

2023 年度 卒業論文



情報エントロピーを用いた知識選択型転移強化学習 のハイパーパラメータ探査と評価方法の開発

Hyperparameter Exploration and Evaluation Methods for
Knowledge-Selective Transitional Reinforcement Learning Using
Information Entropy

指導教員 准教授 河野 仁

東京電機大学 工学部 情報通信学科

学籍番号 20EC070

高矢 空

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	2
1.1.1	おことわり	2
1.1.2	はじめに	2
1.1.3	卒業論文の考え方	2
1.2	学位論文の意義	3
1.3	全体的な留意事項	3
1.4	本研究の目的	4
1.5	本論文における研究 3 要素	5
1.5.1	研究の学術性	5
1.5.2	研究の新規性	5
1.5.3	研究の有用性	5
1.6	本論文の構成	6
第 2 章	本研究のアプローチ	7
2.1	はじめに	8
2.2	目標ページ数	9
2.3	章構成	9
2.3.1	研究背景	9
2.4	強化学習を用いたロボットの行動獲得に関する既存研究	10
2.5	おわりに	11
第 3 章	提案手法名をここに書く	13
3.1	はじめに	14
3.2	言葉遣い	15
3.3	強化学習の構成	16

3.3.1	Q 学習.....	16
3.4	おわりに	16
第 4 章	シミュレータ実験	17
4.1	はじめに	18
4.2	実験環境	19
4.3	単腕クローラロボット	20
4.3.1	実験条件	20
4.4	おわりに	21
第 5 章	結論	23
5.1	結論	24
5.2	今後の展望.....	25
謝辞		29
参考文献		31
研究業績		36

目次

1.1	The structure of this thesis	6
4.1	Single-armed and double-armed crawler robot	19
4.2	Flat surface in Choreonoid 1.5	19

表目次

2.1	Expectation of fire departments to robotic systems [田所 2012]	11
-----	--	----

第 1 章

序論

Contents

1.1	背景	2
	1.1.1 おことわり	2
	1.1.2 はじめに	2
	1.1.3 卒業論文の考え方	2
1.2	学位論文の意義	3
1.3	全体的な留意事項	3
1.4	本研究の目的	4
1.5	本論文における研究 3 要素	5
	1.5.1 研究の学術性	5
	1.5.2 研究の新規性	5
	1.5.3 研究の有用性	5
1.6	本論文の構成	6

1.1 背景

1.1.1 おことわり

本テンプレートは、東京工芸大学の河野研の卒業論文に使用される。章立ての時に混乱しないよう、本テンプレートの章タイトルは実際の卒業論文に使用されるようなタイトルと順序が守られている。しかし、章以下の節や項に関しては、卒業論文虎の巻からの抜粋の内容であるため、かならずしも章タイトルと節タイトルや項タイトルが関連、一致するわけではない。

まず、第1章では卒業研究全体に関する考え方や注意事項等を記述していく。本文中の細かいマナー等は2章から述べていくこととする。

1.1.2 はじめに

学位論文は、研究活動を締めくくる最後の論文執筆活動である。また、学会に投稿する論文と異なり、ページ数に制限が無い。そのため、卒業論文に限らず学位論文は研究室の財産として、後輩たちへの研究情報の伝達手段として、確実かつ正確に執筆される必要がある。学生諸君は、以下に記されている考え方を熟読し、学位論文の執筆に取り組むこと。

1.1.3 卒業論文の考え方

卒業論文は、卒業研究1年間を締めくくる最も重要で尊く最後の執筆活動である。卒業論文は1年間という短い間の研究活動をまとめるため、必然的に修士論文や博士論文と比べてボリュームが少なくなる。しかし、丁寧に提案システムや実験結果を説明し、なるべくわかりやすく図を大きく掲載するように努力すれば、必ずやページ数は増えるはずである。また、卒業研究は研究活動するだけで終了ではなく、卒業論文という後世に伝わる形式にまとめてこそ終了となる。学部4年生諸君は、心して最後の作業を行い、集中して決して手を抜かず卒業研究執筆に取り組むこと。

