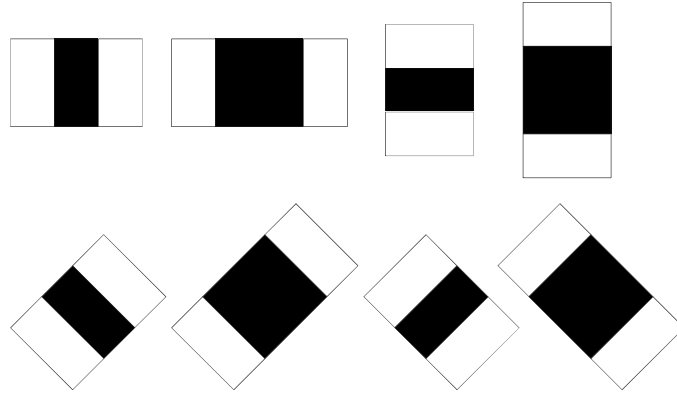
画像における特徴量として画素値をそのまま用いる場合、照明条件の変動やノイズの影響を受けやすい。これに対応してオブジェクト検出を行うために、入力画像の任意の位置に、図 3.2 に示すような矩形領域のパターンを設定し、領域間の差分を計算する。すなわち、「白色領域に対応する画素値の総和」と「黒色領域に対応する画素値の総和」の差を特徴量とすることで、画素値の変動に頑健な特徴になる。

入力画像上の任意の場所に図 3.2 の検出窓をおき、検出窓の中の画像の特徴量を次式で計算する。

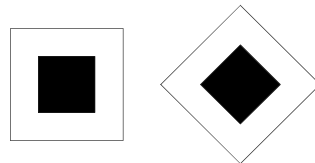
$$\begin{aligned} \text{特徴量} &= \text{矩形特徴の黒領域の画素値の合計} \\ &\quad - \text{矩形特徴の白領域の画素値の合計} \end{aligned}$$



(a) Edge 特徴



(b) Line 特徴



(c) Center-Surround 特徴

図 3.2 Haar-like 特徴のパターン窓

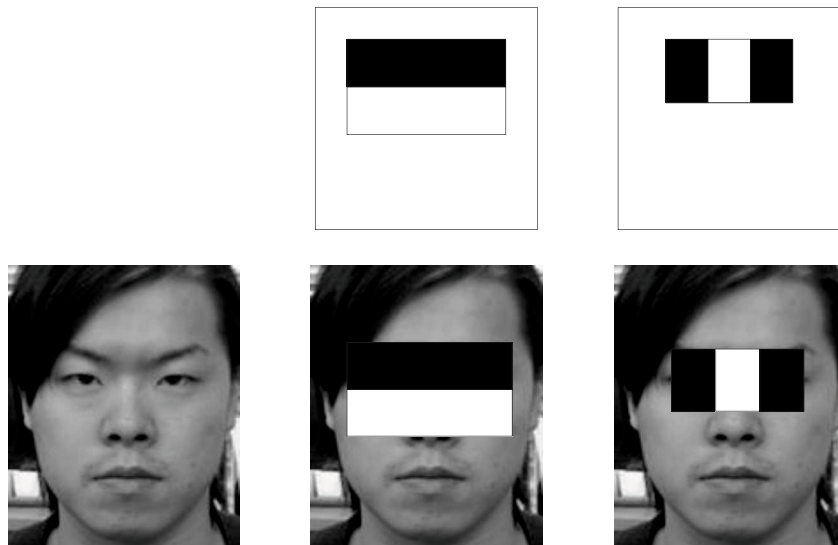


図 3.3 Haar-like 特徴適用例

この特徴量を Haar-like 特徴量といい、矩形領域の白黒パターンを Haar-Like 特徴と呼ぶ[50]。図 3.3 は Haar-Like 特徴を適用した一例である。通常顔画像では、目の領域の画素は周辺よりも暗いと考えられるため、図 3.3 のような検出特徴の特徴量は高くなる。実際には顔に対して多数の Haar-like 特徴のパターン窓が当てはまり、検出窓内の矩形の位置とパターンの組み合わせによって顔を検出する。

### 3.3.2 Haar-like 特徴を用いた眼部検出

Haar-like 特徴量は局所的な明暗差を特徴としてオブジェクト検出ができるため、テンプレートマッチング等のオブジェクト検出アルゴリズムに比べて演算コストが非常に軽量である。そのため、Raspberry Pi で構成する本インターフェースに簡便に計装できる。本節では Haar-like 特徴量を利用して眼部を検出する手法について述べる。図 3.4 に Web カメラより取得した画像に対して眼部画像を抽出するまでの処理の流れを示す。はじめに Web カメラから使用者の画像を取得する。このときの取得画像を図 3.5 に示す。取得画像のサイズは 640×480 pixel である。ここで、画像は二次元配列として表現されるため、画像の左上画素を示す座標を(0, 0)として表す。次に、カメラの取得画像から顔の特徴を学習した Haar-like 特徴量を用いて顔の検出を行う。このとき検出した顔画像を図 3.6 に示す。



