

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科 情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏 名	玉田 貴寛	学籍番号	1450022
論 文 題 目	マニピュレータによる斜め包みに関する研究		
要 旨	<p>本研究の目的は、ロボットを用いて斜め包み作業を行うことである。包装紙を用いた一般的なラッピング作業には、合わせ包み、斜め包み、スクエア包みなどが存在する中、本稿では現在でも人の手で行われていることが一番多く需要が高い「斜め包み」を研究対象として選択する。斜め包みとは、包装紙に対して斜めに包む対象を置き包む包装方法であり、主に使用されている百貨店などでは対象物の大きさによって包装紙の大小を選択している。</p> <p>斜め包みに関して、包装紙の大きさと対象物の初期位置を決定しなければロボットでどのように進めてよいか定まらない。包装対象を直方体と定め、その3辺を基に展開図モデルを作成し理論的解析を行い、包装紙の大きさと対象物の初期位置等の式を導出する。そして、使用する包装紙の面積が最小になるよう最小化計算を行い、包装紙上の対象物の角度を一意に決定した。その後、対象物の大きさである3辺と対象物の角度から、幾何学的に導出した初期位置と包装紙の大きさを求めた。</p> <p>次に、斜め包み作業の手順は一般的に定められているため、理論的解析をすることによって上記の値が決定すると斜め包みの作業過程も自動的に導出可能である。そこで、対象物の大きさ3辺と対象物の角度を用いて、双腕マニピュレータによる斜め包み作業の動作記述を検討した。</p> <p>最後に、検討した動作記述を基にロボットを用いて斜め包みを動作させ、正しく斜め包みが完了できるかを試した。結果として、認識を用いなかったために多少の誤差は出たものの全ての手順を通して行うことができ、本研究の条件下において双腕マニピュレータでの斜め包み作業は成功した。さらに成功したことによって幾何学的解析を用いて動作記述をすることについての有効性を示すことができた。</p>		

平成27年度修士論文

マニピュレータによる
斜め包みに関する研究

大学院情報システム学研究科
情報メディアシステム学専攻

学籍番号 : 1450022
氏名 : 玉田 貴寛
主任指導教員 : 末廣 尚士 教授
指導教員 : 工藤 俊亮 准教授
指導教員 : 橋山 智訓 准教授
提出年月日 : 平成28年01月28日(木)

目次

第1章 緒言	8
1.1 研究背景	8
1.2 関連研究	9
1.3 研究目的	11
1.4 論文構成	12
第2章 斜め包みの概要	13
2.1 様々なラッピング方法	13
2.1.1 合わせ包み (キャラメル包み)	13
2.1.2 斜め包み	14
2.1.3 スクエア包み	14
2.2 斜め包みの手順	16
第3章 斜め包みの理論的解析	18
3.1 斜め包みにおける配置と折り線の解析	18
3.1.1 包装する対象物	18
3.1.2 展開図モデル	18
3.1.3 対象物の初期位置	26
3.1.4 包装紙の大きさ	27
3.1.5 折り線	30
3.2 対象物の大きさに対しての適切な初期配置の決定	31
3.2.1 目的関数	31

3.2.2	制約条件	32
3.3	実験	34
3.3.1	実験方法	34
3.3.2	実験結果	35
3.4	まとめ	37
第 4 章	斜め包み作業の設計	38
4.1	ハードウェア構成	38
4.1.1	使用するロボットと周辺環境	38
4.1.2	ハンド	39
4.2	ソフトウェア構成	42
4.2.1	ROS	42
4.2.2	主なノード構成	43
4.3	斜め包みの作業記述	46
4.3.1	座標系	47
4.3.2	スキル	48
4.3.3	斜め包み手順 0	51
4.3.4	斜め包み手順 1	52
4.3.5	斜め包み手順 2	55
4.3.6	斜め包み手順 3	58
4.3.7	斜め包み手順 4	63
4.3.8	斜め包み手順 5	66
4.4	まとめ	70
第 5 章	斜め包み作業システムの評価実験	71
5.1	評価実験の前提条件	71
5.1.1	包装紙に付けた折り目	72

5.2	実験	75
5.3	結果	76
5.4	考察	80
5.5	まとめ	81
第6章	結言	82
6.1	本研究のまとめ	82
6.2	今後の課題	83

目 次

2.1	合わせ包み(キャラメル包み)	14
2.2	斜め包み	15
2.3	スクエア包み	16
2.4	斜め包み作業の全手順	17
3.1	包装する対象物	19
3.2	理想の完成状態	20
3.3	良くない完成状態	20
3.4	手順3におけるの必要条件	21
3.5	手順1における包み幅	22
3.6	手順2における包み幅	22
3.7	展開図モデル	23
3.8	余分量	24
3.9	PとQの計算	24
3.10	包装紙の大きさと初期座標	26
3.11	初期座標計算	27
3.12	包装紙の横の長さ	28
3.13	HとWの計算	28
3.14	折り線の場合	30
3.15	第四の制約計算	33
3.16	包装紙の面積を求めた結果	35

3.17 本手法を利用した結果	36
4.1 Baxter 周辺の環境	39
4.2 アーム関節名 [1]	40
4.3 机の構成	41
4.4 ハンド	41
4.5 滑り止め	42
4.6 ROS の Node と Topic	43
4.7 各座標系	43
4.8 使用する主な Node	45
4.9 作業記述における表現方法	46
4.10 各座標系の位置	47
4.11 包装紙の把持方法	48
4.12 円弧軌道を取る巻き付け作業	49
4.13 位置補正動作の方法	50
4.14 位置補正動作で使用する点	50
4.15 包装紙の配置方法	51
4.16 手順 1 の把持までの動作	52
4.17 円弧軌道を取った後の動作	54
4.18 手順 2 の折り込み動作	55
4.19 手順 2 の把持動作	56
4.20 手順 2 のすべり動作	57
4.21 向きを変える動作	58
4.22 アームでの動作図	58
4.23 反転動作	61
4.24 反転する際のアームの動作図	61

4.25	手順3での対象物を倒す動作	62
4.26	手順4において折り込み動作後に包む	63
4.27	包んだ所を押さえる動作	64
4.28	手順5において折り込み動作後に包む	66
4.29	終了動作	67
5.1	本実験で付けた折り線	72
5.2	対象物1	75
5.3	対象物2	76
5.4	対象物1の各手順完了時	77
5.5	対象物2の各手順完了時	78
5.6	対象物1の結果	78
5.7	対象物2の結果	79

表 目 次

3.1 実験で使用する対象物の大きさ	34
3.2 箱の大きさに対する結果	36
5.1 使用した対象物の大きさ	75
5.2 ロボットによる斜め包み作業の結果	79

第1章 緒言

1.1 研究背景

近年，産業分野を初めとする工場での作業にはロボットの存在が必要不可欠になってきている．現在でも人による作業が多く行われているため自動化が求められている．しかし，従来のロボットによる物体操作は形状変化の少ない剛体の操作が中心であり，形状が変化する柔軟物の操作は制御が難しく実用化が進んでいない．ロボットによる柔軟物操作の困難な点として，操作過程で対象物の形状がその都度変化してしまうことが主に挙げられる．しかし，柔軟物は紙，布，紐，フィルム，食品など世の中に多く存在している．以上より柔軟物は産業分野以外にも日常生活や医療現場など様々な所に存在する物体であり，柔軟物操作が可能になることによってロボットの活動範囲が将来的に拡大していくと考えられる [2]．

当研究室でも紙や紐，布などの柔軟物の研究を多数行っている．そこで本研究では紙の操作の中でも，現在も人の手で行われていることが多いラッピング作業に着目する．本研究で言うラッピングとは，一般に百貨店の菓子折りや贈り物などに見られる，包装紙を用いた贈答用の包装方法である．ラッピングの手順については「ラッピングの教科書」や「Let's Wrapping」などの書籍やホームページで多数紹介されており誰でも行うことができる [3] [4]．このようにラッピング方法は一般的に多数紹介されてはいるが，基本的な手順は全て同様の作業である．本研究では，ロボットを用いたラッピング作業の構築を研究対象とする．

1.2 関連研究

ロボットによるマニピュレーションに関する研究は近年非常に多く行われている [5] [6]. さらに従来の緩やかな速度以外にも高速マニピュレーションを行っている研究も多く存在する [7].

原田らは対象物に対しての姿勢, 把持, 軌道の計画を組み合わせてピックアンドプレース動作計画を行う手法を提案した [8]. Huebner らは把持する対象のモデルを仮定せずに複数の直方体を当てはめることで把持を実現した [9]. Ramirez-Alpizar らは柔らかい平らな対象物を平板上で動的にマニピュレーションを行った [10]. Cosgun らは多くの物体に囲まれた際の物体操作における押し操作の計画を行った [11]. Vahrenkamp らはロボットの周辺環境を回避しつつ動作計画を行う手法を提案した [12]. 以上のようにロボットにおけるマニピュレーション技術には様々な手法が存在する.

柔軟物の物体操作についても多くの手法が存在する. 紐に関する研究として, Vinh らは紐結び動作を教示しキーポイントを選び出すことで単腕ロボットによる止め結び動作を実現した [13] [14]. 山川らは高速ロボットアームを用いることで柔軟物の望ましくない変形を無視できるような速度で紐結び動作を実現した [15] [16]. また, 布に関する研究として, Maitin-Shepard らは乱雑に置かれたタオルを認識しロボットで把持し折り畳み, 重ねる動作を実現した [17]. 山川らは上述で使用していた高速多指ハンドシステムを用いて布を高速で畳む操作を実現した [18].

紙に関する研究では, 前田らは折り紙公理を用いた汎用的な折り紙作業システムを構築し折り紙作業を実現した [19]. 西村らは紙のハンドリングとしてページめくり動作をするロボットを実現した [20]. Namiki らは2台のロボット合わせて5指で紙を把持し折るという作業をする折り紙ロボットシステムを実現した [21]. 横小路らはおたまじゃくしと蛙が折れる折り紙ロボットを実現した [22]. これらのロボットは紙に対しての作業であり折り紙専用のロボットとして作られているが, 把持方法などは紙全般に対しての技術が含まれている. 島貫らは折り紙展開図を用いた各折り方の計算方法とその可能性判定手法の提案をした [23]. 展開図の使用については折り紙だけではなく包装作業でも用いることができる.

包む作業に関する研究について，松島らは包装手順の設計を行うために木構造を用いて表現し，折り操作の定式化と生成手法を提案した [24]．寺田らは柔軟物操作である風呂敷包み作業を複数台のロボットアームを用いて実現した [25] [26]．これらの包装作業は布に対しての作業であり，さらに風呂敷包み用のロボットになっている．

ラッピングの関連研究について，加納らは人間がラッピングをする際に失敗しないように主観的輪郭と呼ばれる錯覚を用いてユーザの失敗を防ぐアプローチを実現した [27]．ラッピングに関する研究であるが，ロボットを用いた研究ではなく人間が行う際に対しての研究であった．しかし，展開図を用いて考えている手法はロボットを用いる際にも考慮できる方法である．

1.3 研究目的

本研究の目的は、双腕マニピュレータを用いて斜め包み作業を行うことである。前述の通り、本研究ではラッピング作業を研究対象としている。包装紙を用いた一般的なラッピング作業には、合わせ包み、斜め包み、スクエア包みなどが存在する中、本稿では現在でも人の手で行われていることが一番多く需要が高い「斜め包み」を研究対象として選択する。

ロボットを用いて斜め包みを行うためには以下の項目が必要であると考えた。

1. 斜め包みの理論的解析
2. ロボットの動作設計
3. ロボットを用いた動作実験

まず斜め包みに関して、包装紙の大きさと対象物の初期位置を決めることでロボットの動作が可能となる。対象物を直方体と定め、その3辺を基に展開図モデルを作成し理論的解析を行い、包装紙の大きさと対象物の初期位置を導出することを提案する。

次に、理論的解析をすることによって初期位置が決定すると、その後の斜め包み作業の過程も自動的に導出可能である。理論的解析を基に、双腕マニピュレータを用いて斜め包み作業の動作設計を行う。

最後に、設計した動作を基にロボットを用いて斜め包みを動作させ、正しく斜め包みを完了させることを目標とする。従って、動作設計を基に実際のロボットを用いて斜め包みの動作実験を行う。