1.2 学位論文の意義

一般的に、学士や修士の学位論文は大学や研究室に提出しても、世の中には存在しない研究・論文としてみなされることに注意が必要である。これは、他の大学関係者や研究者は、他大学の卒業論文や修士論文を閲覧できないからである。また、日本の学位論文は日本語で執筆されることが多いため、海外の研究者はもちろん読めない。そのことから、学会の論文や発表に引用されるべき論文は、学会誌の論文や学会発表の論文のみである。しかし、博士論文は別である。博士論文は、博士号が授与されると、授与された者の論文が国立国会図書館に保管されるからである。国立国会図書館の文献は、誰でも閲覧が可能である。

卒業研究や卒業論文は一般的に社会で役に立たないと言われている。たしかに、研究内容は基礎的なものも多く、ビジネスに接続しにくいことを考えると役には立たない。しかし、卒業研究を行い卒業論文としてまとめるプロセスは、会社での仕事や自分の仕事を文章としてまとめ発信する力になる。一般的に理系は卒業研究や卒業論文を必須とされているため、そこで鍛えられたスキルは社会では迎合される。なぜならば、現在の工学的な仕事を確立してきた人たちは、まだ大学に入学することが困難だった時代に、大学を卒業し学位を取得した者が確立した業界であることが多いためである。

1.3 全体的な留意事項

卒業論文執筆活動全体での注意すべき事柄、心がけてほしいことを以下に述べる。研究分野によっては必ずしもマッチする者ではないが、少なくとも河野研では心掛けるようにする。

- 主観的な表現は絶対に避ける
- 客観的な表現でデータや結果を表現する
- 研究の重要性、存在意義を読者に納得させれば勝ちである
- 冗長、回りくどい表現は避ける
- 参考文献はたくさん引用する
- 従来研究・関連研究が存在しない研究は無い？

細かい解説は2章からの説明に譲るが、基本的には上記の項目を最重要事項として意識し、卒業論文の執筆に挑んでほしい。

1.4 本研究の目的

研究の目的は、はっきりと書かなくてははいけません。これまでのイントロダクションをまとめ、何を課題として、何が未解決問題で、どのようなアプローチなら問題が解決可能なのか、ダイジェストをここに書かなくてはならない。そして、1行で研究の目的を表現するために、以下の枠を使用して目的を書く。

ここに研究の目的を端的かつ的確にまとめ、ここに示す
最大でも2行にまとめること。

次の節には「本論文における研究3要素」を記す。これは、漠然と必死にチャレンジしてきた研究の内容を考え直し、クリアにするフレームワークである。平成30年度から施行してきた、当研究室オリジナルの卒論の内容である。次節に示す3要素を意識することで、自分の研究を見直し、自分の行ってきた研究を明らかにすることが目的である。

ここで注意が必要なのは、研究と言うのは必ずしも3要素で表現しきれないということである。それぞれオーバーラップする要素もある。また、学術性や新規性、有用性以外にも可用性や信頼性などがあり、分野や教員によって重要視するものは異なる。また、次頁に書かれた書く3要素の文例は、あくまでも例であるため、そのまま用いないこと。

1.5 本論文における研究 3 要素

1.5.1 研究の学術性

本研究の学術性は、xxxxxxxxx を提案し、これまでの理論を統一的に記述できるところにある。とりわけ、○○○○に関してはこれまでに提案されていない全く新しい理論であり、またその理論に証明を与えた点に学術性がある。

1.5.2 研究の新規性

本研究の新規性は、これまで実現できなかった○○○○○○○○○○を解決するために、
- - - - - を提案した所にある。また、提案手法の 1 つである xxxxxx は、誰も提案していない全く新しい概念である。

1.5.3 研究の有用性

本研究の有用性は、応用として災害時の情報収集の実現を目指しているところにある。本研究の目的が達成されれば、迅速な災害現場で情報収取が可能となり、減災や 2 次災害の低減に貢献が可能である。

1.6 本論文の構成

本論文の構成について Fig. 1.1 に示す．本論文は全 5 章から構成されている．第 1 章では，本研究の背景と目的について述べた．

第 2 章では，第 1 章の内容を踏まえて本研究のアプローチについて述べる．各章の説明はダイジェストとすべきである．第 3 章では，第 2 章で述べた本研究における強化学習の構成について詳細に述べる．第 4 章では，提案手法の有効性を検証するために行ったシミュレータ実験の内容とその結果について述べる．第 5 章では，本論文の結論と今後の展望について述べる．