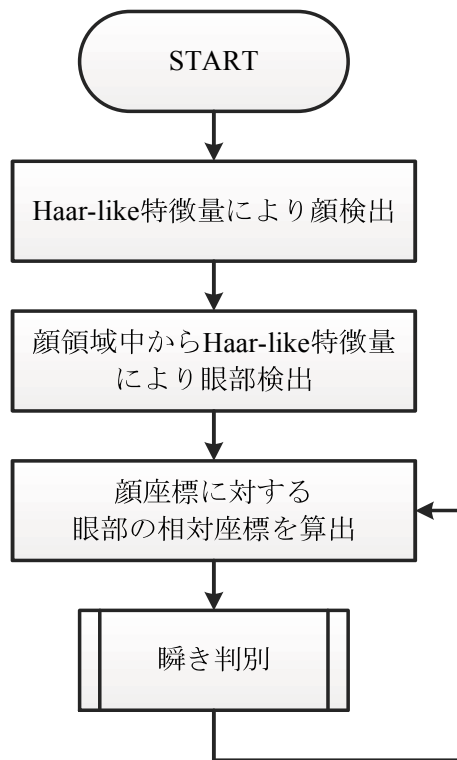


図 3.4 眼部検出フローチャート



図 3.5 Web カメラ取得画像

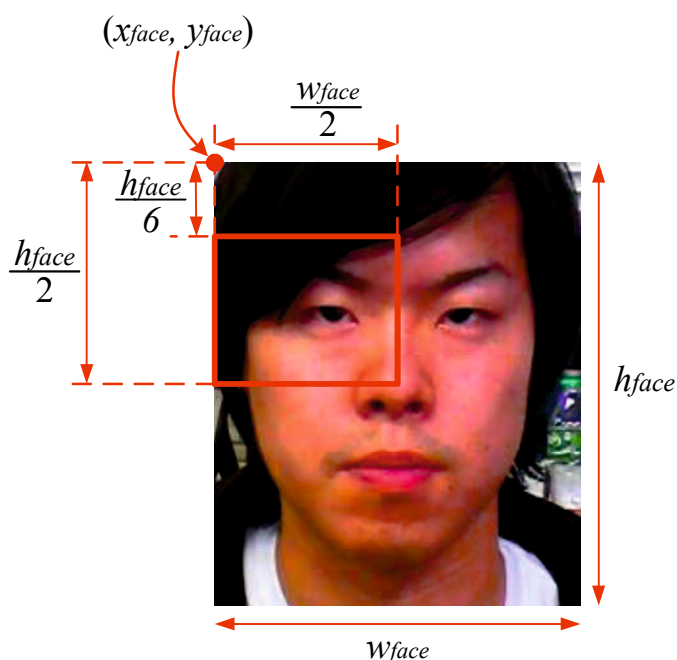


図 3.6 検出された顔画像と探索範囲

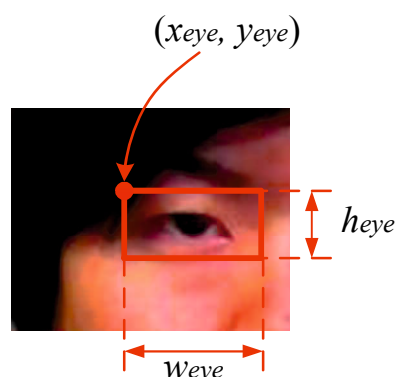


図 3.7 眼部検出

顔の検出後に眼部の特徴を学習した Haar-like 特徴量を用いて眼部領域の検出を行う。ただし、このとき図 3.6 のように眼部を探索する領域を縦方向  $h_{face}/6 \leq y \leq h_{face}/2$ , 横方向  $0 \leq x \leq w_{face}/2$  に限定して行っており、この領域は顔画像に対して眼部が存在すると想定される領域を示している。顔画像中から検出した眼部領域画像を図 3.7 に示す。顔に対する眼部の相対位置は不変であり、顔の位置が移動するとそれに合わせて眼部領域も移動する。1 フレーム目に検出した顔画像に対する眼部領域の相対座標を求めて、次のフレーム以降はその相対座標を用いることで眼部画像を抽出する。これにより処理量を軽減している。また、この処理により次の効果もある。Haar-like 特徴量では局所的な明暗差からオブジェクト検出を行うため、取得画像に対して眼部探索を直接行くと誤認識が多くなる。これは、眼部は特徴が少なく、背景の一部や他の体の一部を眼部と認識する場合があるためである。そのため本手法では、はじめに特徴の多い顔を検出し、相対座標より眼部画像を抽出している。ただし、Web カメラか

らの距離により顔および眼のスケールが変化するため、相対スケールも考慮している。ここで、はじめのフレームの顔座標を $(x_{face}, y_{face})$ 、そのスケール（画像サイズ）を $(w_{face}, h_{face})$ とし、眼部座標を $(w_{eye}, h_{eye})$ とする。そして、次フレーム以降では取得した顔座標を $(x_{newface}, y_{newface})$ とすると、眼部座標 $(x_{neweye}, y_{neweye})$ とその画像サイズ $(w_{neweye}, h_{neweye})$ は次式で求められる。

$$x_{neweye} = \frac{x_{newface}}{x_{face}}(x_{eye} - x_{face}) + x_{newface} \quad (3-1)$$

$$y_{neweye} = \frac{y_{newface}}{y_{face}}(y_{eye} - y_{face}) + y_{newface} \quad (3-2)$$

$$w_{neweye} = \frac{w_{eye}}{w_{face}} w_{newface} \quad (3-3)$$

$$h_{neweye} = \frac{h_{eye}}{h_{face}} h_{newface} \quad (3-4)$$

### 3.4 開眼・閉眼判別と意識的な瞬き検出

本ロボットにおいて食物の選択は、3.2節で述べたように意識的な瞬きにより行う。ここで、自然な瞬きとは普段我々が無意識に行っている生理的な瞬きを意味する。一方、意識的な瞬きは本ロボットを操作するための瞬きである。このため、意識的な瞬きと自然な瞬きを識別する。

Haar-like 特徴により取得した眼部画像から開眼・閉眼判別を行い、自然な瞬きであるか意識的な瞬きであるかを判断する。このフローチャートを図 3.8 に示す。随時この処理を繰り返し意識的な瞬きを検出した際にロボットの通信部に到達する。なお、この定義については後述する予備実験にて決定する。

眼部画像に 2 値化処理や外乱の除去を行い、重心位置を比較することにより

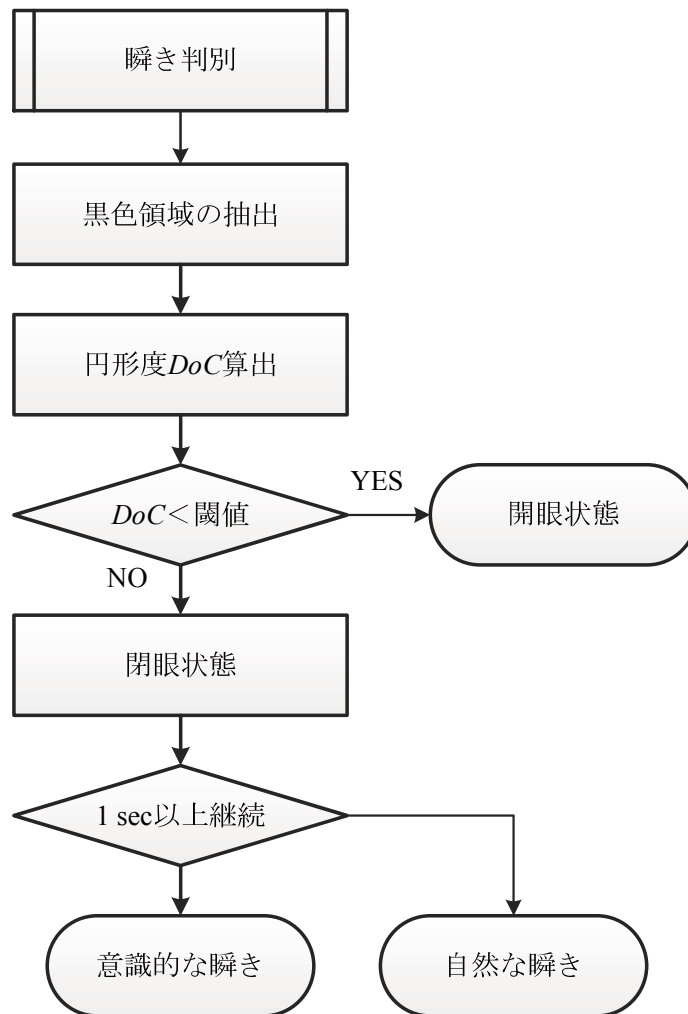


図 3.8 意識的な瞬き検出フローチャート

黒目（虹彩および瞳孔）を抽出する。取得した黒目領域に対して円形度を用いて目の開閉判別を行い、意識的な瞬きの検出を行う。

### 3.4.1 黒目領域の抽出

前節で抽出した眼部画像から瞬きを検出するため開眼・閉眼の判別を行う。ここで眼部画像内の黒色領域に着目すると、開眼時には黒色成分として黒目（虹彩および瞳孔）が該当する。一方、閉眼時ではまつ毛が該当する。そしてそれ

それぞれのシルエットを見ると、開眼時の黒目は円形状であり、閉眼時のまつ毛は長細い楕円状をしている。そこで黒色領域を抽出し、その領域に対して円形度を算出する。この円形度を用いて開眼・閉眼を判別する。以下、その詳細について述べる。

検出した眼部画像をグレースケール画像に変換し、画像に2値化処理を施すことで黒色領域を抽出する。2値化処理とは、ビット深度が8 bit のとき、ある閾値以上の画素値を255（白画素）に、それ未満の画素値を0（黒画素）の2値の画像に変換することである。固定閾値により、2値化処理を行うこともできるが、照明等の影響で画像全体の明るさは一定ではないため、p-tail法を用いて自動的に閾値を決定し2値化処理を行う。p-tail法は、画像中の2値化を行いたい領域の画素値があらかじめ予測できる場合に有効である。画像内の2値化を行いたい領域が全画像の領域に占める割合（ $p$ ）を指定することにより、閾値を決定する[51]。p-tail法では、2値化する領域の大きさが一定の場合、画像の明るさが変動したとしても、2値化された画像は変化しないためこの手法を用いる。抽出した眼部画像中に占める黒目の割合は約5%であったため、本手法では $p = 0.05$ として2値化処理を行っている。

このとき、開眼時には黒目に加えてまつ毛の一部が抽出されることがある。黒目以外の外乱要素を除去するためラベリング処理を行う。ラベリング処理とは図3.9に示すように、同じ連結成分を構成する画素に同じ番号（ラベル）を付け、異なる連結成分を構成する画素に異なる番号を付ける処理である[51]。これにより、それぞれ独立した要素の分別をつけ、面積を求めることが可能である。2値化処理後には黒目領域で面積が最大となり、外乱要素としてまつ毛等の一部が存在している状態であるため、ラベリング処理で面積が最大となった領域が黒目であると推定する。また、照明や外部光が黒目に反射して、抽出した黒目領域が欠ける場合がある。これに対応するため、クロージング（膨張・収縮処