1.4 論文構成

本論文の構成は次の通りである。第2章では、本研究の題材である斜め包みについての一般的な包装手順について述べる。第3章では、展開図モデルを用いて対象物の大きさより、包装紙の大きさと対象物の初期位置を求め、求めた値について人間の手で斜め包みをし正しく包めるかどうかの実験を行う。第4章では、使用するハードウェアとソフトウェアについて述べ、さらに第3章で求めた初期配置を基に斜め包みの操作手順を記述する。第5章では、評価実験の前提条件を確認し、実際に第4章で操作記述をした動作を試して実験する。その実験における動作ポイントを記載する。第6章では本研究のまとめと今後の課題を記載する。

第2章 斜め包みの概要

第1.1章でも言及している通り，本研究で題材となるラッピングとは贈答の際に用いられる包装手段の一種である．本章では，包む対象が直方体の形状の物であるラッピング方法について3つの方法を紹介する．さらにその中の本研究で主に使用する斜め包みと呼ばれる方法について詳しく述べる．

2.1 様々なラッピング方法

包む対象物が直方体であり，包装紙を用いるラッピング方法には主に合わせ包み，斜め包み，スクエア包みが存在する．本節ではこれらの説明を行う．

2.1.1 合わせ包み（キャラメル包み）

合わせ包み，別名キャラメル包みと呼ばれる包み方が存在する．この方法は斜め包みと並んで一般の人に馴染みの深い包装方法であろう．駅やサービスエリア，百貨店などでは菓子の商品が大量に積まれ売られているのを1度は目にしたことがあると思われる．そのように大量生産されているものはほとんどがこの包装方法を利用している．

包装手順を簡単に説明すると，まず始めに包装紙の真ん中に対象物を配置する．その後両端の包装紙を対象物を包むような形で被せるように包み，被せた箇所が開かないようにテープ止めをする．その際にテープ止めをする個所が対象物の真ん中になるように包装紙を包む．次に対象物の開いている側面の2面を折り込み，図2.1のように包み，最後に開かないように2箇所ともテープ止めをして終了である [3] [4]．



図 2.1: 合わせ包み (キャラメル包み)

2.1.2 斜め包み

斜め包みとは言葉の通り包装紙に対して包む対象物を斜めに配置してから包んでいく贈答用のラッピング方法である。特徴として、不慣れな人にとっては難しく、対象物を回転させなければ包めない手法である。主に百貨店のお店で商品を購入した際に、その場で包装してくれる場合に多く使用される方法であるので一度は見たことがあると思われる。斜め包みは一般的な方法として、多くの書籍やホームページにて斜め包みの手順が説明されている [3] [28] [4]。本研究ではこの斜め包みについて検討する。次節で詳しい手順を説明する。

2.1.3 スクエア包み

斜め包みや合わせ包みと比較すると通常の店舗ではあまり見ることがなく馴染みのない方が多い包装方法の一種である。利点としては、底面が正方形の対象物に適しており、ひっくり返さずに包めるため対象物を裏返してはいけない物には適している。



図 2.2: 斜め包み

包装手順を簡単に説明すると、まず初めに対象物を包装紙の中心に配置する。その際に包装紙に対して対象物を 45° 回転させて配置する。そこから包装紙の角 4 点を対象物に被せるように包む。被せる順番としては始めに被せた角の次は、対角線状の反対の角を被せなければならない。その後、対象物の上部にできる包装紙の折り目を図 2.3 のように折り込まなければならない。折り込み後は中心の 1 点のみにテープ止めをして完成である。



図 2.3: スクエア包み

2.2 斜め包みの手順

斜め包み作業の手順において、細かな部分は店舗や書籍などによって異なる点があり、特に以下の手順5の終了の仕方が美しく見えるようにするために各菓子メーカーで異なる場合が多い。しかし、基本的な斜め包み作業の手順は同様である。本研究では全ての斜め包み作業の手順を図2.4のように6つの手順に分解して説明することとする。

手順0は包装紙を置いて、対象物を置き、斜め包みのための初期配置を完成させることである。手順1は1回目の包む動作である。手順2は2回目の包む動作を行い、手順1で包んだ所と手順2で包んだ所の重なる場所にテープ止めをする。手順3は対象物を180°回転する動作である。手順4は3回目の包む動作である。手順5は最後の包む動作である。その後、手順4と5が開かないように1点でテープ止めをする。

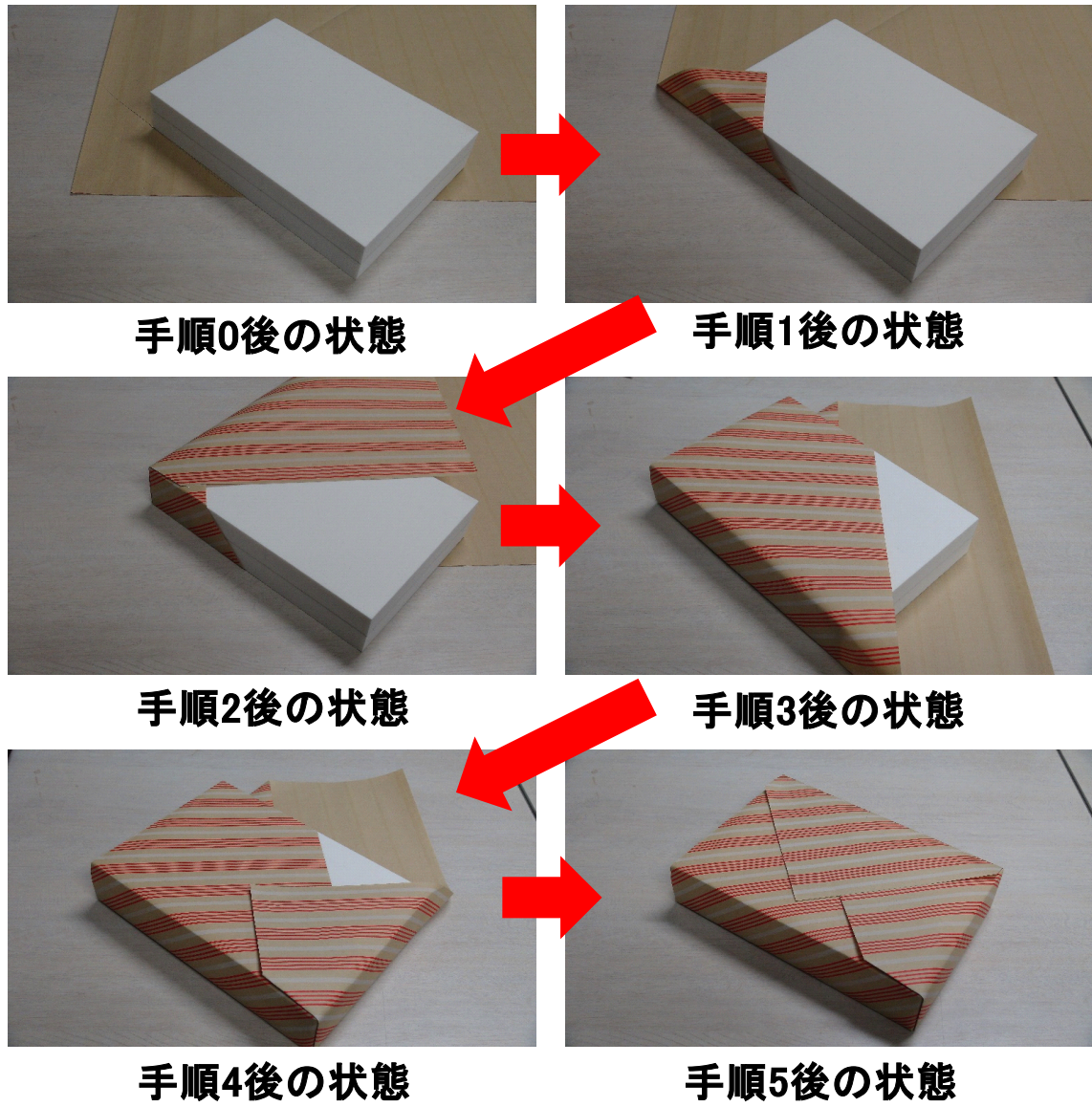


図 2.4: 斜め包み作業の全手順

第3章 斜め包みの理論的解析

ロボットで斜め包みを行う場合には，各ポイントで大きさや位置情報を設定する必要がある．そのため，包む対象物の初期位置と包装紙の大きさについて検討する．ラッピング方法自体は確立されているため，それらを数値化することでロボットによるラッピングが可能であると考えられる．本章では，包む対象物の大きさに対して，包装紙の大きさと包装紙上の対象物の初期位置を導出する手法について提案し，さらに正当性を確認する．

3.1 斜め包みにおける配置と折り線の解析

3.1.1 包装する対象物

斜め包み作業とは一般的に商品の箱を包装することが多く，その形としては直方体が基本であると考えられる．そこで本研究でも対象物の形状は図 3.1 のような直方体が妥当として進めてゆく．さらに前述の通り幾何学的に斜め包みを解析するため，直方体の3辺を a, b, c とする．この3辺の値の大小関係は式 (3.1) とする．

$$a \geq b \geq c \quad (3.1)$$

3.1.2 展開図モデル

斜め包みは包むという観点から通常は3次元で検討する必要があるが，包装紙は1枚であるため2次元の展開図として検討可能であるという考え方が存在する [27]．ラッピングの完成状態から解いた時にできる展開図をモデルとして本研究では検討する．この展開図モデ

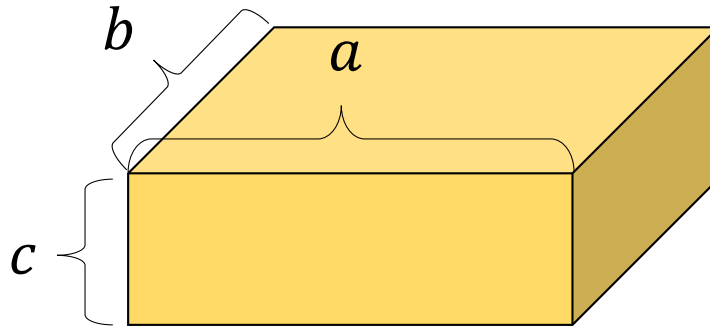


図 3.1: 包装する対象物

ル上で幾何学的に考えることによって、包装紙の大きさと対象物の初期位置が導出可能であると考えた。しかし、斜め包みは各手順において包装紙が長すぎたり短すぎたりすると包装が思い通りにいかなくなるため、必要条件がいくつも存在する。そのような条件を守らないと最後の美しい形に収まらないことが多々発生する。さらに展開図モデルは包装紙上に描いて検討し必要な情報を幾何学的に計算するが、包装紙のどの場所に展開図を配置するかは得られない。そこで展開図モデルを配置する上で考慮した点を以下で説明する。

まず始めに、図 3.2 は斜め包みの完成状態である。斜め包みなどのラッピングは見た目が重要で美しく見える状態で完成する必要があると本稿では考えている。しかし、完成状態の紙の長さを考えていないと図 3.3 のような形で終わってしまうことがあり、見た目にも美しくなく、さらにテープ止めをすることを考えると 1ヶ所で止めることができない。よって本研究では図 3.2 のように点 A, B, C が一直線上に並ぶ場合が今回の斜め包みの理想の終わり方であると考えた。

以上のように考えると展開図モデル上では図 3.4 のように点 D, E 間の長さを $a - b \tan \theta$ と設定することができる。この条件に関しての詳細は第 3.2.2 節にて記載している。

次に、図 3.5, 3.6 はそれぞれ手順 1, 2 を表している。これらの箇所 l_1, l_2 に注目する。 l_1 は箱の長さに対する一定以上の値でなければならない。その理由は図 3.6 の箱上で包装紙が重なる箇所をテープなどで固定しなければならないからである。 l_1 が短すぎるとこの箇所