以下の図は，本論文の順序を表しているが余力があったら描くとよい．最悪，書かなくても良い．ちなみに，図は第 1 章の場合 chap1 フォルダ内の chap1_fig フォルダ以下に配置し，引用すること．すなわち必然的に，第 2 章では chap2 の下の chap2_fig となる．現状では pdf を読み込んでいるようだが，jpg や png も読み込み可能．個人的には png もしくは eps を推奨．

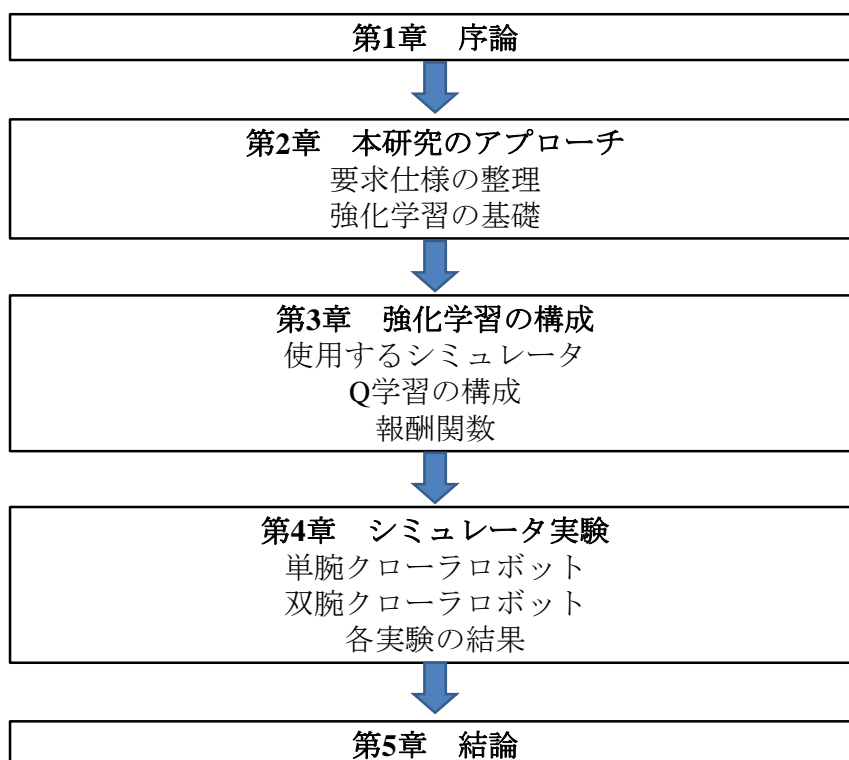


Fig. 1.1: The structure of this thesis

第 2 章

本研究のアプローチ

Contents

2.1	はじめに	8
2.2	目標ページ数	9
2.3	章構成	9
	2.3.1 研究背景	9
2.4	強化学習を用いたロボットの行動獲得に関する既存研究	10
2.5	おわりに	11

2.1 はじめに

第2章からは、最初のセクションとして「はじめに」をいれる。すなわち、各章の最後のセクションは「おわりに」である。このイントロ的な部分では、本章のあらましを以下のように端的に表現する。

2.2節では、第1章を踏まえて、リカバリモーションを獲得する手法の要求仕様を整理する。2.3節では、リカバリモーション獲得の方針について述べる。2.4節では、強化学習を用いたロボットの行動獲得についての関連研究について述べる。最後に2.5節で本章のまとめを述べる。

2.2 目標ページ数

当研究室における目標ページ数は（片面）50 ページ以上とする．ページ数に表紙や参考文献，付録等をカウントしてよい．これは，簡易製本の関係もあり，あまり薄いと製本できない．もちろん卒研発表会の時に「薄いね」といわれるのと，

2.3 章構成

卒業論文は，一般的には下記のような章構成で作成する．もちろん，研究内容やボリュームによりけりで構成は変更するので，下記を参考に，適切な章構成とすること．

1. 研究背景（最後から1個前の節に研究目的，最後に章構成）
2. 関連研究
3. 提案手法 or 提案システム
4. 実験
5. まとめ
6. 参考文献
7. 謝辞
8. 研究業績
9. 付録

2.3.1 研究背景

2.4 強化学習を用いたロボットの行動獲得に関する既存研究

強化学習はロボットなどの学習の主体が自律的に行動を獲得するために用いる手法であり、多くの研究がなされている [Kober 2013]. 最近では、強化学習と深層学習を組み合わせた手法により、Atari2600 というビデオゲームに対して非常に良い結果を得ており、強化学習は幅広く活用されている [Mnih 2013].