理)により欠けた箇所を補填する。膨張とは注目画素が黒画素のときその周囲 8 画素を黒画素に換える。一方で、収縮は注目画素の周囲 8 画素すべてが黒画素でないとき注目画素を白画素に換える。膨張・収縮処理は一般的にオブジェクトの欠落を補填するために用いられ、図 3.10 に示しているように黒目の欠落を補填する。図 3.11 は開眼時の、図 3.12 は閉眼時の、上記処理により得られた黒色領域の画像である。この黒色領域に対して、次で述べる円形度を算出し開閉判別を行う。

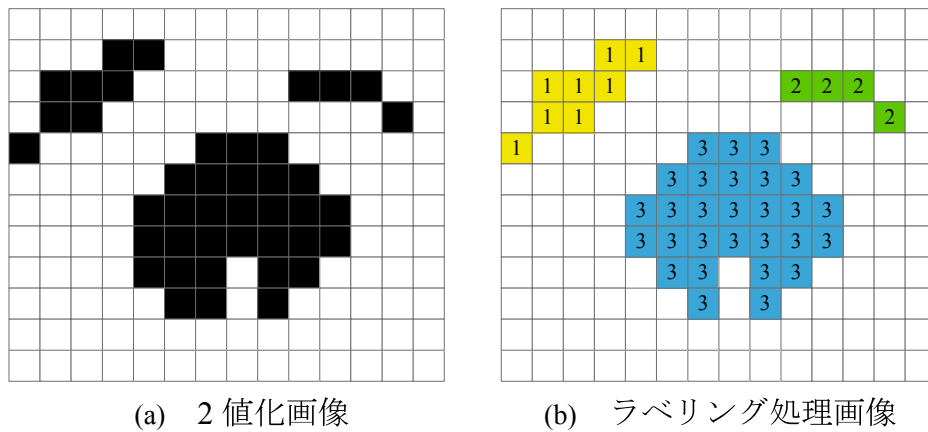


図 3.9 ラベリング

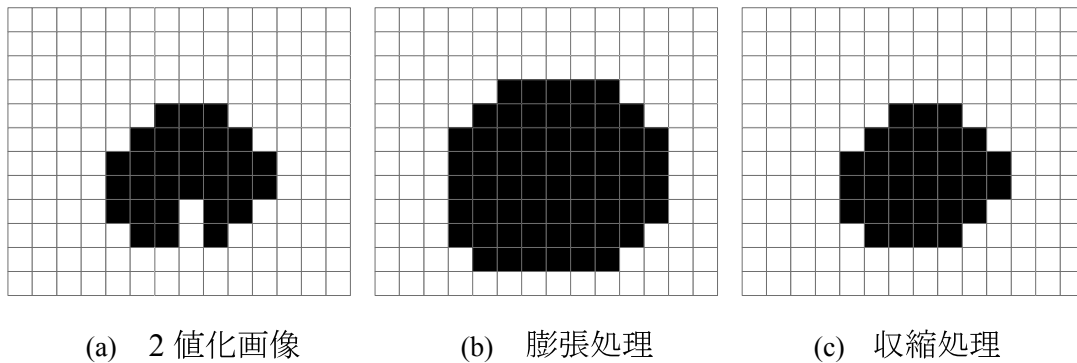
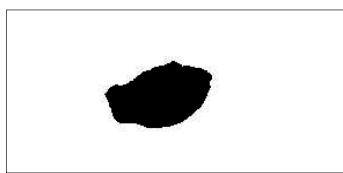


図 3.10 クロージング



(a) 眼部画像



(b) 抽出画像

図 3.11 開眼時眼部画像



(a) 眼部画像



(b) 抽出画像

図 3.12 閉眼時眼部画像

### 3.4.2 円形度による開眼・閉眼判別

円形度とは、面積と周囲長を基にどれほど円形に近いかを表す特徴量である。図 3.11 の場合には黒目が写るため抽出した領域は円形状になり、図 3.12 の場合にはまつ毛が写り抽出した領域は細長い楕円状である。この差異を利用して抽出領域に対する円形度により目の開閉を判別する。ここで図形面積を  $S$ 、周囲長を  $l$  とすると円形度  $DoC$  は次式で表される。

$$DoC = \frac{4\pi S}{l^2} \quad (3-1)$$

円形度は  $0.0 \leq X \leq 1.0$  の値をとり、 $X=1.0$  のとき真円を示し、 $X$  の値が小さくなるほど真円から遠ざかる。

### 3.4.3 予備実験

本実験により開眼と閉眼の判別を行うための円形度の閾値の決定を行う。また、瞬き操作インターフェースでは意識的な瞬きにより食物の選択を行う。このとき、我々が日常行う瞬き（自然な瞬き）があり、これと食物選択を行うための瞬き（意識的な瞬き）の分別をつけるため、その定義を決定する。

抽出した眼部領域に対して、円形度の時間変化を 20 秒間取得した。このとき自然な状態として自然な瞬きのみを行った。本実験では開眼または閉眼の円形度の変化と、自然な瞬きの際の継続時間が分かればよいため、短時間のデータ取得としている。被験者は成人男性 6 名として、Web カメラから被験者の眼部までの距離は 300 mm、Web カメラに対して水平正面の位置である。

図 3.13 は被験者 1 名の円形度の時間変化を示している。開眼時の円形度は約 0.6~0.7 の範囲、瞬きの際の閉眼は約 0.1~0.2 であった。開眼時では完全に黒目

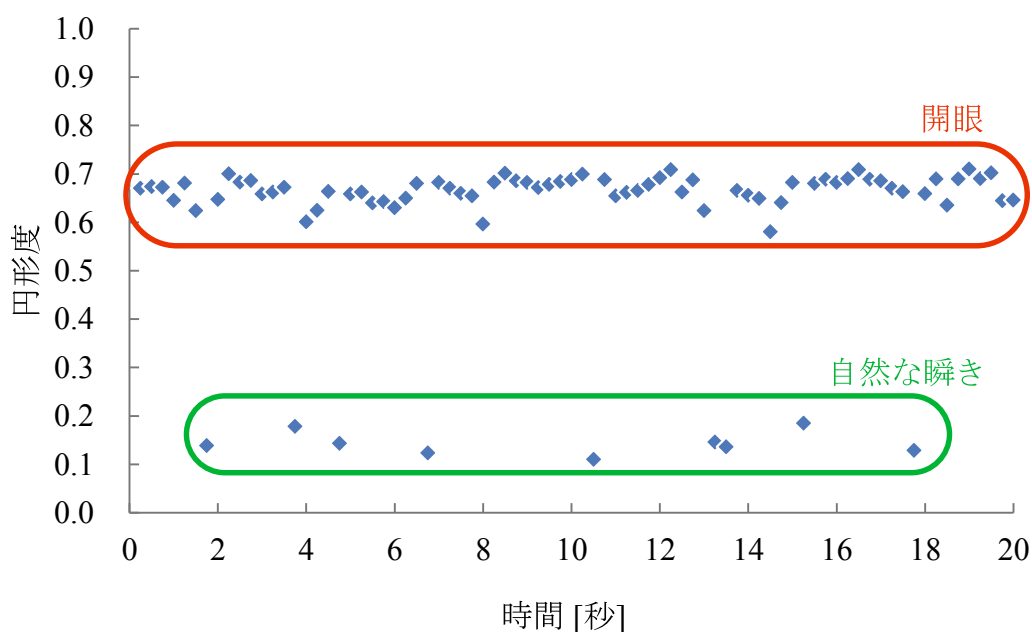


図 3.13 円形度の時間変化



が露出しているわけではなく、一部が隠れているため円形度が 1.0 から大きく離れたと考えられる。また、閉眼時ではまつ毛が黒色として映るため、楕円状になり、真円に対して大きな差異が出たことから円形度が 0 に近い値となっている。そこで、この実験から両群の中間に位置する 0.4 を開眼・閉眼の判別に用いる閾値とした。