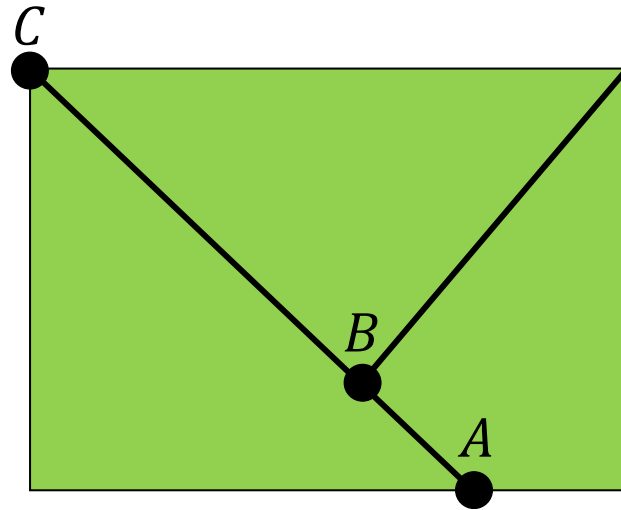


図 3.2: 理想の完成状態

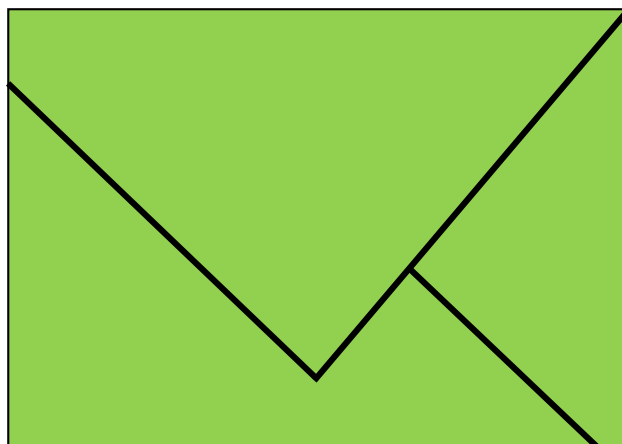


図 3.3: 良くない完成状態

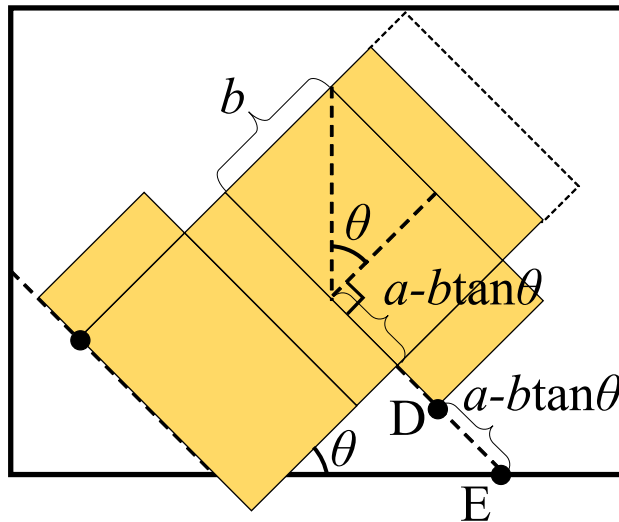


図 3.4: 手順 3 における必要条件

固定することが困難になってしまう。さらに長すぎてしまっても余計に包装紙の面積を使用してしまうので適度な長さを取る必要がある。

l_2 は短くなってしまうと包装紙の切れ目が全ての手順終了後に外側へ出てしまうため、必ず存在しなければならない値である。前述のようにテープで固定できる程度の長さが必要であるが、過剰に長い場合には手順 1 の作業で包んだ箇所が全て隠れてしまいテープ止めができなくなってしまう。そこで幾何学計算をする場合には適度な値を設定する必要がある。 l_1, l_2 の条件に関しては第 3.2.2 節にて記載している。

以上の事より、幾何学的考察をする展開図モデルを図 3.7 のように示すことができる。図 3.7 中にある θ は包装紙における対象物の角度である。この角度 θ の値によって斜め包みが成功する時と失敗する時が存在する。よって、本研究では対象物の大きさである 3 辺 a, b, c より角度を導出する。詳しい導出方法は次節に記載している。本節では変数として展開図モデルに記載する。

図 3.8 中にある α, β, γ は余裕を取っておく値とする。以下、これらを余分量とする。この余分量はロボットによる包装を行う際に、多少の誤差によって包装紙の長さが足りないこ

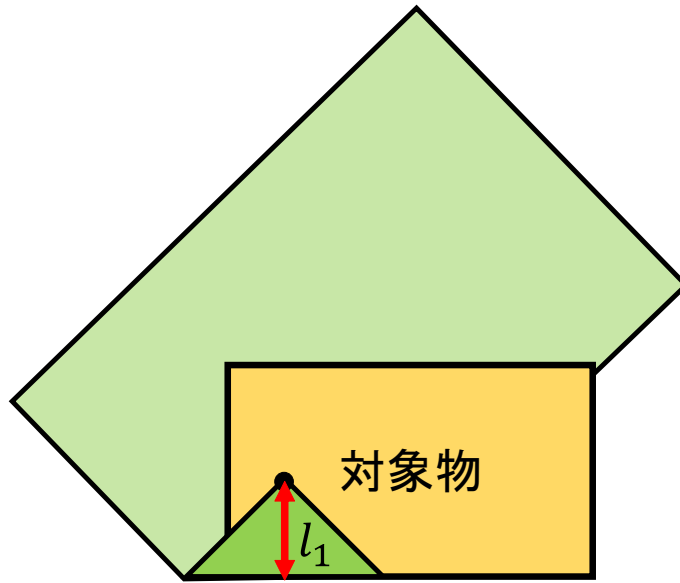


図 3.5: 手順1における包み幅

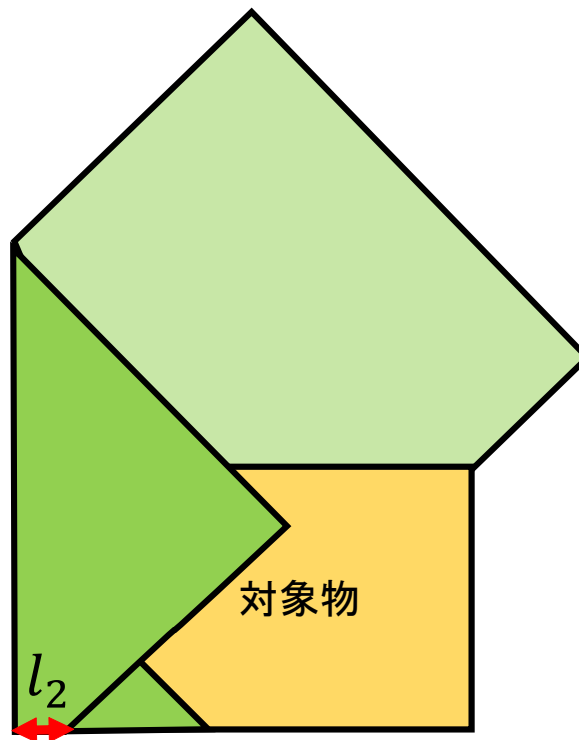


図 3.6: 手順2における包み幅

とを防ぐ利点がある。実際の人間の包装作業では余分量をあらかじめ取ってある場合がほとんどであり，その場合は中に折り込み美しく見えるような工夫が存在する。本研究では斜め包み作業を行う場合には余分量の値を設定する。

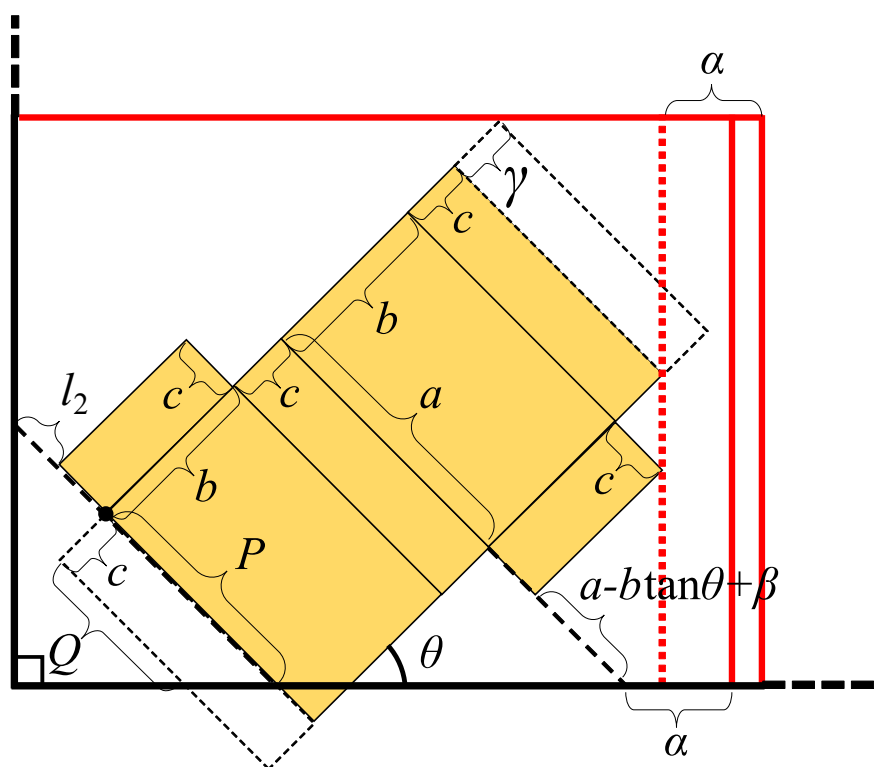


図 3.7: 展開図モデル

この展開図モデルにある P , Q は本手法で多く使用する値であるのであらかじめ求めておく。 P と Q を図 3.9 にある変数を利用して以下のように求める。

$$P_1 = \frac{a - b \tan \theta + c + \beta}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

$$P_2 = b + c - P_1 \quad (3.3)$$

$$P_3 = P_2 \tan \theta \quad (3.4)$$

$$P = a - P_3 \quad (3.5)$$

よって, P , Q はそれぞれ式 (3.6), (3.7) のように表される.

$$P = 2a - 2b \tan \theta + (1 - \tan \theta)c + \beta \quad (3.6)$$

$$Q = P - c \tan \theta \quad (3.7)$$

3.1.3 対象物の初期位置

図 3.10 のように対象物の初期位置と包装紙の大きさを示す。

対象物の初期位置は，包装紙の左下の点からの縦 h と横 w の長さが幾何学的考察より求められ，包装紙に対する姿勢としては θ で表される。

包装紙の大きさは縦 H と横 W として表す。

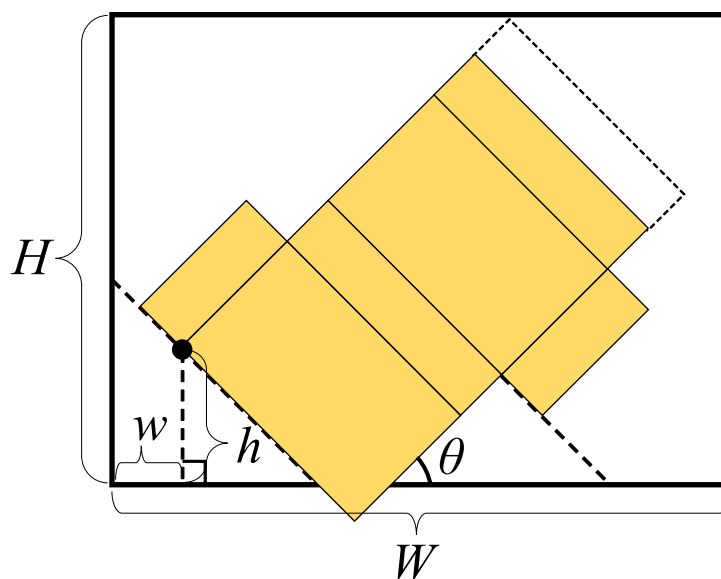


図 3.10: 包装紙の大きさと初期座標

図 3.11 にある値に着目すると h , w は式 (3.8), (3.9) のように求めることができる。

$$h = P \cos \theta \quad (3.8)$$

$$w = (l_2 + c) \sin \theta \quad (3.9)$$

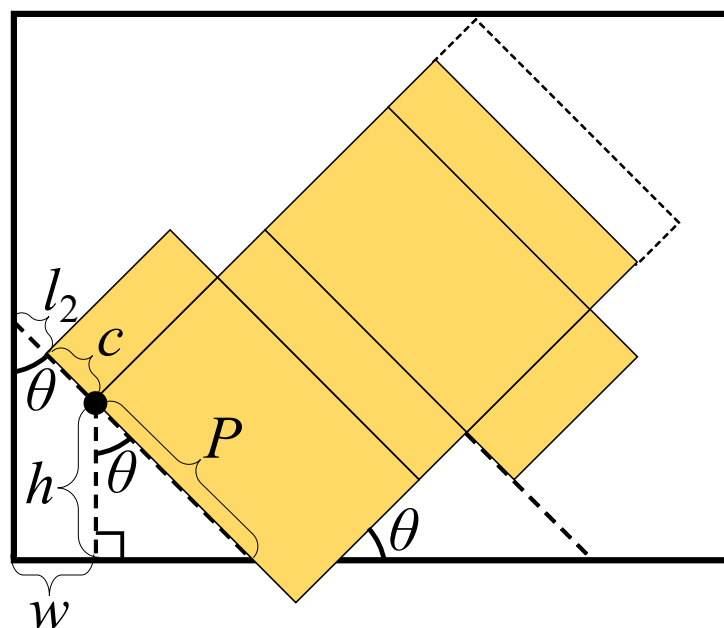


図 3.11: 初期座標計算

3.1.4 包装紙の大きさ

展開図モデルから幾何学計算を用いることで図 3.10 の包装紙の縦 H と横 W の長さを求めることができる。しかし、図 3.12 の点 F , G が左右どちらにあるかで場合分けが必要である。つまり、 L_1 と L_2 を比較したときに大きい値の方を W とする。