ロボットの移動モーションの獲得にもよく強化学習が用いられる. 関連研究として六脚ロボットにおける強化学習を用いた故障時の移動法獲得 [新堀 2009] や強化学習と CPG (Central Pattern Generator) を用いた多脚ロボットの歩行動作獲得の研究 [石倉 2016] が挙げられる. 以上の文献からもロボットの行動獲得に強化学習が有用であることがわかる. 本節では、以上のロボットの行動獲得について詳しく述べる.

2.5 おわりに

本章では，提案するリカバリモーション獲得のための手法の全体像を述べた．

2.2 節では，第 1 章を踏まえて，必要なシステムについて整理した．

2.3 節では，それぞれについて強化学習を用いたリカバリモーション獲得をシミュレータ上で行うことを述べた．

2.4 節では，強化学習を用いたロボットの行動獲得に関する関連研究について述べた．

??節では，本研究のアプローチを述べ，強化学習を用いた既存研究との関連性について述べた．

??節では，強化学習の基礎的な内容について述べた．強化学習は報酬の設計と価値関数の更新アルゴリズムが重要になることを述べた．

次章では，強化学習を用いたリカバリモーション獲得について詳細に述べる．

引用文献は，左のコマンドのように書くと引用が表示される [防衛省 自衛隊 2016]．

Table 2.1: Expectation of fire departments to robotic systems [田所 2012]

災害と必要な機能	期待割合 (%)
CBRN 災害	
センサによる CBRN 物質の特定	80
安全な場所への被災者の搬送	61
CBRN 物質の除去	49
火災	
ビル内の消火	61
ビル内での探索	51
輻射熱にかかわらず消火	49
地震災害	
瓦礫の上からの搜索	53
瓦礫の中での搜索	45
重量瓦礫の除去	43
水害	
要救助者の搜索	55
水の中からの救助	49

第 3 章

提案手法名をここに書く

Contents

3.1	はじめに	14
3.2	言葉遣い	15
3.3	強化学習の構成	16
	3.3.1 Q 学習	16
3.4	おわりに	16

3.1 はじめに

ここでは，論文を執筆するにあたり，マナーやルールを書いていく．

3.2 言葉遣い

基本的には「です・ます」調でかく。レポートと基本的には同様に、「です・ます」調で書くと思われる。

また、文学的な表現は避け、読者諸君とか吾輩はとか某は拙者は、とか書いてはいけない。

3.3 強化学習の構成

??節で述べたように、強化学習は、ロボットが試行錯誤を繰り返し、最適な行動を学習していく枠組みである [Sutton 1998][木村 1999]. ロボットが確率的にある行動をとったときに、目的に合った行動をとると、報酬というスカラ量を得る. 学習を進めることで、ロボットは報酬を最大化する行動をとるようになる. つまり強化学習を用いることにより、ロボットの目標に応じた報酬を与えることで環境に適応した動作を学習することができる. 本研究では強化学習の中でも多くの研究で用いられている Q 学習を用いる.

3.3.1 Q 学習

Q 学習は初期状態から終端状態に至るまでの1エピソードの間に行動選択、価値関数の更新を繰り返し行う強化学習である. Q 学習では使われている方策とは独立に、行動価値関数 Q を直接更新する.

3.4 おわりに

本章では、リカバリモーション獲得の詳細について述べた.

3.2 節では、本研究で用いるシミュレータ内のロボットコントローラと強化学習器の関係について述べた.

3.3 節では、本研究で用いる強化学習のうち Q 学習について述べた. また、 Q 値に関して RBF ネットワークによる近似を行うことを述べた.

??節では、強化学習内で用いる報酬関数について述べた. 本研究で用いる報酬関数として移動ベクトルの報酬、目標到達の報酬を設定し、学習の促進を図る. また、ロボットの移動中の安定性を評価するために、報酬関数に NE 安定余裕の報酬を設定した.

次章では、動力学シミュレータを用いた実験を行う.