実験中、計 9 回の自然な瞬きがあり、どの時点においてもその継続時間は 1 フレーム分または 2 フレーム分であった。今回のフレームレートは 0.17 秒であり、一般に自然な瞬きの継続時間は 0.1~0.15 秒程と言われているため妥当な結果を示している。ただし強めに瞑る瞬きについては 2 フレーム分 (0.34 秒) 検出されたと考えられる。そこで、自然な瞬きから意識的な瞬きを分別するための閾値として、量子化誤差を考慮して、自然な瞬きの継続時間の 3 倍とした。すなわち 1.0 秒継続して閉眼していた場合を意識的な瞬きであるとした。

### 3.5 実機評価実験

#### 3.5.1 実験方法

本実験では、前節で決定した閾値を用いて、意識的な瞬きと自然な瞬きの分別がつくことを確認するため、提案インターフェースの認識率を検証した。認識率として、意識的な瞬きの認識率および自然な瞬きによる偽陽性誤認識を測った。この場合の偽陽性誤認識とは、自然な瞬きであったにもかかわらず意識的な瞬きであったと誤認識することである。被験者 10 人 (20 代の男性 9 名と女性 1 名) に対して、本ロボットが食物の供給に要する 12 秒おきに、意識的な瞬きを計 15 回行った。また意識的な瞬き間のインターバルには自然な瞬きを行った。

被験者には提案インターフェースの使用方法を十分説明し、何度か実際に使

表 3.1 認識率および偽陽性誤認識

被験者		認識率 (成功/試行回数)	偽陽性誤認識
裸眼	A	15 / 15	0
	B	15 / 15	0
	C	15 / 15	0
	D	14 / 15	0
	E	15 / 15	0
	F	15 / 15	0
眼鏡	G	15 / 15	0
	H	13 / 15	0
	I	15 / 15	0
	J	15 / 15	0

用してもらい、インターフェースの操作に慣れた後に実験を行った。このため、意識的な瞬きを定義している時間については不足がないようにしている。

### 3.5.2 実験結果

実験の結果を表 3.1 に示す。被験者 A~F は裸眼，G~J は眼鏡装着者である。実験結果を見ると，わずかに誤認識があり認識率が 100 %には至らなかったが，偽陽性誤認識は見られなかった。

### 3.5.3 考察

認識率が劣る原因として，目の大きさやまつ毛の長さ等の個人差，または照明の影響が考えられる。

ただし目の大きさに関しては，目が大きい場合は，開眼時に黒目がより鮮明に写り円形度は他者より大きくなるため認識率は向上する。一方で，目が小さ

い（細い）場合は、開眼と閉眼の差が小さく誤認識要因となりうるが、開眼を閉眼であると認識する要因である。しかしこの場合、偽陽性誤認識に当たるため、実験結果より目の大きさによる影響はなかった。

次にまつ毛の影響について、まつ毛が長い場合、閉眼時に抽出した黒色領域が他者より厚みを持つ。このため被験者 D の誤認識についてはこれが原因であったと考えられる。

そして照明の影響について、提案法では照明の影響を考慮してクロージングで対応しているが、眼鏡装着者の場合は反射の範囲が広い。そのため一部で誤認識が見られたと考えられる。ただし実験は研究室内で行っており、被験者から見て蛍光灯が前方の天井に計 9 (3×3) か所および頭上 3 か所設置してあった。このときの室内の照度は 570 lux 程度であった。一般的な家庭や施設の部屋の照度は 150 lux から 300lux 程度であり、これらと比較すると、実験環境は非常に明るく照明の数も多い。照明の影響が大きい環境下で実験を行っており、一般家庭等を想定すると十分に認識できると考える。結果として、僅かに誤認識はあったが、偽陽性誤認識は見られなかった。すなわち、意識的な瞬きをした際の誤認識は一部で見られたが、自然な瞬き中に意識的な瞬きと判定することはなかったため、本インターフェースは十分に有効であると考えられる。

## 第4章 視線操作インターフェース

瞬き操作インターフェース（3章）の場合，ロボットの各 Plate に付している LED が順次点灯し，所望するところで意識的な瞬きを行うことで，食物の選択を行っていた。そのため瞬き操作インターフェースでは所望する食物の LED が点灯するまで待つ必要があるといった欠点も残されている。そこで，視線を向け注視することで食物を選択するインターフェースの提案をする。これにより待ち時間がなく，所望する食物に視線を向けるという直観的な操作が可能となる。

### 4.1 従来の視線方向推定

#### 4.1.1 従来手法

近年，視線操作インターフェースとよばれる視線方向を読みとることで，PC等の入力方法に利用する研究が行われている。眼球運動のみで操作を行うため，上肢，下肢ともに障害がある場合でも操作が可能である。本節では，従来の視線方向の推定手法を紹介する。視線方向の推定手法は大別して接触型と非接触型の2種類ある。それぞれの場合に分けて説明する。

#### 接触型視線方向推定

##### (i) 眼球電位法（EOG : Electro Oculography）

3.1 節の瞬き検出手法の場合と同様に眼球電位法があり，本来この手法は眼球運動計測に用いられる。眼球は，角膜部が正，網膜部が負に帯電しており，眼を動かすと目の周辺の皮膚の電位が変化する。EOG 法は，この電位差を測定して視線を推定する手法である[52]。図 4.1(a)に示すよう

に目の周辺に電極を貼付し、目を閉じた場合でも眼球運動を計測できるという利点がある。またその電極も医学分野などで使われており、人体への悪影響もなく計測時間に制限がない。

## (ii) サーチコイル法

サーチコイル法とは、交流磁界中におかれたコイルに磁界と成す角度に比例した電位が発生することを利用して、眼位を測定する手法である[53]。サーチコイル法には図 4.1(b)に示すようなコイルを装着した特殊なコンタクトレンズを用いる。コイルが眼球に完全に装着されていれば、精度、測定域、安定性などに優れ、回旋の測定が可能である。そのため眼球運動の計測法に最も優れた手法である。しかし特殊なコンタクトレンズを用いるため、角膜に傷をつける可能性があり、長時間の使用はできないといった欠点もある。

## 非接触型視線方向推定

### (i) DPI 法 (Double Purkinje Image)

図 4.1(c)に DPI 法の原理図を示す。近赤外線を目に照射することによって作られる像のなかで角膜表面の反射像（第 1 プルキニエ像）と水晶体裏面反射像（第 4 プルキニエ像）を利用する。両像が頭部の動きの影響を相殺することに着目し、頭部を顎台とヘッドレストで簡単に固定するのみで高精度な視線検出を可能にしている[54]。しかし、第 1 プルキニエ像に比べて 500 分の 1 程度の信号である第 4 プルキニエ像から、信号を分離し検出するため、その光学系が複雑かつ設備が大がかりになるといった問題がある。

## (ii) 角膜反射法

図 4.1(d)に角膜反射法の原理図を示す。角膜反射法とは、角膜上に映った光源の虚像が、眼球運動に伴って平行移動することを、カメラを用いて検出する[55][56][57]。角膜上の虚像をカメラで確認でき、センサの装着が容易である。時間的・空間的解像度はカメラの解像度とフレーム周波数に依存して決まる。例えば、使用者の顔に向けて赤外光を照射し、赤外線に感度特性をもつカメラで目を撮影する。角膜上での反射光の位置（角膜反射）を基準点とし、角膜反射の位置に対する瞳孔の位置に基づいて、視線を検出する。精度が良いことが特徴だが、赤外線カメラと赤外線 LED を使うため高価になる。

## (iii) 強膜反射法

図 4.1(e)に強膜反射法の原理図を示す。黒目（虹彩および瞳孔）と白目（強膜）では光に対する反射率が異なる。強膜反射法は、黒目と白目の境界部分に赤外光を照射して、それらの反射率の違いにより目の動きを検出する手法である[58][59]。簡単で比較的安価に検出できるが、外部光の影響に弱いため、精度を得るためには外部光が入らない状況で使用する必要がある。

このように非接触式では主に動画像処理をベースとして視線方向推定を行っている。そのうえで、精度向上のため赤外線を照射し、プルキニエ像を利用している。しかし、赤外線を用いるものは装置が複雑になったり推定できる範囲が限定されたりする問題もある。そこで本インターフェースでは、動画像処理法を基に、室内照明の自然光のみを利用して簡単なアルゴリズムで視線方向を推定する。