H , $W(L_1, L_2)$ について図 3.13 のように分割して求めていく。包装紙の横の大きさ W は W_1, W_2, W_3, W_4 により求められ、縦の大きさ H は H_1, H_2 より導出される。

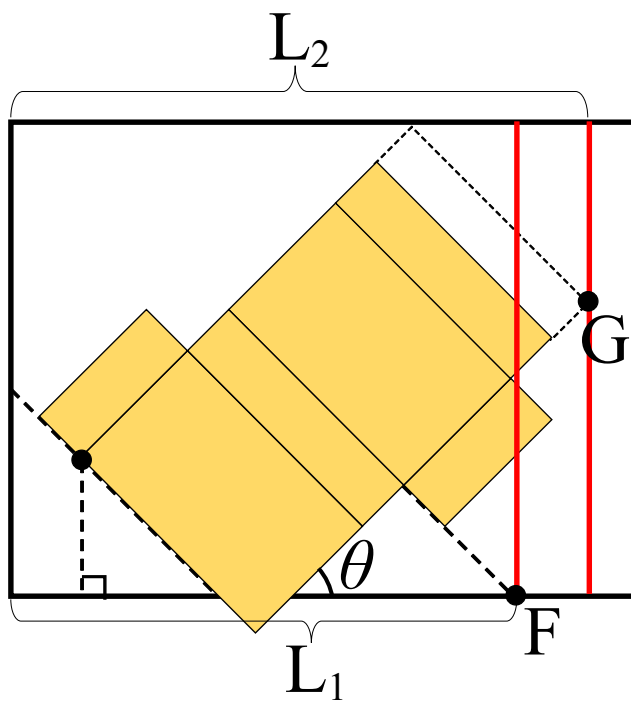


図 3.12: 包装紙の横の長さ

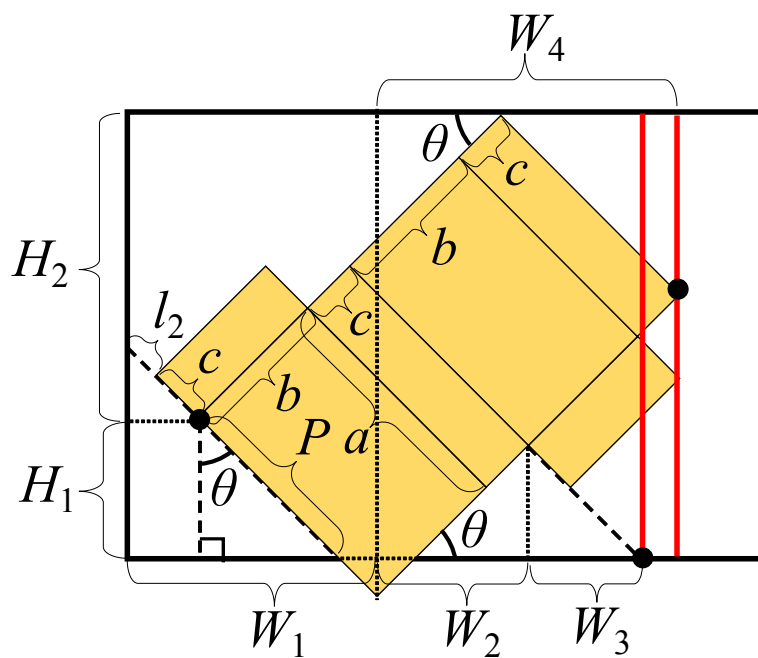


図 3.13: H と W の計算

$$W_1 = (a + c + l_2) \sin \theta \quad (3.10)$$

$$W_2 = (b + c) \cos \theta \quad (3.11)$$

$$W_3 = (a - b \tan \theta + c + \beta) \sin \theta \quad (3.12)$$

$$W_4 = (2b + 2c) \cos \theta \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} L_1 &= W_1 + W_4 + \alpha \\ &= (a + c + l_2) \sin \theta + (2b + 2c) \cos \theta + \alpha \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} L_2 &= W_1 + W_2 + W_3 + \alpha \\ &= (2a - b \tan \theta + 2c + l_2 + \beta) \sin \theta + (b + c) \cos \theta + \alpha \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$H_1 = P \cos \theta \quad (3.16)$$

$$H_2 = (2b + 2c) \sin \theta \quad (3.17)$$

よって，包装紙の縦 H ，横 W の長さは前述のように考慮すると，式 (3.18)，(3.19) のようになる。

$$\begin{aligned} H &= H_1 + H_2 + \gamma \sin \theta \\ &= (2b + 2c) \sin \theta + P \cos \theta \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$W = \max(L_1, L_2) \quad (3.19)$$

3.1.5 折り線

前述の通り，展開図モデルを使用すると包装紙に対する対象物の位置が決まる．そして斜め包みの手順はあらかじめ決まっているので，包装過程で付く折り線も決定できる．図3.14のように示すことができ，包装紙の上に対象物を置いた状態を真上から見た視点で谷折り，山折りを表している．図に存在する θ については前述にある通り，幾何学計算後に確定する．これらの折り目は第5章で詳細を述べるが，本研究においては重要な折り目となる．

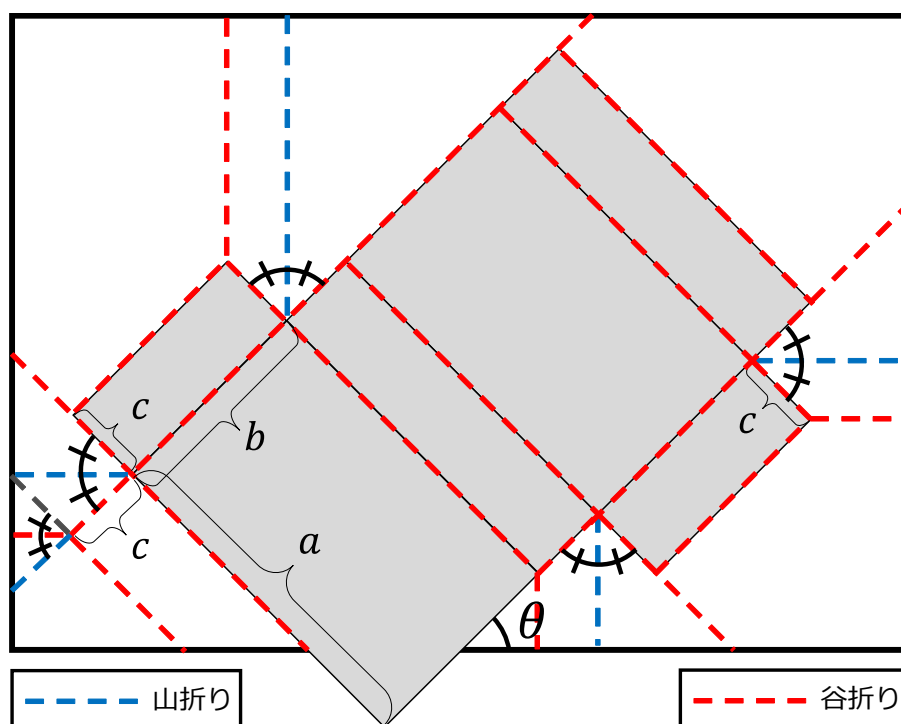


図 3.14: 折り線の場合

3.2 対象物の大きさに対しての適切な初期配置の決定

本節では具体的な対象物の初期位置と包装紙の大きさを決定する。前節で述べたこれらの値を決定する式は対象物の大きさ a, b, c と対象物の角度 θ を変数としたときの式であった。そのため本節では対象物の大きさから対象物の角度を求め、その時の各値を最小化計算によって導出する手法を提案する。

本節では以下の目的関数と4つの制約条件を用いて値を一意に定めているが、制約条件の範囲内であればどの数値を用いても理論的には斜め包みが成功する。しかし、実際に百貨店などでのラッピングでは基本的に何種類かの紙の大きさが決まっており、対象物の大きさによって変更している。そのため本研究では以上のような実践的な場合でも可能にするため紙の大きさはなるべく小さくするべきだと考えた。そのようにすることによって既存の紙の大きさに当てはめることができる。本手法で計算した値を用いてラッピングを行う場合には、導出した包装紙の大きさより縦横が大きい紙を選択し、仮に紙に余分な部分が出てしまった場合には最後の手順の時に中に折り込むことによって包装可能である。

3.2.1 目的関数

任意の対象物の大きさに対する最良の角度 θ を求める。本稿ではなるべく少ない面積の包装紙で斜め包みを達成するようにするため、包装紙の面積に着目した最小化計算を行い、 θ を決定する。そこで包装紙の面積 $S(\theta)$ を目的関数として最小化計算を行い、角度 θ を一意に定める。面積 $S(\theta)$ は前節の値を用いて計算を行うため、式 (3.20) となる。さらに最小化計算を行う際には次節に記載した制約条件も考慮して計算を行う。

$$\min S(\theta) = HW \quad (3.20)$$

3.2.2 制約条件

式 (3.20) を最小化する際に以下の4つの制約条件を適用する.

- 第1の制約

図 3.4 のように $a - b \tan \theta$ が正でなければならない. そのためには式 (3.21) のようになる. よって以下が成り立つ必要がある.

$$\tan \theta < \frac{a}{b} \quad (3.21)$$

- 第2の制約

図 3.7 のように包装紙の下から箱部分が外に出なければならぬための制約である. 図 3.9 の P_2 が 0 より大きいと考えればよいので式 (3.22) となる.

$$b + c - \frac{a - b \tan \theta + c + \beta}{\tan \theta} > 0 \quad (3.22)$$

よって式 (3.22) より, 第2の制約条件は式 (3.23) のようになる.

$$\tan \theta > \frac{a + c + \beta}{2b + c} \quad (3.23)$$

- 第3の制約

図 3.5 において, l_1 が $b/3$ より大きくなるような範囲に設定する. 従って, 第3の制約条件は式 (3.24) のようになる.

$$l_1 > \frac{b}{3} \quad (3.24)$$

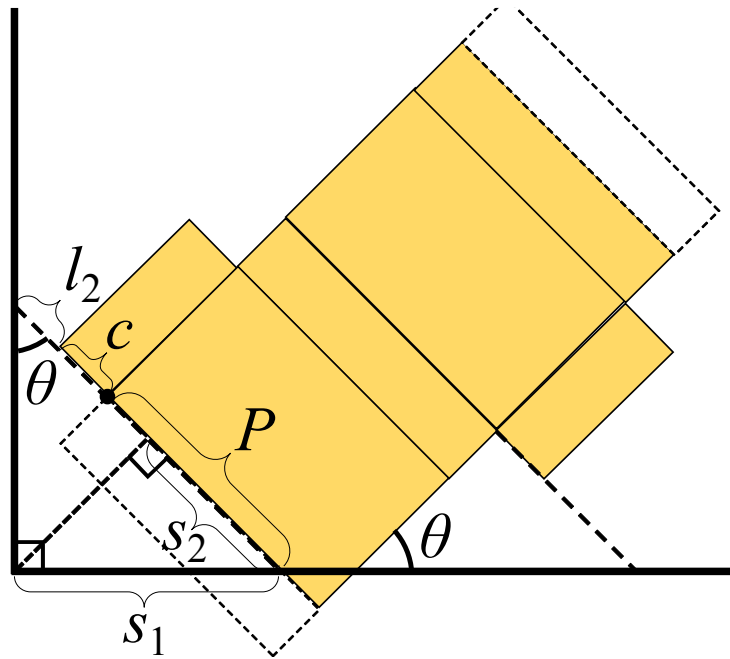


図 3.15: 第四の制約計算

- 第4の制約

図 3.5 の対象物の上に移動させた包装紙の角の点が箱の左側に出ないようにしなければならない. そのためには図 3.15 の s_2 が P より小さくなければならない. 従って, 第 4 の制約条件は式 (3.28) のようになる.