第 4 章

シミュレータ実験

Contents

4.1	はじめに	18
4.2	実験環境	19
4.3	単腕クローラロボット	20
	4.3.1 実験条件	20
4.4	おわりに	21

4.1 はじめに

本章では、提案したアプローチの有用性を示すために行った、動力学シミュレータ実験について述べる。

4.2 節では、本研究で用いるロボットとシミュレータ環境について述べる。

4.3 節では、単腕クローラロボットによる直進と旋回のリカバリモーション獲得の実験について述べる。

??節では、手法が他のアーム搭載ロボットにも適用可能かを検証するために、双腕クローラロボットによるリカバリモーション獲得の実験について述べる。

最後に 4.4 節で本章のまとめを述べる。

4.2 実験環境

本研究で用いるロボットは Fig. 4.1(a) と Fig. 4.1(b) に示す単腕クローラロボットと双腕クローラロボットである。単腕クローラロボットはアーム 1 本を搭載したクローラ型ロボットである。双腕クローラロボットはアーム 2 本を搭載したクローラ型ロボットである。ロボットから見て左のクローラの故障を想定する。Fig. 4.2 に示すようにロボットの移動は平らな水平面で行われ、周りに障害物はないものとする。単腕クローラロボットに関しては、直進、旋回のリカバリモーションを獲得する。双腕クローラロボットに関しては、直進のリカバリモーションを獲得する。

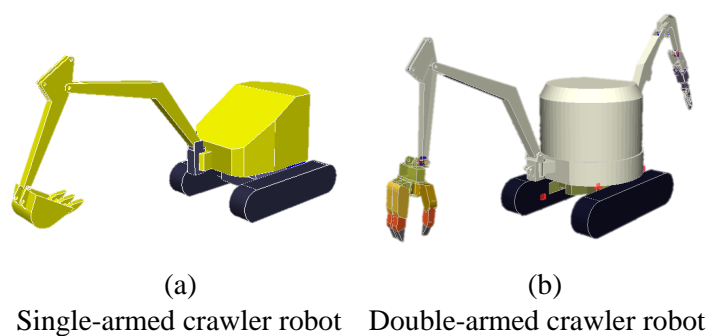


Fig. 4.1: Single-armed and double-armed crawler robot

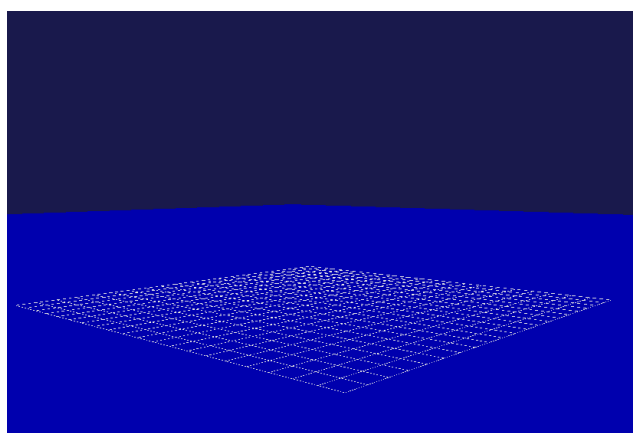


Fig. 4.2: Flat surface in Choreonoid 1.5

4.3 単腕クローラロボット

4.3.1 実験条件

単腕クローラロボットの制御対象を Fig. ?? と Table ?? に示す．ロボットから見て左のクローラが故障により動かなくなった場合を想定する．ロボットの制御する機構はクローラ (Fig. ??①)，スイング (Fig. ??②)，ブーム (Fig. ??③)，アーム (Fig. ??④) の 4 種類である．状態 s_t として制御対象 4 種類と，ロボットのロールとピッチの値を加えた合計 6 種類の観測値を設定する．行動 a_t として制御対象 4 種類を設定する．以上から RBF ネットワーク近似の入力値としては合計 10 種類の入力値を扱う．

4.4 おわりに

本章では，強化学習を用いたリカバリモーションの獲得のアプローチについての有効性を検証するために行った動力学シミュレータ実験について述べた．

本実験で用いたクローラロボットとシミュレータの環境について述べた．

4.3 節では，本研究のアプローチを左クローラが故障している単腕クローラロボットの直進と旋回のリカバリモーションについて行い，直進，旋回のリカバリモーションの獲得が可能であることを示した．学習が進むことで無駄な動きが減り，目標の移動方向への移動が可能となった．また，得られた2つのリカバリモーションは安定性を保った移動方法であることを確認した．