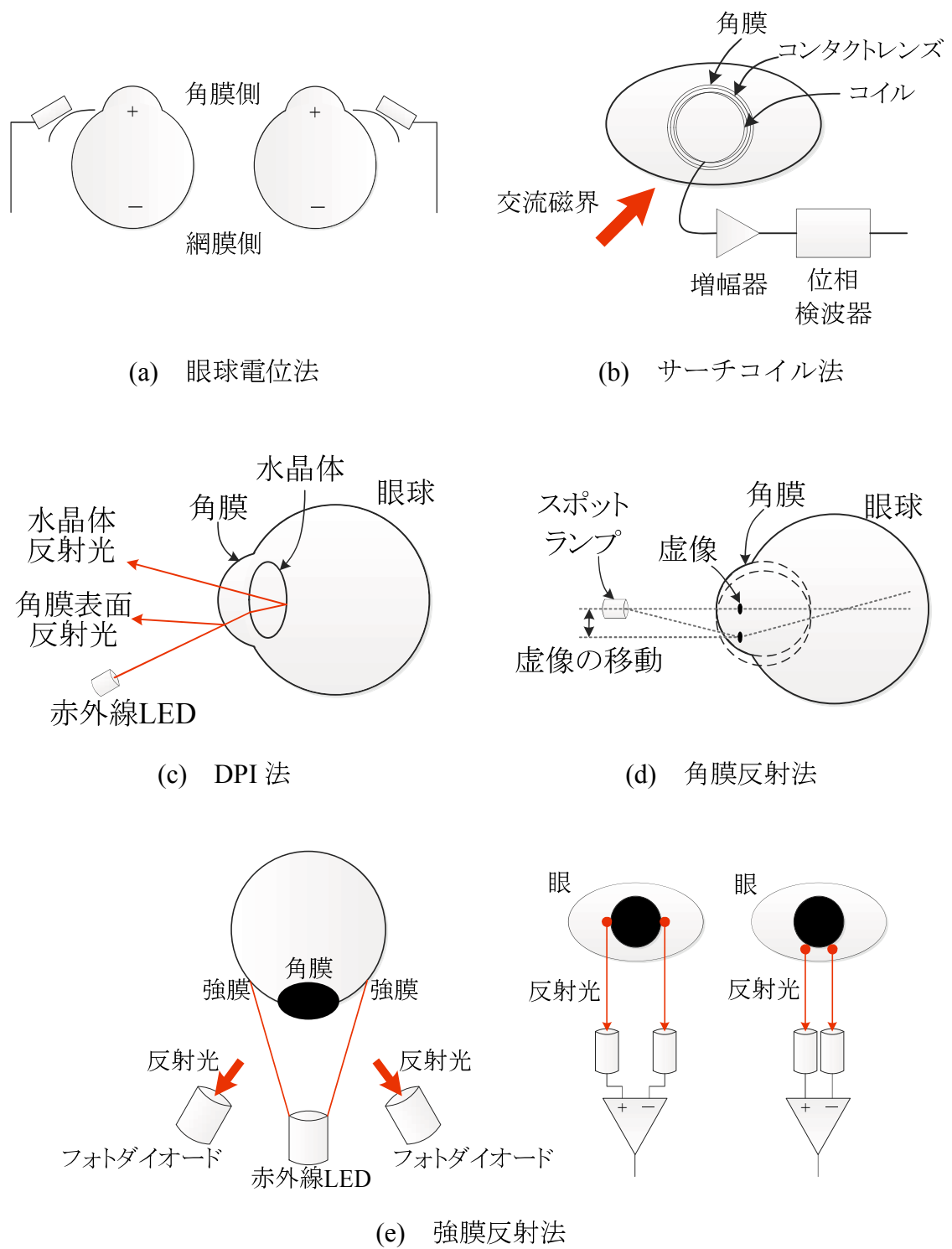


図 4.1 従来の視線方向検出手法

#### 4.1.2 従来手法に対する位置づけ

一般的な視線方向推定の用途としてはキーボード等の文字入力やわき見運転を防止するための運転支援システム等に用いられる。文字入力の場合は 2 次元平面上に 12 分割，多いものでは 50 分割以上分割精度が要求される。運転視線システムの場合は注視点への高い精度が必要である。対して本ロボットで食物選択に必要な精度は一次元線上に 5 分割である。これは，食物を配膳する Plate が 5 列に分かれており，列ごとに食物の選択を行うためである（2 章参照）。本ロボットでは高精度な視線方向推定を必要としない。そこで，赤外線等の光源を用いずに室内照明環境下で，カメラから取得した画像のみを用いて動画像処理を行い視線方向を推定する。

## 4.2 視線操作インターフェース概要

視線操作インターフェースを用いて本ロボットを操作する手順を述べる。所望する食物に視線を向ける。その食物が載る Plate の LED が点灯していることを確認する。3 秒間注視することで食物の選択決定を行い，本ロボットが自動で選択された食物を使用者の口元まで運ぶことで食事を行う。注視のみで食物を選択し食事を行えるため，非常に簡単にロボットを操作できる。

提案するインターフェースは Web カメラ (Logicool 社製 HD Pro Webcam C920t) と PC で構成される。本インターフェースの処理手順を図 4.2 に示す。

はじめに Web カメラより使用者の顔画像を取得し，以下の処理を行う。

- (a) 瞼が開いた状態と瞼が閉じた状態の画像を取得し，これら二画像の差分をとる。このとき眼部で，その差が顕著に表れるため，この領域の中心が眼部位置であると決定し，眼部位置周辺を矩形状にトリミングする。
- (b) 眼全体と黒目のそれぞれの重心点を算出する。



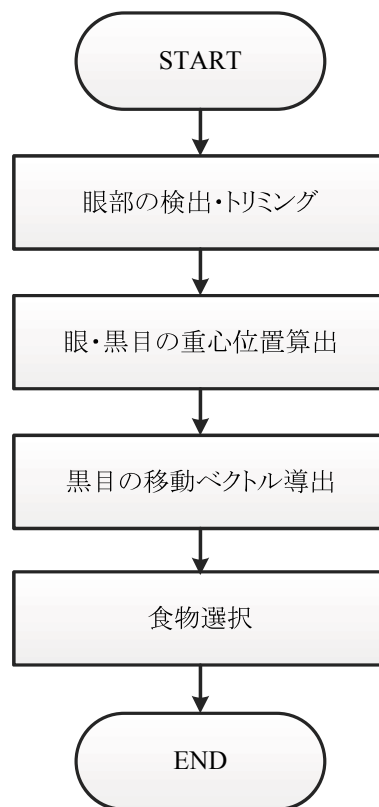


図 4.2 視線操作インターフェースの処理フローチャート

- (c) 眼全体の重心点を始点，黒目の重心点を終点とする移動ベクトルを求める。  
移動ベクトルの大きさはピクセル数で取得し，視線方向を推定する。
- (d) 推定した視線方向と各 Plate 閾値により注視している Plate 番号をロボット（通信部）に送信する。

#### 4.2.1 瞼開閉による眼部位置の特定

Web カメラより取得された顔画像から眼部位置を特定する。ここでは瞼の開閉の際の RGB 値の変化に着目した。はじめに，開眼時および閉眼時の顔画像を取得する。開眼時の眼部は，白目（強膜）と黒目（虹彩および瞳孔）で構成されており，それぞれ白色と黒色を示す。閉眼時では，眼部は肌色を示す。両画

像の差をとると、眼部で大きく差が生まれるため、これを眼部位置とする。また検出した領域をトリミングして、この後の処理を行う。

#### 4.2.2 眼部領域の抽出と黒目の分離

眼部画像を取得した後、眼全体および黒目の重心を求めるため、眼部領域の抽出を行い、そこから黒目を分離する。この抽出には RGB 各値の差を利用する。RGB とは、コンピュータで色を表現する際に用いられる表記法の一つで、色を R : 赤 (Red), G : 緑 (Green), B : 青 (Blue) の三つの原色の組み合わせとして表現する。RGB 値は一般的にそれぞれが 8 bit で表現され、0 から 255 までの画素値をとる。このとき眼部では白目の白色および黒目の黒色を、それ以外の領域は肌として肌色を想定し、それぞれの理想的な RGB 値は次の通りである。