$$s_1 = (c + l_2 + P) \sin \theta \quad (3.25)$$

$$s_2 = s_1 \sin \theta \quad (3.26)$$

$$P > s_2 \quad (3.27)$$

$$P - (c + l_2 + P) \sin^2 \theta > 0 \quad (3.28)$$

3.3 実験

本章で求めた式が妥当であるかを様々な大きさの直方体を用いて確かめる。その際に図3.8に表している余分量 α , β , γ は全て 20[mm] であるとする。また、今回は図3.6の l_2 の長さを式 (3.29) のように設定する。この手順2の後必ず重なる部分をテープで止め固定する必要がある。そのために l_2 を Q の長さの半分とすることで留めやすくし、見た目にも美しくなると考えこのように設定する。

$$l_2 = \frac{Q}{2} \quad (3.29)$$

3.3.1 実験方法

5種類の対象物を用意し前述した方法で対象物の最良な角度 θ を求め、包装紙の大きさと初期位置を計算し、実際に人の手でラッピングを行い正当性を確かめた。ラッピングをする際の誤差をなるべく少なくするために1, 2回目の折る場所は事前に折っておくこととする。今回用いる5種類の対象物は、表3.1にある大きさのものを使用する。これらは対象物の大きさ a, b, c が様々な比率の物を一般的な菓子メーカーから筆者が選択したものである。

表 3.1: 実験で使用する対象物の大きさ

番号	対象物の大きさ [mm]
1	239 × 163 × 47
2	257 × 118 × 55
3	222 × 196 × 36
4	262 × 220 × 47
5	200 × 200 × 50

3.3.2 実験結果

まず，式 (3.20) の目的関数を基に対象物の角度を一意に決定した．角度 θ を $0^\circ \sim 90^\circ$ 間において， 0.1° 刻みで全ての場合の面積 S を調べた．さらに，4つの制約条件を考えると $239 \times 163 \times 47$ の場合，図 3.16 の範囲が満たされる．そして，これらの値の中から S が最小になる角度を本研究で用いる角度 θ とし，その値を用いて包装紙の大きさや対象物の初期位置を決定した．

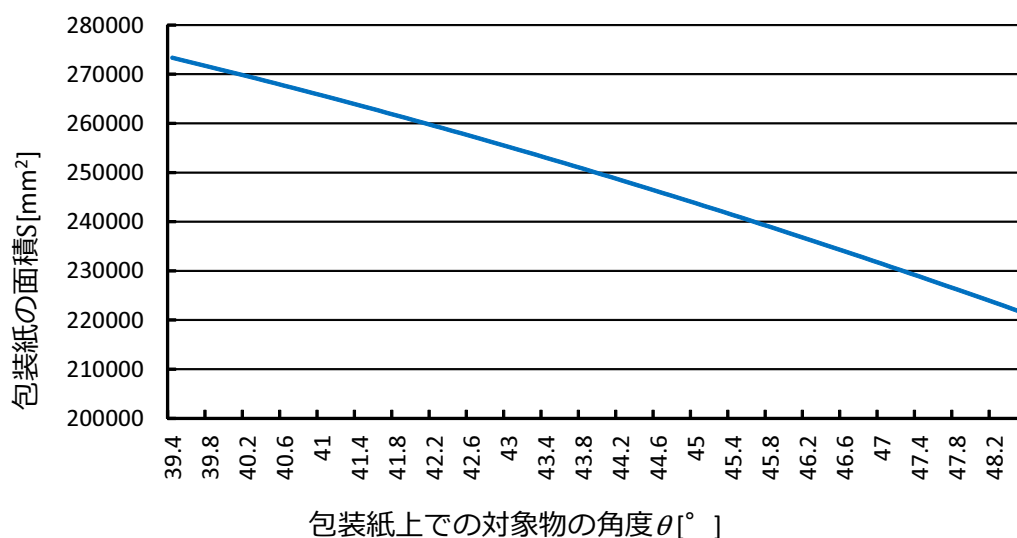


図 3.16: 包装紙の面積を求めた結果

実験結果としては表 3.2 のように対象物に対する各値が出力された．

そして，これらを本手法で試し，全ての場合においてラッピング可能である結果が得られた．結果の一つを図 3.17 に示す．これより一般的な大きさの直方体の物体をラッピングは可能であることがわかった．

表 3.2: 箱の大きさに対する結果

(全ての長さの単位は [mm] とする)

番号	$a \times b \times c$	H	W	h	w	θ
1	239 × 163 × 47	411	539	81.7	61.5	48.5
2	257 × 118 × 55	419	570	129	98.9	52.4
3	222 × 196 × 36	413	569	93.2	54.2	41.3
4	262 × 220 × 47	481	657	107	66.0	42.5
5	200 × 200 × 50	421	602	116	60.8	36.0

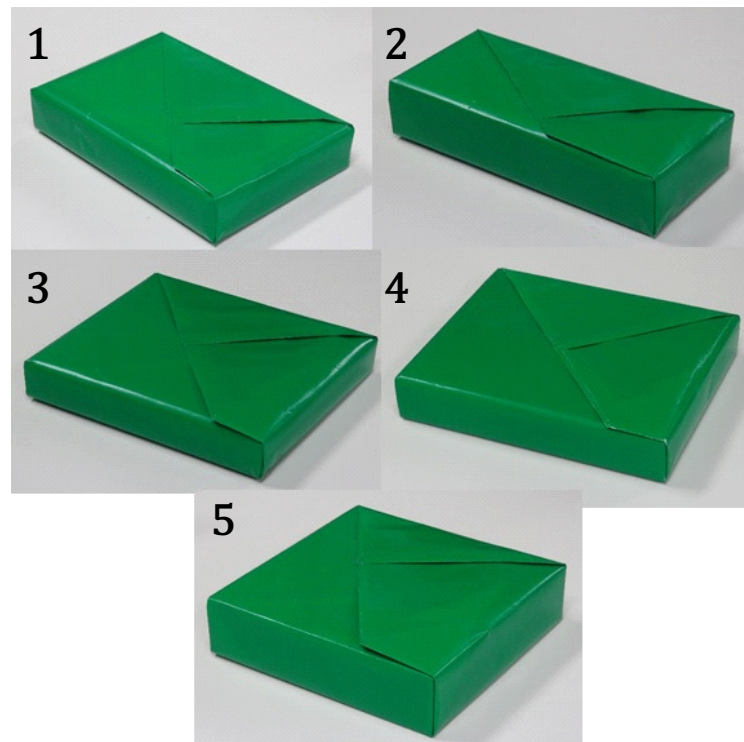


図 3.17: 本手法を利用した結果

3.4 まとめ

本章では，ロボットが斜め包みをするための「ラッピングする箱の初期位置」と「任意の箱に対する包装紙の大きさ」を求めた．その際に包装紙の面積を最小化することで包装紙に対する対象物の角度が導出可能であった．最小化計算では4つの制約条件を適用した．実験の結果により一般的な菓子折りや贈り物のサイズでは有効であることがわかった．

第4章 斜め包み作業の設計

第3章の結果より，対象物（今回は直方体を対象）の大きさとして3辺の値を用いることで包装紙の大きさや初期位置を求められることが分かった．そして，斜め包みを行うための初期配置が完了したならば，実際の包む作業も記述可能である．本章では，第3章の結果を基に開発したロボットによる斜め包み作業について記載する．主に使用したハードウェア構成やソフトウェア構成，更に実際に斜め包み作業のために記述した動作を記載する．

4.1 ハードウェア構成

本節では，前述の通り斜め包み作業を行うために使用したハードウェアやロボット周辺の環境について述べる．

4.1.1 使用するロボットと周辺環境

本研究では，操作用アームとして図4.1のような Rethink Robotics 社の双腕ロボット “Baxter” を使用する．Baxter は図4.2のように片腕につき7自由度を有している．さらに左右のロボットアームの先端には筆者の研究室で製作された操作用ハンドを取り付けている．操作用ハンドについては次の第4.1.2節に詳しく記載する．ロボットの前には作業用の机を配置している．図4.3のように木製の机上に厚さ4[cm]のスポンジを置き，さらにその上より黒い布を配置している．

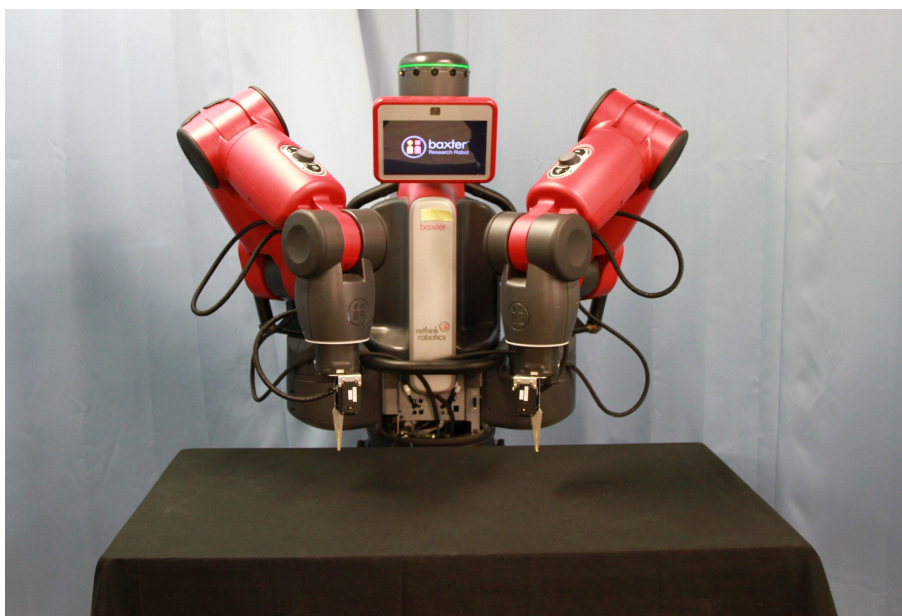
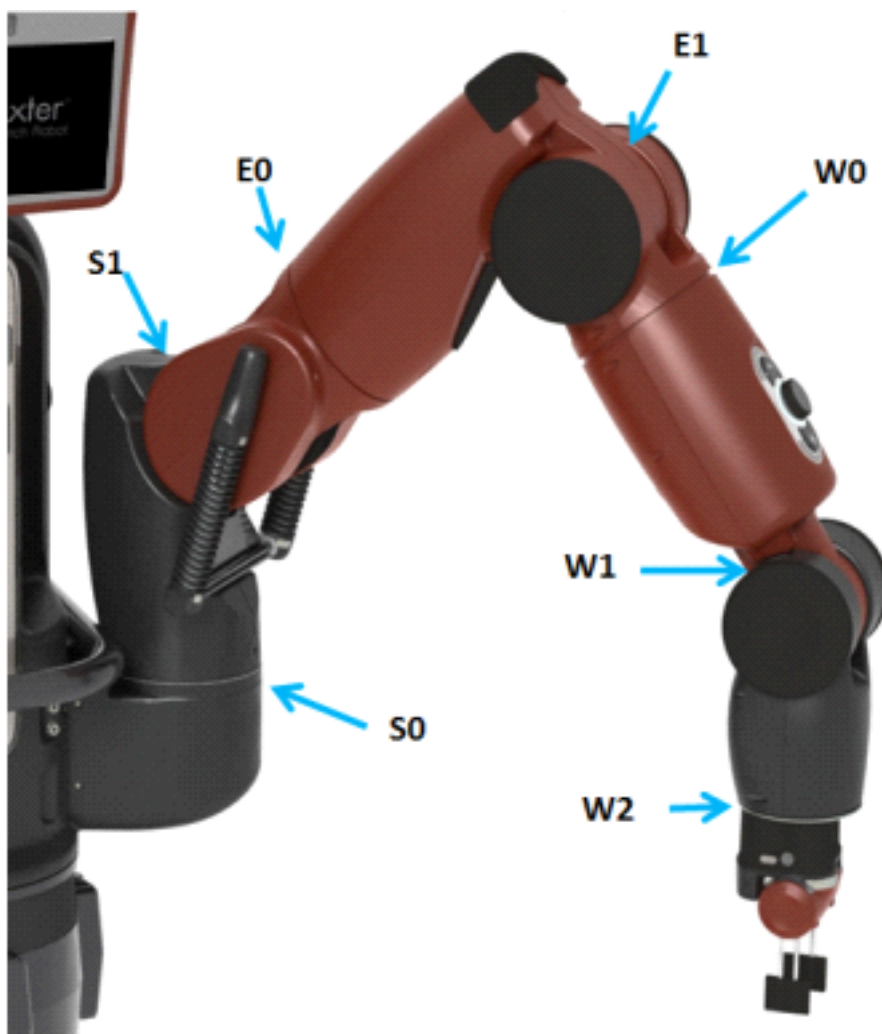