??節では，双腕クローラロボットの直進のリカバリモーションについて行い，直進リカバリモーションの獲得が可能であり，単腕クローラロボット以外にも本手法が適用できることを示した．

第 5 章

結論

Contents

5.1	結論	24
5.2	今後の展望	25

5.1 結論

本研究ではアーム搭載クローラロボットにおける、故障時の移動方法であるリカバリモーションを獲得する枠組みを提案した。

第1章では、本研究の背景となる遠隔操作ロボットの故障時における問題点と、その解決方法として新たな移動方法であるリカバリモーション提案した。また、災害現場において活用する点、遠隔操作ロボットで用いる点、関連する研究を踏まえ、リカバリモーションに関する条件を述べ、本研究の目的を「安定性を考慮したクローラ故障時におけるアーム搭載ロボットのリカバリモーションの獲得」とした。

第2章では、第1章で述べた課題設定とリカバリモーションのアプローチをもとに必要な条件などを整理し、システムのコンセプトを述べた。また、本研究で必要となる強化学習の基礎知識について述べた。第3章では、強化学習の詳細な構成について、第2章で述べた必要な条件を踏まえて述べた。報酬関数として移動ベクトル、ゴール報酬に加え、NE 安定余裕に基づいたロボットの安定性の報酬を加えることを述べた。

第4章では、提案手法の有効性を確認するために動力学シミュレータによる実験を行った。本研究のアプローチを左クローラが故障している単腕クローラロボットの直進と旋回のリカバリモーションについて行い、直進、旋回のリカバリモーションの獲得が可能であることを示した。双腕クローラロボットの直進のリカバリモーションについても行い、直進リカバリモーションの獲得が可能であり、単腕クローラロボット以外にも本手法が適用できることを示した。また、得られたリカバリモーションは安定性を保った移動方法であることを確認した。実験結果から、本研究で設定した報酬設計を用いることで、強化学習によりクローラ故障時における安定性のあるリカバリモーションの獲得が可能であった。

以上から、本研究における提案手法の有効性が示された。

5.2 今後の展望

今後の展望としては、以下の3点が考えられる。

1. 学習アルゴリズムのパラメータチューニング.
2. 不整地面でのシミュレータ実験.
3. 得られた移動モーションの実機での確認.

今回行った実験では学習の収束に多くの時間がかかった。そこで学習アルゴリズムに関するパラメータチューニングが必要である。さらにロボットごと、状況毎に異なるパラメータが必要であると考えられるが、このパラメータについても最適化する枠組みが必要であると考えられる。

また、本研究は不整地で活躍する災害対応ロボットを想定している。本手法で用いた NE 安定余裕は不整地においても正しく安定性を評価できる概念である。そのため凹凸のある地面や斜面の環境に関して追加でシミュレータ実験を行う必要がある。またシミュレータ上ではアームの先端が地面で滑らないことも可能性として考えられるので、この条件に関してもシミュレータ実験を行う必要がある。以上の実験を重ねることでロボットの安定性を考慮したことのさらなる有効性が示される。

本研究では実機にて発揮すべきシステムである。そのため、最終的には得られたリカバリモーションが実機において実行可能かの検証が必要となる。本研究で得られたリカバリモーションはアームによってロボットを支える動作であった。そのためアームの可動範囲、ロボットごとのアームの耐久性を考慮する必要がある。また、実行不可能である場合、どのような改良・制約を加えれば実現可能なりカバリモーションが可能となるのか比較検討が必要となる。

謝辭

本論文を締めくくるにあたり、ご指導、ご協力をいただいた全ての方々に、深く感謝いたします。

本研究の指導教員である東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻准教授 山下 淳 先生には、有意義な研究の機会を与えていただくとともに、熱心なご指導を賜りました。研究論文や発表資料の添削をして下さっただけでなく、研究に関する様々な疑問に対して、いつも非常に納得できる説明や助言をして下さり、ものを考える力を鍛えて下さいました。この経験は非常に有意義で、今後の人生に大きく役立つと確信しています。ここに深く感謝いたします。