白色 : (R,G,B) = (255, 255, 255)

黒色 : (R,G,B) = ( 0, 0, 0)

肌色 : (R,G,B) = (241, 187, 147)

白色および黒色は RGB のそれぞれの値に差がないことに対し、肌色は R 値が一番高く、次いで G 値, B 値と各値に差が生じている。この差の有無により眼部と肌部の分離が可能である。しかし実際には上記数値は理想値であり誤差が存在するため、RGB 値それぞれの差が小さければ白目および黒目であるとして、その領域は眼であると推定する。

実際には、眼部画像の各画素に対して RGB 値の中央値を求める。中央値と残りの二色の値との差を取り、差の絶対値が閾値よりも小さいとき眼を、閾値よりも大きい場合は眼以外の要因として肌であるとする。次いで、眼部領域の各画素の平均値を求める。この平均値を閾値として、これよりも小さければ黒色を示し、この黒色領域が黒目である。上述したアルゴリズムにより眼部画像中

から眼部と肌部を分離し、眼部領域から黒目を抽出する。

### 4.2.3 眼と黒目の重心位置による視線方向推定

抽出した眼部および黒目領域のそれぞれの重心を求め、眼の重心点を始点、黒目の重心点としたベクトルを視線ベクトルと定義する。このベクトルを用いて食物選択のための視線方向を推定する。

はじめに、眼部領域と黒目領域の重心点は次式で求められる[51]。

$$P_{GX} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (4-1)$$

$$P_{GY} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (4-2)$$

ここで抽出領域の全画素数を  $n$ 、注目画素の座標を  $(x_i, y_i)$ 、重心を  $(P_{GX}, P_{GY})$  を表す。眼部領域と黒目領域のそれぞれの場合で重心点  $(P_{GX}, P_{GY})$  を算出する。このとき各重心点と視線ベクトルは図 4.3 のようになる。そしてこの視線ベクトルの水平方向成分により注視している Plate を判断する。図 4.4 に示すように Web カメラと Plate は水平に配置されており、食物選択の際には視線ベクトルの水平方向成分の大きさ（以下、視線ベクトル水平移動量）に対して閾値  $E_n$  を設けることで、どの Plate を注視しているかを判断する。

加えて、常に視線方向を取得するためには眼部位置を追従する必要がある。これには現フレームの眼部の重心探索は前フレームの重心点を基準に生成した矩形領域の範囲で行う。カメラのキャプチャ領域を変化させ、4.2.2 項で述べた眼部判定処理を行うことにより、顔が左右に動いたとしても常に目を追従することができる。

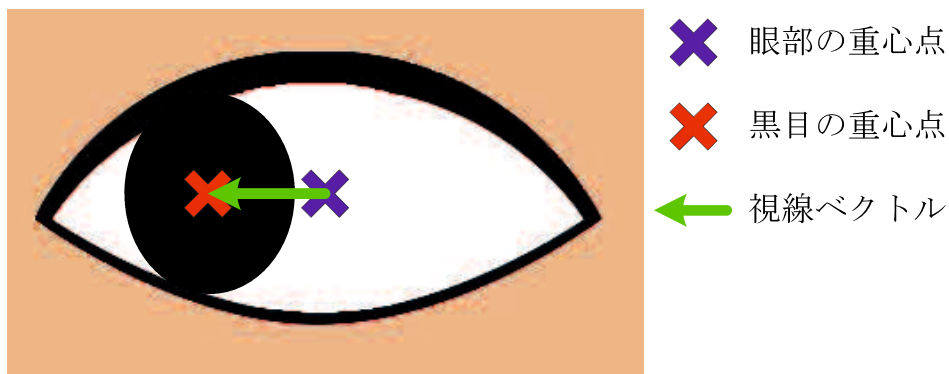


図 4.3 眼部および黒目の重心点と視線ベクトル

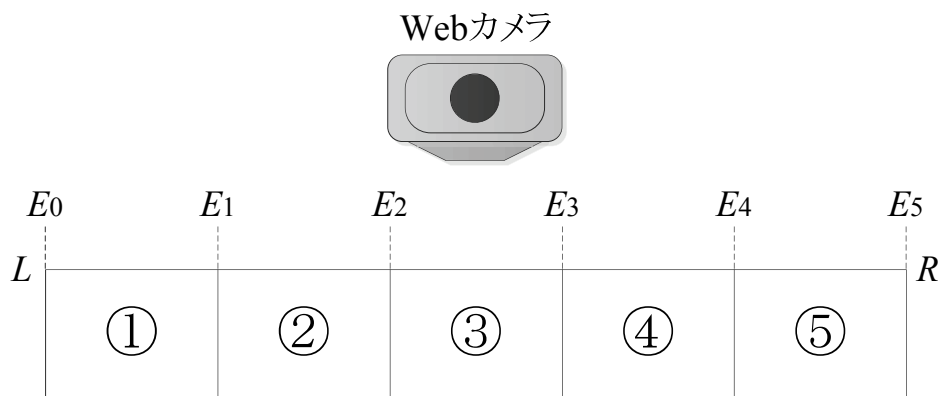


図 4.4 Plate 閾値

#### 4.2.4 食物判別

視線ベクトル水平移動量から注視している食物の Plate を推定する手法について述べる。

本ロボットの Plate は、図 2.3 のように 5 つの区画に分かれており、全幅は 185 mm であり、各 Plate 幅は 37 mm となっている。そのため、注視している Plate を判別する際に、一定の間隔の閾値を定めて視線ベクトル水平移動量により判別を行う。図 4.4 に示すように、Plate の中心上部に Web カメラを設置する。ここで、キャリブレーションとして Plate 左端を向いた際の水平移動量および Plate

右端を向いた際の水平移動量を取得する。各移動量を  $L$  [pixel] と  $R$  [pixel] とし、 $E_n$  ( $n = 0, 1, \dots, 5$ ) は次式で定義する。

$$E_n = L + \frac{R-L}{5} \times n \quad (4-3)$$

得られた水平移動量を  $D$  とすると、それぞれの Plate に対する移動量の範囲は次のように表される。

$$\begin{aligned} E_0 &\leq D \leq E_1 && : \text{Plate①} \\ E_1 &< D \leq E_2 && : \text{Plate②} \\ E_2 &< D \leq E_3 && : \text{Plate③} \\ E_3 &< D \leq E_4 && : \text{Plate④} \\ E_4 &< D \leq E_5 && : \text{Plate⑤} \end{aligned} \quad (4-4)$$

実際に Plate を選択する際は、約 3 秒間上記で求めた閾値の範囲を注視することで選択の決定を行い、ロボットへ命令を送信する。そして選択した食物をロボットが自動で供給する。

## 4.3 実機評価実験

### 4.3.1 実験方法

開発したインターフェースについて、注視している Plate の判別が正しく行われているか、各 Plate に対する認識率の計測を行った。被験者は成人男性 5 人とした。被験者 A, B, C が眼鏡装着者、被験者 D, E は裸眼である。実験条件として、Web カメラが使用者の正面にくるように本ロボットを設置し、被験者から Web カメラまでの距離は 300 mm である。被験者が Plate①から Plate⑤まで各 10 回の選択を行い、提案インターフェースにより被験者が注視している Plate を

認識する。被験者が選択した Plate を認識できたならば成功，異なる場合または選択されない場合は失敗として認識率を計測した。

### 4.3.2 実験結果

実験結果を表 4.1 に示す。一部で誤認識が見られ，100 %の認識率は得られなかった。以下，考察する。

### 4.3.3 考察

本実験は頭を固定せずに行っているため，カメラからの距離を 300 mm としているが，厳密には距離や水平位置が変化する。しかし，この影響は誤差程度であり，距離等の影響はないものと考えられる。次に，同じ方向に視線を向けたとしても，顔の向きに依存して視線ベクトルが変化する。しかしこの場合，中心よりも遠くにある Plate ①および Plate ⑤への認識率が低下する。そのため，顔の向きによる影響も考えられない。ここで，被験者に注目すると，被験者 B および C で失敗の頻度が高い。被験者 B, C は眼鏡を装着しており，照明が眼鏡のレンズに反射して認識率が低下したと考えられる。照明の反射により黒目