図 4.1: Baxter 周辺の環境

4.1.2 ハンド

Baxter のエンドエフェクタとして左右のアームに図 4.4 のような 2 指のハンドを取り付けてある。このハンドは研究室にて自作したものであり、株式会社 ROBOTIS 製のサーボモータ “Dynamixel MX-106R” を使用しハンドの開閉を行っている。さらに、図 4.4 の指 1 の軸が固定されており、開閉する際には指 2 のみが動き物体を把持する設計になっている。よって、ハンドの開き幅は任意に設定することができ、用途により開き幅を変更できる。

また、各指の閉じた内側の部分には紙を把持しやすいように滑り止めを取り付けた。滑り止めには図 4.5 のような突起部分が小さい形状の物を使用し、大きさに合うよう切り取り、指の内側に貼り付けた。



- S0** - Shoulder Roll
- S1** - Shoulder Pitch
- E0** - Elbow Roll
- E1** - Elbow Pitch
- W0** - Wrist Roll
- W1** - Wrist Pitch
- W2** - Wrist Roll

図 4.2: アーム関節名 [1]

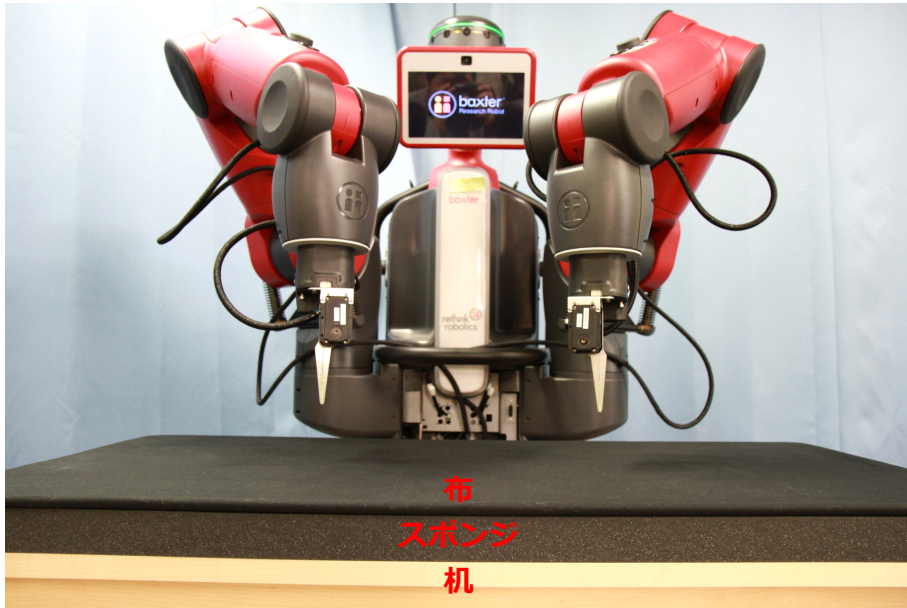


図 4.3: 机の構成



図 4.4: ハンド

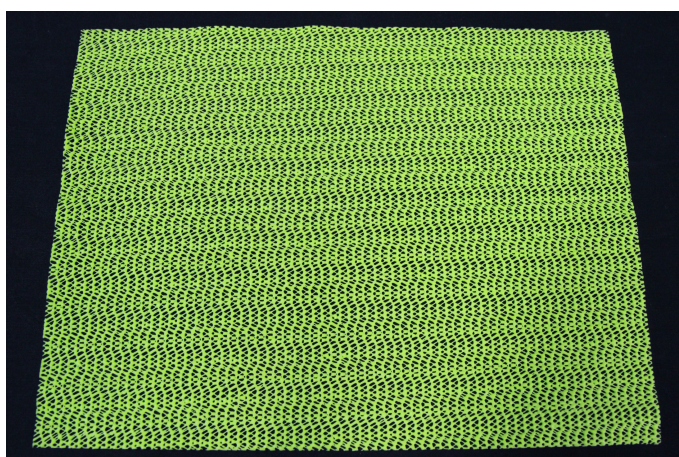


図 4.5: 滑り止め

4.2 ソフトウェア構成

本節では，斜め包み作業で使用したハードウェアを動作させるためのシステムについて述べる．

4.2.1 ROS

本研究では，4.1 節で述べたハードウェアを操作するため，オープンソース・ロボティクス財団によって開発されているフリーのロボットフレームワークである ROS(Robot Operating System) を使用した．ROS の実行プログラムはノード (Node) という単位で表され，トピック (Topic) という単位の場所にデータを送受信することで通信を行う．図 4.6 のように，Node が情報を送信する場合は Topic にデータを書き込み (Publish)，受信する場合には Topic のデータを購読 (Subscribe) する [29] [30]



図 4.6: ROS の Node と Topic

4.2.2 主なノード構成

本システムでは 4.1 で述べた Baxter とハンドを使用する。ロボット座標系から見た目標座標のみではなく、実装上では対象物上に設定したローカル座標系から見た目標座標を導出しなければならない。よって座標計算では図 4.7 のように、ロボット座標系から各ローカル座標系に見た目標座標に計算し直す。

- tf_Base2Box
主に前半の手順で使用する box 座標系を定めたノード
- tf_Base2Box2
主に後半の手順で使用する box2 座標系を定めたノード
- tf
各ローカル座標系から見た目標座標をロボット座標系に計算し直すトピック

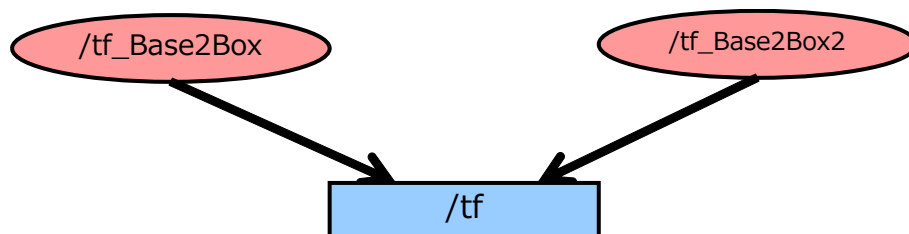


図 4.7: 各座標系

図 4.8 では本研究で使用している主なノードを表している。write_node において本研究で提案する計算方法を用いて記述する斜め包み作業の動作を求める。それを基に本研究室で開発された各ノードを通り，Baxter のアーム動作とハンドの開閉を操作する。使用している主な各ノードの用途は以下の通りである。

- write_node

斜め包み作業における理論的解析の計算と全ての手順の動作記述を行うノード

- end_pose_node

目標ハンド位置に行くためのアームの目標座標を計算するノード

- ik_node

逆運動学を計算するノード

- exe_node

速度制御やソフトとハードを接続するノード

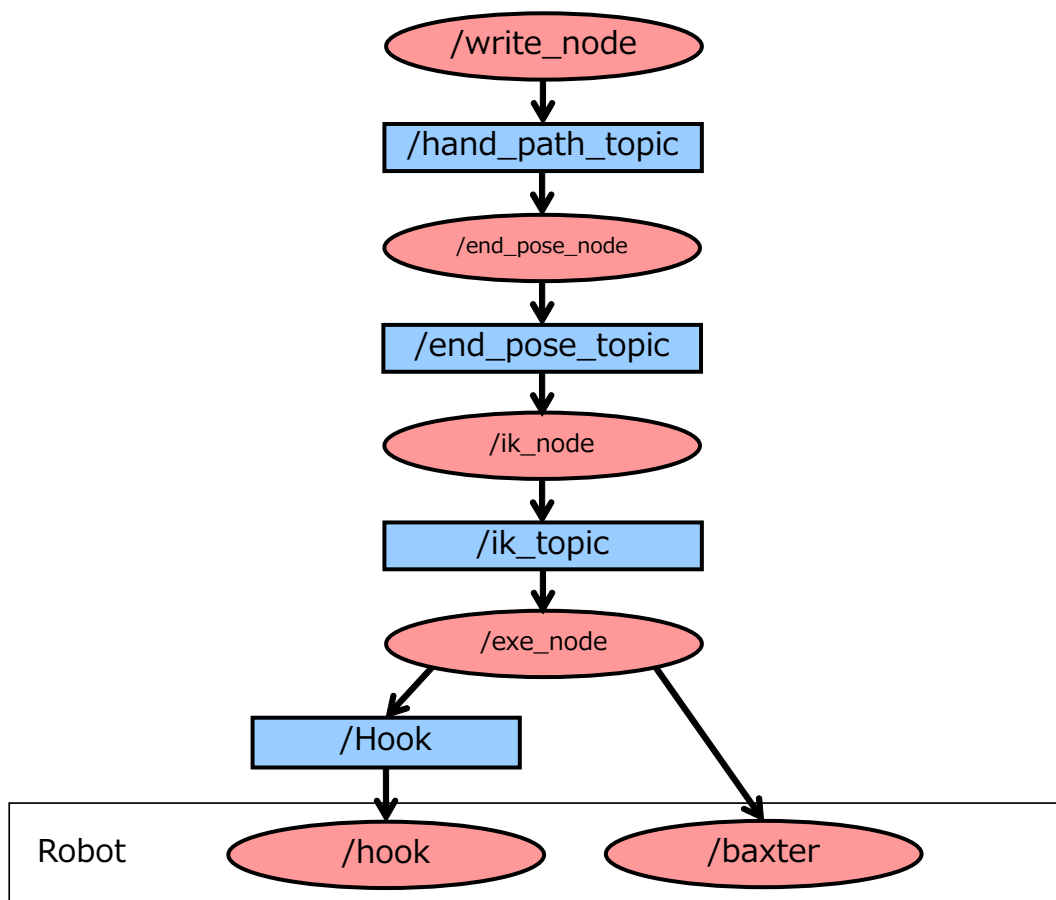


図 4.8: 使用する主な Node

4.3 斜め包みの作業記述

本節では斜め包み作業の作業計画を示す。斜め包みにおいて、特定の作業をスキルとして表現している。ロボットアームによる動作の座標と姿勢を前章の提案手法を基に記述している。本節では、始めの紙の位置 (Start Position) $P_{sp} = 0.7[m]$, 机の高さ (Desk High) $P_{dh} = 0.042[m]$ としており、値の単位は全て $[m]$ とする。さらに、手順0から手順5までの作業記述は左右のハンドの座標と姿勢を提示しており、その表現方法として図4.9のように表すこととする。姿勢について、4つの値の場合はクォータニオン表記、3つの場合はロール・ピッチ・ヨー表記とする。また、座標や姿勢の表記がない場合には前の手順の状態のままであることとする。

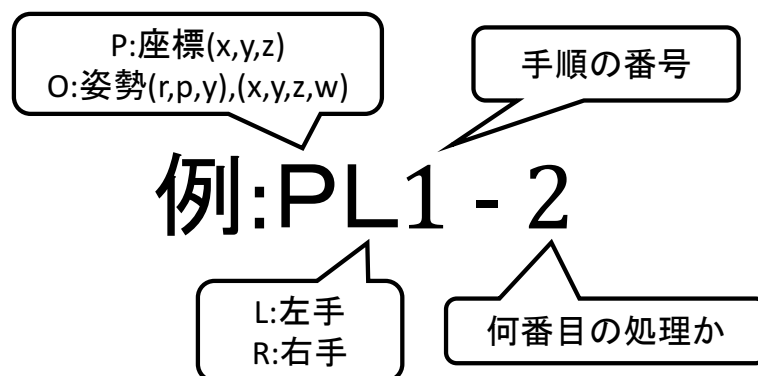


図 4.9: 作業記述における表現方法

4.3.1 座標系

本章で記載する作業記述では各手順の座標を以下のロボット座標系及びローカル座標系で表現する。base 座標系とは、いわゆるロボット座標系の事で Baxter の中心位置に設定している。box 座標系, box2 座標系は各手順で使用する対象物の角に設定した座標系である。これら2つの違いは対象物が Baxter に対して横か縦かによって使用する座標系を変えているだけである。各座標系の位置は図 4.10 に表す。以下で用いられている c は 3.1.1 節, P, l_2, θ は 3.1.2 節にてそれぞれ説明をしている。