東京大学人工物工学研究センター教授 太田 順 先生には、本論文をご精読頂き、有益なご指摘・ご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻教授 浅間 一 先生には、ご多忙のなかご指導ご鞭撻を賜り、研究に対する考え方の多くを学ばせていただきました。学術的なレベルの高さだけでなく、論理の適切さ、研究に対する真摯さをご教授賜り、研究を進めていくにあたって非常に勉強になりました。ここに深く感謝いたします。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻特任准教授 田村 雄介 先生には研究論文・発表資料の添削や研究発表におけるご指導を賜りました。誠にありがとうございます。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻特任研究員 河野 仁 博士には直接指導を受け、さまざまな研究の知識やテクニックを教えていただきました。特に災害ロボット、学習という分野に関して大変お世話になりました。また、研究生活においても非常に親身にして下さり、非常に充実したものとなりました。誠にありがとうございます。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻特任助教 安 先生には、異なる研究分野であるからこそ、違った視点でのものの見方を学ぶことができました。誠にありがとうございます。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻特任助教 藤井 浩光 先生には、研究発表のご指導を賜っただけでなく、研究生活における様々な相談に乗っていただいたり、助けていただいたりしました。ここに心より感謝申し上げます。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻特別研究員 池 勇勳 博士には本論文の添削において有益なご指摘・ご助言を頂きました。また、グループミーティングでは的確なアドバイスをいただきました。誠にありがとうございます。

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻技術専門員 山川 博司 先生には研究生生活を送るうえで重要な身の回りの環境を整えてくださいました。誠にありがとうございます。

石川 雄己氏をはじめとする研究室の先輩方には、研究発表のご指導を賜っただけでなく、研究生生活における様々な相談に乗っていただきました。ここに深く感謝いたします。

同じ B グループとして研究を行った浅間・山下研究室の Woo Hanwool 氏, Miyagusuku Renato 氏, 陸 小軍氏, 田中 佑典氏, 金 渡演氏, 邵 宇陽氏, Mai Ngoc Trung 氏, 江 君氏, Seow Yip Loon 氏とは、日頃より研究に関して議論を交わし、研究を進めていくうえで、重要なヒントを得たり、諦めず継続して行うことを学んだり、有意義な時間を過ごさせていただきました。大変感謝いたします。

同輩である杉本 賢勇君, 吉田 和憲君, 奥村 有加里さんとは、研究に関して励ましあったり、刺激を受けあったりしただけでなく、研究室での生活全般に関して非常に有意義に過ごすことができました。心から感謝いたします。

秘書の成島 久恵さん, 小島 里佳さん, 中村 恵さん, 石田 万紀さん, 後藤田 彩さんには、研究活動を行う上で必要な事務手続きなどの業務を円滑に行っていただいたおかげで、集中して研究をこなすことができました。誠にありがとうございます。

最後に、私の大学での学びを経済的、精神的に支えてくれた家族、そして友人の方々に深く感謝いたします。本当にありがとうございました。

平成 29 年 2 月 伊藤翼

参考文献

<和文文献>

[浅間 2014]

浅間 一: “災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築,” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 1, pp. 37–41, 2014.

[田所 2012]

田所 諭: “災害対応ロボットのあるべき姿,” 建設の施工企画, vol. 753, pp. 23–31, 2012.

[田所 2014]

田所 諭: “防災ロボットについて我が国が取り組むべき中長期的課題,” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 2, pp. 154–161, 2014.

[久武 2011]

久武 経夫, 中里 邦子: “大災害に立ち向かうロボットの開発,” 建設の施工企画, vol. 740, pp. 42–47, 2011.

[江川 2014]

江川 栄治: “小型双腕住器型ロボット「ASTACO-SoRa」,” 日本機械学会誌, vol. 117, no. 1151, pp. 682–683, 2014.

[新堀 2009]

新堀 航太, 兵頭 和幸, 砂山 享祐, 三上 貞芳: “強化学習を用いたモジュール型多脚ロボットにおける適応的移動法獲得,” 情報処理学会論文誌, vol. 50, no. 3, pp. 1170–1180, 2009.

[石倉 2016]

石倉 裕貴, 岸本 良一, 堀内 匡: “CPG と強化学習を用いた多脚ロボットの目標到達行動の獲得,” 電気学会論文誌 C, vol. 136, no. 3, pp. 333–339, 2016.

[Sutton 1998]

R. S. Sutton, A. Gbarto (三上貞芳, 皆川雅章訳) : 強化学習, 森北出版, 2000.

[木村 1999]

木村 元, 宮崎 和光, 小林 重信: “強化学習システムの設計指針,” 計測と制御, vol. 38, no. 10, pp. 1–6, 1999.