表 4.1 各 Plate への認識率

被験者		認識率 [%]					
		Plate①	Plate②	Plate③	Plate④	Plate⑤	総計
裸眼	A	100	100	100	100	100	100
	B	100	100	100	80	100	96
	C	100	100	100	100	100	100
眼鏡	D	100	80	100	80	100	92
	E	100	80	80	90	100	90

の一部が白目と判断され、視線方向を表す視線ベクトルに誤差が生じ、誤認識の原因となった。これは瞬きインターフェースの際の実験（3.5 節）と同様の環境であったため、一般家庭や施設では十分に認識できると考える。

## 第5章 結言

我国において、介護を必要とする障害者の人口は年々増加している。そのなかで食事介助が必要な重度上肢障害者に対して、食事支援ロボットの開発が行われている。その代表例として、セコム社のマイスプーンがよく知られている。しかしマイスプーンには次のような欠点が挙げられる。多関節構造であるため1軸で発生した振動が他の軸にも影響を及ぼし、食物が供給中に落下しやすい。タッチパネルやジョイスティック等、本来手で操作するインターフェースを用いているため上肢障害者にはその操作が困難である。アームの可動域が広く暴走した際には喉を突く恐れがある。掬い難い（転がり易い）、掴み難い（滑り易い、崩れ易い）食物には対応していない。

本研究ではこれらの欠点に対して次のようなロボットを提案した。それぞれの軸が独立して駆動する直交座標型ロボットとすることで振動を抑制し食物を落下し難い構造としている。食物を押し出して供給することですべての固形食物で供給が可能である。構造的にエンドエフェクタ（スプーン）が使用者まで届かないため、暴走したとしても構造的に安全である。操作には、目の機能（瞬きまたは注視）を活用することで上肢障害者が操作しやすい。

また通常、提案ロボットのアクチュエータには直流モータを用いているが、超音波モータを用いたロボットの開発も行った。ペースメーカー装着者や妊婦（特に胎児）に対して安全であり、安心して使用できる食事支援ロボットである。加えて、超音波モータの制御手法についての提案も行った。

提案ロボットの操作には、約1秒間の意識的な瞬きにより食物選択を行う瞬き操作インターフェースおよび、約3秒間の注視により食物選択を行う視線操作インターフェースを用いる。これらの操作インターフェースについて認識率を測定する実験を行った。その結果、高い認識率が得られており、本ロボット



の操作に十分に有効であることを示した。これらのインターフェースにより目で操作することができるため、上肢障害者が簡便に使用できる。

ここで、瞬き操作インターフェースの場合、所望する食物のLEDが点灯するまで待つ必要がある。一方で、視線操作インターフェースでは、注視により選択できるため待つ必要がなく、より直観的に選択できるため操作性がよいと考える。注視の場合は高齢者や知的障害者には眼精疲労を感じやすい可能性もあり、そのため、使用者の状態に合わせてどのインターフェースを用いるかを定めることが望ましい。

本稿にて提案したロボットにより、従来ロボットに対してより多くの食物を供給可能にした。しかし、おかゆのように流動性のあるものや液体には対応していないため全種類の食物を供給可能とするロボットの考案が課題となる。また、より実用性を考慮し介助者への負担軽減を行うため、自動で配膳や片付けを行う機能の搭載や、小型・軽量化した食事支援ロボットの提案も今後の課題としたい。

これまで重度の上肢障害者を対象として食事支援ロボットの研究開発を行ってきた。高齢化が進行している日本では、障害者ばかりでなく、高齢者介護を支援するシステムに需要が高まると考えられる。そこで今後、提案ロボットを高齢者に対して適応することを検討していきたい。高齢者に適応するにあたり、介護者が目を離している間に、誤嚥、転倒、徘徊等の問題が挙げられる。このため最近では、高齢者が食事をしている際にその安全を管理するシステムの提案も行っている[60][61][62]。今後は高齢者にも注目し、本ロボットを安全に使用するための管理システムにも力を入れようとする。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省：平成 18 年身体障害児・者実態調査結果
- [2] 厚生労働省：平成 23 年生活のしづらさなどに関する調査（全国在宅障害児・者等実態調査）
- [3] 厚生労働省：身体障害者福祉法施行規則
- [4] 矢野賢一，大原瑛一，堀 畑聡，青木隆明，西 本裕：「適応フィルタを用いた振戦抑制制御システムの開発と食事支援ロボットへの応用」，計測自動制御学会論文集，Vol.45，No.12，pp.638-645 (2009)
- [5] 平松翔太，西脇健二，矢野賢一：「振戦抑制を考慮した食事支援ロボット MARo の制御」，日本機械学会 福祉工学シンポジウム講演論文集 2009，pp.153-154 (2009)
- [6] 平松翔太，竹内聡，矢野賢一：「頭部姿勢情報に基づく食事支援ロボットのスプーン位置決め制御」，日本機械学会生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集，pp.134-135 (2010)
- [7] 長谷川泰久，大浦沙織，山海嘉之：「筋力低下患者への食事支援システムの開発」，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010，pp."1P1-G06(1)"-"1P1-G06(4)" (2010)
- [8] 上原英之，比嘉広樹，祖堅敬，波平宜敬：「肢体不自由者向けの携帯型食事支援ロボットアームの試作」，電気学会論文誌.C，Vol.131，No.10，pp.1752-1759 (2011)
- [9] 木野仁，小田敏晴，河島英人，山下清一：「郎柔軟ホース・ワイヤ駆動システムを用いた食事支援ロボット」，日本機械学会福祉工学シンポジウム 2004 講演論文集，pp.241-243 (2004)

- [10]山崎明, 福嶋政徳, 増田良介 : 「箸を用いた食事支援ロボットの試作と食べ物の把持制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.9, pp.917-923 (2012)
- [11]新井康平, Mardiyanto Ronny : 「視線入力に基づくロボットアーム制御および摂食支援システム」, 電気学会論文誌.C, Vol.132, No.3, pp.416-423 (2012)
- [12]澤谷知輝, 中村尚彦, 浜克己 : 「箸型食事支援ロボットの食品把持力提示部の改良」, 函館高等専門学校紀要, Vol.48, pp.7-12 (2013)
- [13]M. Topping and J. Smith : “The Development of Handy1, a Robotic System to Assist the Severely Disabled”, Sixth International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.244-249 (1999)
- [14]M. Topping : “Handy1, A Robotic Aid to Independence for Severely Disabled People”, Integration of Assistive Technology in the Information Age, pp.142-147 (2001)
- [15]M. Topping : “An Overview of the Development of Handy1”, a Rehabilitation Robot to Assist the Severely Disabled. Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.34, pp.253-263 (2002)
- [16]GertWillem R. B. E. Romer, Harry J. A. Stuyt and Alber Peters : “Cost-Savings and Economic Benefits due to the Assistive Robotic Manipulator (ARM)”, Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.201-204 (2005)
- [17]J. Sijs, F. Liefhebber and G. Romer : “Combined Position & Force Control for a robotic manipulator”, IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.106-111 (2007)
- [18]石井純夫 : 「四肢障害者のための食事支援ロボット」, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp.306-308 (1998)

- [19]石井純夫:「食事支援ロボット「マイスプーン」」, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.4, pp.44-47 (2003)
- [20]深瀬東:「サービスロボットの安全化事例③—食事支援ロボット「マイスプーン」—」, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.1165-1167 (2008)
- [21]福田修, 辻村好司, 辻敏夫, 大塚彰:「EMG 信号を利用した食事支援マニピュレータの制御」, 日本医療機器学会, Vol.74, No.5, pp.229-237 (2004)
- [22]富本悠公, 田中幹也, 桐原正敬, 中島翔太, 春山和男:「目で操作する上肢障害者用食事支援ロボット」, ライフサポート学会, Vol.27, No.4, pp.132-137 (2015)
- [23]Hiromasa Tomimoto, Masataka Kirihara, Shenglin Mu, Shota Nakashima, Kanya Tanaka and Kazuo Haruyama: “Meal Assistance Robot with Blink Operation Interface”, Proceedings of the 4th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2016, pp.297-302, B-Con Plaza, Oita, Japan (2016)
- [24]Hiromasa Tomimoto, Shenglin Mu, Kanya Tanaka, Shota Nakashima and Kazuo Haruyama: “Meal Assistance Robot Operated by Detecting Voluntary Closing Eye”, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, Vol.4, No.3, pp.106-111 (2016)
- [25]総務省:「各種電波利用機器の電波が植込み型医療機器等へ及ぼす影響を防止するための指針」 (2015)
- [26]文部科学省:「生活環境中電磁界による小児の健康リスク評価に関する研究」 (2003)
- [27]坂部貢, 宮田幹夫, 羽根邦夫:「生体と電磁波」, 丸善出版 (2012)
- [28]中川洋介, 斎藤彰, 前野隆司:「進行波型超音波モータの非線形動特性解析」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.73, No.727, pp.60-67 (2007)