- base 座標系：ロボット座標系
- box 座標系： ${}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta, (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - P, P_{dh})$
- box2 座標系： ${}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - a, 0.0, P_{dh})$

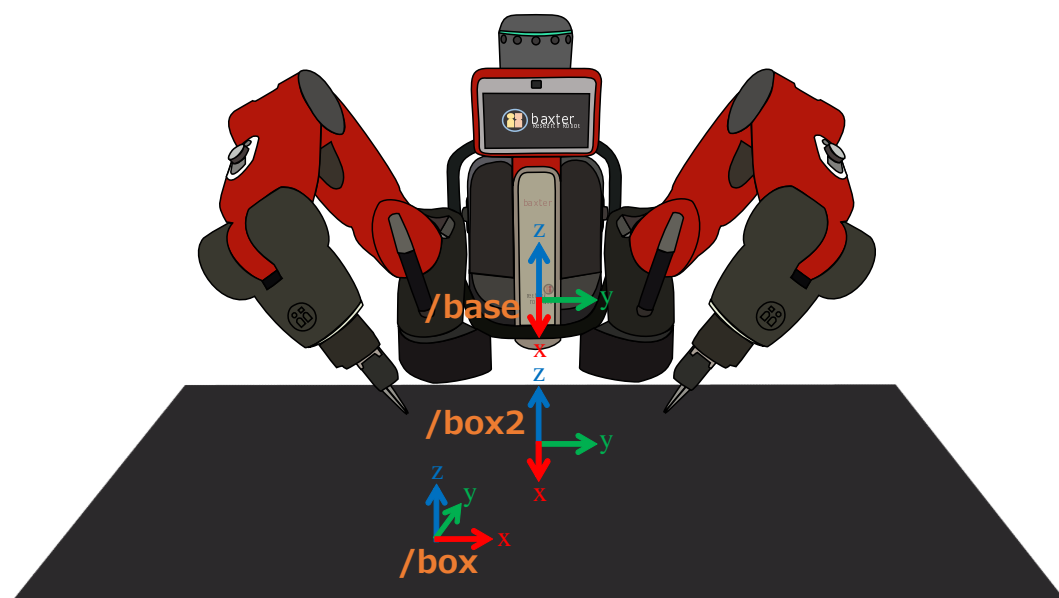


図 4.10: 各座標系の位置

4.3.2 スキル

本節では、紙の把持方法と対象物を包む動作について斜め包み作業中で用いるスキルとして提案する。

紙の把持

斜め包みの手順の過程には包装紙を把持してから包む動作が存在する。包装紙を把持する、つまり紙を把持する手法は持ち上げ動作を行い把持する方法 [20] や3指を使用して把持する方法 [21] など様々な手法が行われている。しかし、本研究においては机上にスポンジを置いているという条件下で作業を行うことを想定しているため、この特性を利用し図4.11のようにハンドの片指を包装紙の下に潜りこませて把持する手法を提案する。双腕マニピュレータで行うため斜め包みの手順上どうしても1本のアームのみで紙を把持しなければならないという条件にも当てはまり、この手法を使用するに至った。

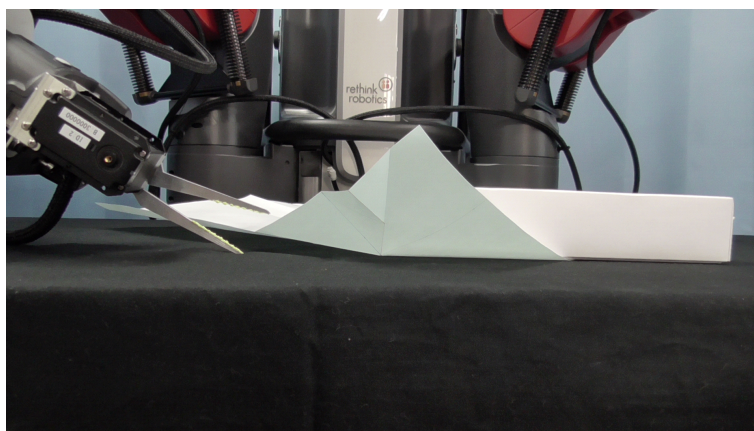


図 4.11: 包装紙の把持方法

紙の巻き付け動作

斜め包みには包装紙を把持してから対象物を巻くような形で包む作業を行う工程が存在する。本研究では、このような作業において図4.12のように円弧軌道を通り、包む作業を行

うこととする。包装紙を把持してから上記のような軌道以外を行うと、紙に想定外の折り目ができることがあり、包む作業完了後に美しくない状態となってしまう。よって、このような包む作業では紙がたわまないように常に張った状態を維持することで綺麗に包むことができる。

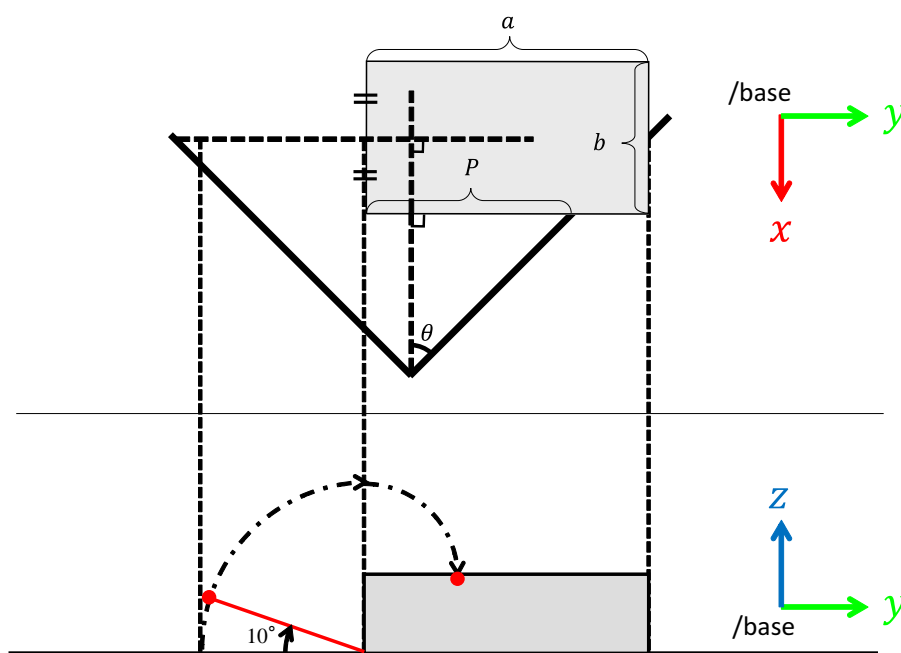


図 4.12: 円弧軌道を取る巻き付け作業

位置補正動作

理想の場所に対象物が存在していれば本研究の動作計画では理論上斜め包みの完成状態まで問題なく進むことができる。しかし、斜め包みでは対象物を反転させる動作が存在し、その時に誤差が発生してしまう。そこで理想の位置に対象物を補正するための動作を導入する。提案する位置補正動作とは図 4.13 のようにハンドの先端で対象物を挟むような形にし、移動させる方法である。対象物に対して縦と横の補正が存在する。そのため図 4.14 の点 a,b,c,d は横を補正する動作の時に使用し、縦の補正では点 e,f の場所にハンドを当てることで位置を補正できる。横の補正の時には点 a,b を左右のハンドで挟み、次に点 c,d を挟むこととす

る。縦の補正では点 e,f のみを行う。

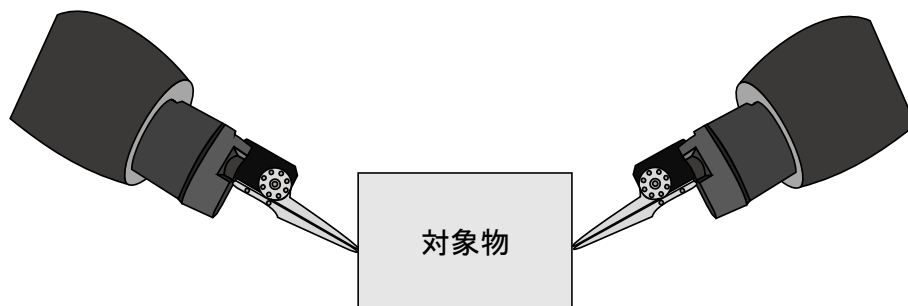


図 4.13: 位置補正動作の方法

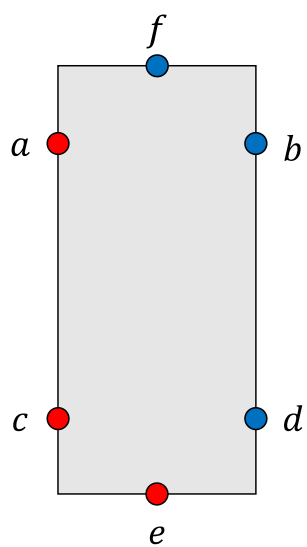


図 4.14: 位置補正動作で使用する点

4.3.3 斜め包み手順0

手順0では斜め包みを始めるための準備動作として、主に包装紙と対象物を配置する動作を行う。包装紙を配置する際には図4.15のように、ロボットのハンドが示した場所に包装紙の角と端を合わせる形で置くようにする。

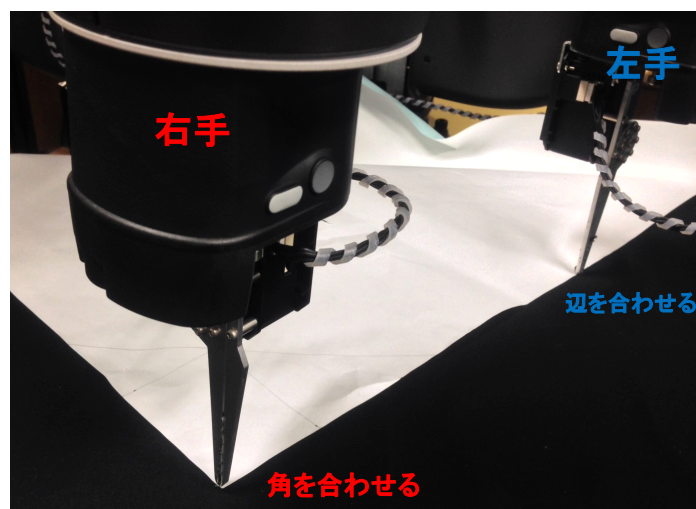


図 4.15: 包装紙の配置方法

手順0-1：包装紙の置く位置を提示する。

$$PL0-1 = \text{base}(P_{sp} - 0.3 \cos \frac{\pi}{4}, 0.3 \sin \frac{\pi}{4}, P_{dh}) \quad (4.1)$$

$$OL0-1 = \text{base}(0.9, 0.4, 0.025, 0.0) \quad (4.2)$$

$$PR0-1 = \text{base}(P_{sp}, 0.0, P_{dh} + 0.005) \quad (4.3)$$

$$OR0-1 = \text{base}(0.96, -0.28, 0.032, 0.025) \quad (4.4)$$

手順0-2：基本姿勢に戻る。

$$PL0-2 = \text{base}(0.580, 0.4, 0.108) \quad (4.5)$$

$$OL0-2 = \text{base}(0.135, 0.990, 0.019, 0.020) \quad (4.6)$$

$$PR0-2 = \text{base}(0.578, -0.182, 0.113) \quad (4.7)$$

$$OR0-2 = \text{base}(-0.142, 0.989, -0.010, 0.0223) \quad (4.8)$$

手順 1-2 : 対象物を強く押さえる.

$$PL1-2 = {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta + b + 0.05, 0.0, P_{dh} + c - 0.015) \quad (4.14)$$

手順 1-3 : 右手を紙の下にハンドを入れる場所へ行くための真上に位置する.

$$\begin{aligned} PR1-3 = & {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - 0.01, \\ & -(P + c + l_2) \cos^2 \theta - 0.05, \\ & P_{dh} + c) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$OR1-3 = {}^{base}(-0.015, 0.876, 0.479, 0.0307) \quad (4.16)$$

手順 1-4 : 右手を紙の下に入れる場所へ行くために下 (机上) に移動する. その後, ハンドを開く.

$$\begin{aligned} PR1-4 = & {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - 0.01, \\ & -(P + c + l_2) \cos^2 \theta - 0.05, P_{dh}) \end{aligned} \quad (4.17)$$

手順 1-5 : 開いた右手の片側を包装紙の下に潜りこませる.

$$\begin{aligned} PR1-5 = & {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - 0.01, \\ & -(P + c + l_2) \cos^2 \theta + 0.02, P_{dh}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

手順 1-6 : 開いた右手の片側を包装紙の下に潜りこませる. その後右手ハンドを閉じ包装紙を把持する.

$$PR1-6 = {}^{base}(0.67, 0.0, P_{dh}) \quad (4.19)$$

手順 1-7 : 前述のスキルのように円弧軌道を通り巻き付け動作を行う.

$$OR1-7 = {}^{base}(0.620, -0.608, -0.333, -0.368) \quad (4.20)$$

図 4.17 のように巻き付け動作後は左手で包んだ場所を押さえ, 次の動作に移る.