[広瀬 1998]

広瀬 茂男, 塚越 秀行, 米田 完: “不整地における歩行機械の静的安定性評価基準,” 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 8, pp. 1076–1082, 1998.

[米田 1996]

米田 完, 広瀬 茂男: “歩行機械の転倒安定性,” 日本ロボット学会誌, vol. 14, no. 4, pp. 517–522, 1996.

[中岡 2013]

中岡 慎一郎: “拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid,” 日本ロボット学会誌, vol. 31, no. 3, pp. 12–17, 2013.

[中村 2016]

中村 晋也, 吉瀬 裕, 倉鋪 圭太, 谷本 貴頌, 近藤 大祐: “複合ロボットのための動力学シミュレータの開発,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’16 講演論文集, 2016.

[内閣府 2016]

内閣府: “平成 28 年版防災白書,” http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h28/honbun/3b_6s_10_00.html, 2016, 閲覧日 2016.12.15.

[気象庁 2016]

気象庁: “日本付近で発生した主な被害地震（平成 8 年以降）,” <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html#higai2016>, 2016, 閲覧日 2016.12.15.

[原木 2013]

原木俊彦, 大川一也, 加藤秀雄, 樋口静一: “軽微な故障を抱えた脚型ロボットにおけるゴール到達のための自律動作修正,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’13 講演論

文集, 2013.

[防衛省 自衛隊 2016]

防衛省・自衛隊: “平成 28 年熊本地震に係る災害派遣について（最終報）,” <http://www.mod.go.jp/j/press/news/2016/05/30b.html>, 2016, 閲覧日 2016.12.16.

[警察庁 2011]

警察庁: “平成 23 年版警察白書,” <https://www.npa.go.jp/hakusyo/h23/honbun/index.html>, 2011, 閲覧日 2016.12.16.

[東京電力 2016]

東京電力ホールディングス: “ロボット技術の活用,” <http://www.tepco.co.jp/decommision/principles/technology/robot/index-j.html>, 2016, 閲覧日 2017.1.4.

<英文文献>

[Matsuno 2004]

F. Matsuno and S. Tadokoro: “Rescue Robots and Systems in Japan,” *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 12–20, 2004.

[Murphy 2004]

R. R. Murphy: “Trial by Fire [Rescue Robots],” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 50–61, 2004.

[Carlson 2005]

J. Carlson and R. R. Murphy: “How UGVs Physically Fail in the Field,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 423–437, 2005.

[Messuri 1985]

D. A. Messuri and C. A. Klein: “Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle during Rough-terrain Locomotion,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 1, no. 3, pp. 132–141, 1985.

[Platt 1991]

J. Platt: “A Resource-Allocating Network for Function Interpolation,” *Neural Computation*, vol. 3, no. 2, pp. 213–225, 1991.

[Nagatani 2011]

K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi and Y. Hada: “Redesign of Rescue Mobile Robot Quince,” *Proceeding of 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, pp. 13–18, 2011.

[Kawatsuma 2012]

S. Kawatsuma, M. Fukushima and T. Okada: “Emergency Response by Robots to Fukushima-Daiichi Accident: Summary and Lessons Learned,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 39, no. 5, pp. 428–435, 2012.

[Kober 2013]

J. Kober, B. J. Andrew and Jan Peters: “Reinforcement Learning in Robotics: A survey,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 11, pp. 1238–1274, 2013.

[Haykin 2009]

S. Haykin: *Neural Networks and Learning Machines*, Pearson Upper Saddle River, 2009.

[Mnih 2013]

V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra and M. Riedmiller: “Playing Atari with Deep Reinforcement Learning,” *Proceedings of NIPS 2013 Deep Learning Workshop*, 2013.

研究業績

査読有り国内会議

1. 伊藤 翼, 河野 仁, 田村 雄介, 山下 淳, 浅間 一: “アーム搭載移動ロボットの駆動系故障時のための強化学習を用いたリカバリモーション獲得,” 第 22 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2017, 発表予定.

査読有り国際会議

1. **Tasuku Ito**, Hitoshi Kono, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama: “Recovery Motion Learning for Arm Mounted Mobile Crawler Robot in Drive System’s Failure,” *The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, 2017, 査読中.