- [29]川村貞夫：「制御用アクチュエータの基礎」，コロナ社 (2006)
- [30]Shenglin Mu, Kanya Tanaka, Shota Nakashima, Hiromasa Tomimoto and Shingo Aramaki : “Intelligent Control of USM using a Modified NN with PSO”, 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics, pp.507-510 (2015)
- [31]M. Clerc and J. Kennedy, The Particle Swarm : “Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space”, IEEE Trans. Evolutionary Computation, vol.6, No. 1, pp.58-73 (2002)
- [32]才木常正, 瀧澤由佳子：「安全のための瞬き検出」，エレクトロニクス実装学会誌, Vol .10 No.6, pp.448-452 (2007)
- [33]杉山暁, 宮脇一男：「EOG 装置および居眠り警報装置」, 人間工学 Vol.5, No.2, pp.113-118 (1968)
- [34]田多英興, 山田富美雄, 福田恭介 編著：「まばたきの心理学：瞬目行動の研究を総括する」, 北人路書房 (1991)
- [35]吉岡英明, 宮田洋, 大須賀美恵子：「まばたき波形を利用した傾眠防止：I. 磁気センサ法 (MAG 法) による波形計測」, 人間工学, Vol.19, pp.182-183 (1983)
- [36]M.Takagi, M.Katoh, K.Mohriand, S.Yoshino : “Magnet Displacement Sensor Using MI Elements for Eyelid Movement Sensing”, IEEE Trans. Magn., Vol.29, No.6, pp.3340-3342 (1993)
- [37]宇津木成介：「認知活動と瞬目—赤外線 LED メガネの試作と検討—」, 日本心理学会第 53 回発表論文集, pp.483 (1989)
- [38]田中大嗣, 林昭博：「光ファイバ瞬きセンサの検出特性」, 研究紀要 Vol.42, pp.41-46 (2004)
- [39]宇都弘泰, 林昭博：「光ファイバを用いた瞬き測定」, 研究紀要 Vol.46, pp.63-68 (2008)

- [40]宮川智文, 坂井孝光, 中村清実:「リアルタイム目追跡システムを用いた居眠り警報のための瞬き検出装置の開発」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, No.81, pp.41-45 (2003)
- [41]柘植夕起子, 高野博史, 黒川正博, 中村清実:「リアルタイム目追跡の非接触型入力装置への応用」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.758, pp.149-154 (2005)
- [42]加藤秀太, 高野博史, 中村清実:「黒目面積を用いた瞬き検出における自動閾値決定法」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No.63, pp.1-6 (2012)
- [43]浅野誠之, 高野博史, 中村清実:「パーティクルフィルタとエッジ方向特徴量を用いた顔の向きに頑健な目検出法」, 画像の認識・理解シンポジウム論文集 2011, pp.1119-1125 (2011)
- [44]阿部恒介, 董建, 早川吉彦:「瞬き波形を検出するための画像処理による VDT 作業時における瞬き回数の計測」, Medical Imaging Technology, Vol.30, No.2, pp.65-72 (2012)
- [45]中野倫明, 杉山和彦, 水野守倫, 山本新:「居眠り検知のためのまばたき検出と覚醒度推定」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.95, No.44, pp.73-80 (1995)
- [46]中野倫明, 杉山和彦, 水野守倫, 山本新:「画像による瞬目計測と居眠り検知への応用」, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.12, pp.1949-1956 (1996)
- [47]足立和正, 濱田尊雄, 中野倫明, 山本新:「ドライバの意識低下検知のための動画像処理によるまばたき計測」, 電気学会論文誌.E, Vol.124, No.3, pp.1752-1759 (2004)
- [48]加納尚之, 井上倫夫, 小林康浩, 中島健二:「コミュニケーションエイドのための「まばたき」の検出方法」, 電子情報通信学会論文誌.A, Vol.81, No.10,

pp.1453-1462 (1998)

- [49]古川勇樹, 苜米地宣裕 : 「まばたきによるコミュニケーション」, 八戸工業大学紀要, Vol.28, pp.61-70 (2009)
- [50]Paul Viola and Michael Jones : “Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features”, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-9 (2001)
- [51]奥富正敬編集 : 「デジタル画像処理」, 公益財団法人画像情報教育振興協会 (2014)
- [52]B. Tursky : “Recording of Human Eye Movements, In Bioelectric Recording Techniques Part C”, Academic Press, New York (1974)
- [53]D.A. Robinson : “A method of measuring eye movements using a search coil in a magnetic field”, IEEE Transactions in Biomedical Engineering, Vol.10, pp.137-145, (1963)
- [54]T.N. Cornsweet and H.D. Crane : “Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkin jeimages” , journalOpt.Soc.Am., Vol.62, No.8, pp.921-928 (1973)
- [55]T.Ohno, N.Mukawa and A.Yoshikawa : “FreeGaze: A Gaze Tracking System for Everyday Gaze Interaction”, Proceedings of the symposium on ETRA 2002, pp.125-132 (2002)
- [56]大野健彦 : 「視線を用いたインターフェース」, 情報処理, Vol.44, No.7, pp.726-732 (2003)
- [57]藪内勉, 宮本孝典, 山本哲也, 片渕典史, 中山丈二, 下倉健一郎 : 「FreeGaze を用いた視線追跡における自動キャリブレーション」, 電子情報通信学会技術研究報告ヒューマン情報処理, Vol.104, No.168, pp.75-80 (2004)

- [58] 齋藤宣俊, 高橋淳, 岩村武英, 大木真, 橋口住久: 「視線方向の検出—強膜結像利用の効果—」, 山梨大學工學部研究報告 Vol.42, pp.13-15 (1991)
- [59] 特許 WO2010035472 A1, パナソニック株式会社: 「視線方向判定装置及び視線方向判定方法」 (2010)
- [60] 富本悠公, 田中幹也, 中島翔太, 穆盛林, 春山和男, 中村浩士: 「食事支援ロボットの安全管理システムの研究」, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2016, pp.333-334 (2016)
- [61] Muhammad Khairul Nizar Khairuddin, Hiromasa Tomimoto, Kazuhiro Nakamoto, Shenglin Mu, Shota Nakashima, Hiroshi Nakamura and Kanya Tanaka, “Danger Conditions Detection by Using Acceleration Sensor in Smartphone”, Proceedings of the 4th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2016, pp.85-89 (2016)
- [62] Muhammad Khairul Nizar Khairuddin, 富本悠公, 中本和宏, 穆盛林, 中島翔太, 中村 浩士, 田中 幹也: 「スマートフォンを用いた危険状態検出システム」, 産業応用工学会全国大会 2016, pp.32-33 (2016)



## 謝辞

本論文は筆者が山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。同研究科 情報・デザイン工学系学域 田中 幹也 教授には指導教官として本研究の遂行にあたり多大なご指導とご鞭撻を戴きました。ここに深謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり貴重なご意見を賜りました、大林 正直 教授、江 鐘偉 教授、南 和幸 教授、中島 翔太 講師には深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、制御工学研究室の学生諸君には実験等に協力いただきました。宇部工業高等専門学校 電気工学科 春山 和男 教授、日高 良和 教授には筆者が同高専在籍時よりご指導を賜り、山口大学入学後も大学生活において多々相談に乗っていただきました。ここに感謝の意を表します。