手順 1-12 : 次の動作に備えて対象物から遠ざける.

$$PR1-12 = {}^{box}(-0.1, (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c - 0.025, c + 0.1) \quad (4.29)$$

手順 1-13 : 同様に次の動作に備えてさらに対象物から遠ざける. その後, 右手を閉める.

$$PR1-13 = {}^{box}(-0.2, -0.1, c + 0.1) \quad (4.30)$$

4.3.5 斜め包み手順 2

手順 2 では 2 回目の包む動作を行う. 包装紙を把持して包む動作の前には折り込み部分の折り目へ望んでいる方向へ曲がるように力を加える動作を行う. 以上の動作が図 4.18 のような手順 2-1 から手順 2-4 までである.

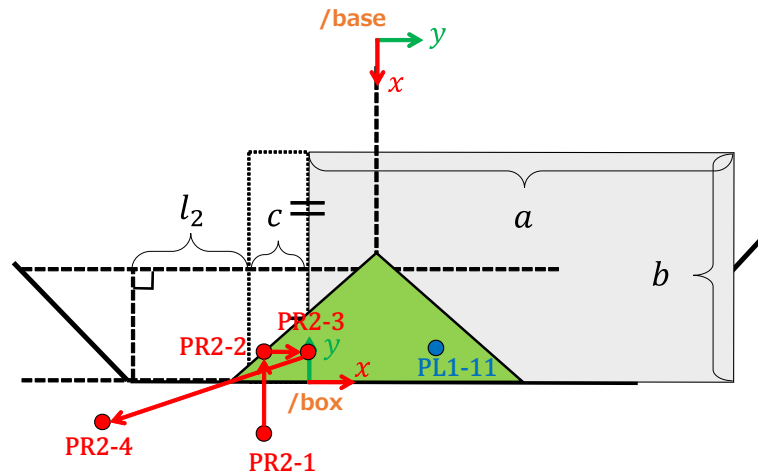


図 4.18: 手順 2 の折り込み動作

手順 2-1 : ロボットと逆側から右手を折り込み部へ移動する.

$$PR2-1 = {}^{box}(-0.01, -0.02, 0.03) \quad (4.31)$$

$$OR2-1 = {}^{box}(3.122, -0.004, 0.059) \quad (4.32)$$

手順 2-7 : 右手の片指を紙の下に入れる.

$$PR2-7 = {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta, -(P + c + l_2) \cos^2 \theta + 0.02, P_{dh}) \quad (4.40)$$

手順 2-8 : 把持点に移動後, 右手を閉じる.

$$PR2-8 = {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta + \frac{b}{2}, \\ -(P + c + l_2) \cos^2 \theta - \frac{b}{2} \tan(\frac{\pi}{2} - \theta) + 0.02, P_{dh}) \quad (4.41)$$

手順 2-9 : 円弧軌道後, 右手を開く.

包み動作の後は紙が浮いているところを平らにするため, 図 4.20 のようにすべり動作を行う.

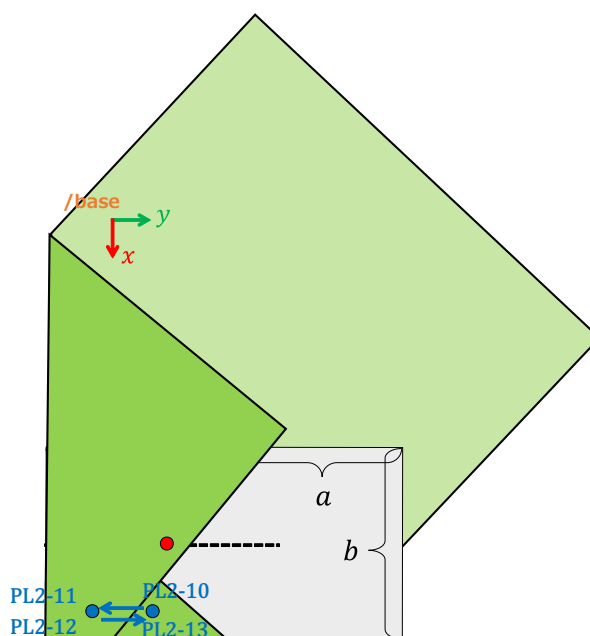


図 4.20: 手順 2 のすべり動作

手順 2-10 : 左手を少し浮かす.

$$PL2-10 = {}^{box}(\frac{Q}{2} + 0.05, \frac{(P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c}{3}, c + 0.03) \quad (4.42)$$

$$OL2-10 = {}^{box}(3.045, 1.002, -0.083) \quad (4.43)$$

手順 2-11 : 左手を紙が重なっている左へ移動する.

$$PL2-11 = {}^{box} \left(\frac{Q}{2} - 0.02, \frac{(P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c}{3}, c + 0.03 \right) \quad (4.44)$$

手順 2-12 : 左手で下へ移動し紙を押しやる.

$$PL2-12 = {}^{box} \left(\frac{Q}{2} - 0.02, \frac{(P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c}{3}, c + 0.01 \right) \quad (4.45)$$

手順 2-13 : 左手を右に移動する. その後, テープ止めをして手順 2 を終了する.

$$PL2-13 = {}^{box} \left(l_2, \frac{(P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c}{3}, c \right) \quad (4.46)$$

4.3.6 斜め包み手順 3

手順 3 では対象物の反転動作を行う. 図 4.21, 4.22 のようにまずは対象物の向きを変更する. その後反転動作を行う位置まで移動する.

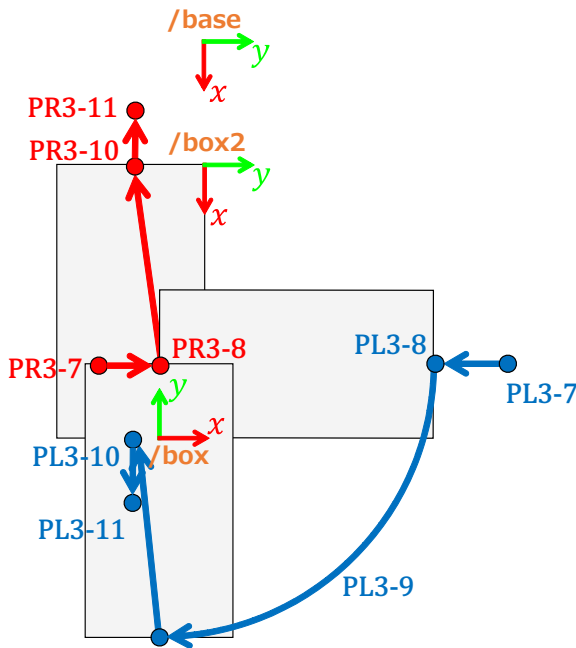


図 4.21: 向きを変える動作

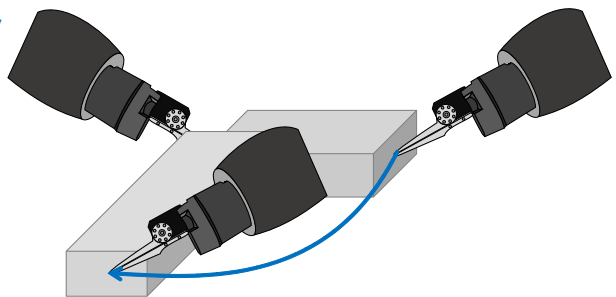


図 4.22: アームでの動作図

手順 3-1 : 右手を上げた後に, 右手を閉じる.

$$PR3-1 = {}^{base}(P_{sp} - (P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta + b, -0.1, P_{dh} + c + 0.1) \quad (4.47)$$

$$OR3-1 = {}^{base}(-0.161, 0.819, 0.551, -0.002) \quad (4.48)$$

手順 3-2 : 左手で対象物を押さえ, 右手で折り込み動作を行うため, 対象物の側面ラインの手前まで移動する.

$$PL3-2 = {}^{box}(P - (P + c + l_2) \sin^2 \theta, \frac{(P + c + l_2) \sin \theta \cos \theta - c}{2}, c) \quad (4.49)$$

$$OL3-2 = {}^{box}(3.06, 1.00, -0.09) \quad (4.50)$$

$$PR3-2 = {}^{box}(-0.05, b + 0.03, 0.03) \quad (4.51)$$

$$OR3-2 = {}^{box}(3.08, 0.0, 1.60) \quad (4.52)$$

手順 3-3 : 右手で折り込む箇所を押し込む.

$$PR3-3 = {}^{box}(0.02, b + 0.03, 0.03) \quad (4.53)$$

手順 3-4 : 右手で対象物の側面を押し込む.

$$PR3-4 = {}^{box}(0.02, b, 0.03) \quad (4.54)$$

手順 3-5 : 右手を対象物よりロボット側に移動する.

$$PR3-5 = {}^{box}(-0.1, b + 0.03, c) \quad (4.55)$$

手順 3-6 : 対象物を移動させるための適した位置と姿勢にアームを移動する.

$$PL3-6 = {}^{box}(a + 0.1, \frac{b}{2}, c + 0.1) \quad (4.56)$$

$$OL3-6 = {}^{box}(3.06, 1.00, -0.09) \quad (4.57)$$

$$PR3-6 = {}^{box}(-0.1, \frac{b}{2}, c + 0.1) \quad (4.58)$$

$$OR3-6 = {}^{box}(-2.2, 0.0, -1.5) \quad (4.59)$$

手順 3-7 : 対象物を左右から支えるために支える座標の手前の位置に移動する.

$$PL3-7 = {}^{box}(a + 0.1, \frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.60)$$

$$OL3-7 = {}^{box}(-2.2, 0.0, 1.5) \quad (4.61)$$

$$PR3-7 = {}^{box}(-0.1, \frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.62)$$

$$OR3-7 = {}^{box}(-2.2, 0.0, -1.5) \quad (4.63)$$

手順 3-8 : 対象物を左右から支える.

$$PL3-8 = {}^{box}(a, \frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.64)$$

$$PR3-8 = {}^{box}(0.0, \frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.65)$$

手順 3-9 : 対象物を横から縦に回転する

θ_1 を 0° から 90° まで 10° 刻みで変化させる.

$$PL3-9 = {}^{box}((a - 0.01) \cos \theta_1, \frac{b}{2} - (a - 0.01) \sin \theta_1, \frac{c}{2}) \quad (4.66)$$

$$(4.67)$$

手順 3-10 : 対象物に対して反転動作を開始する場所に移動する.

$$PL3-10 = {}^{box2}(a, -\frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.68)$$

$$OL3-10 = {}^{box2}(-2.2, 0.0, 3.0) \quad (4.69)$$

$$PR3-10 = {}^{box2}(0.0, -\frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.70)$$

$$OR3-10 = {}^{box2}(-2.2, 0.0, 0.0) \quad (4.71)$$

手順 3-11 : 対象物を支えていた手を離す.

$$PL3-11 = {}^{box2}(a + 0.05, -\frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.72)$$

$$PR3-11 = {}^{box2}(-0.05, -\frac{b}{2}, \frac{c}{2}) \quad (4.73)$$

図 4.23, 4.24 のように, 対象物に対して反転動作を行う. 手順 3-14 にて右手を対象物の下に潜らせ, その次に図のように斜め上に上昇することで対象物がうまく浮き上がる.

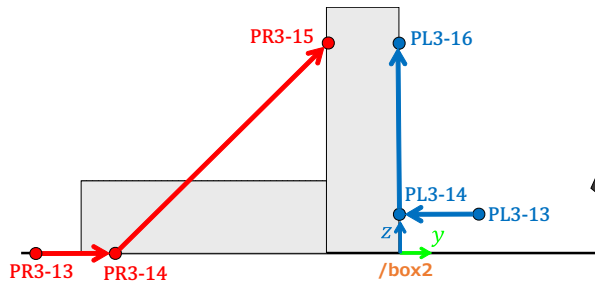


図 4.23: 反転動作

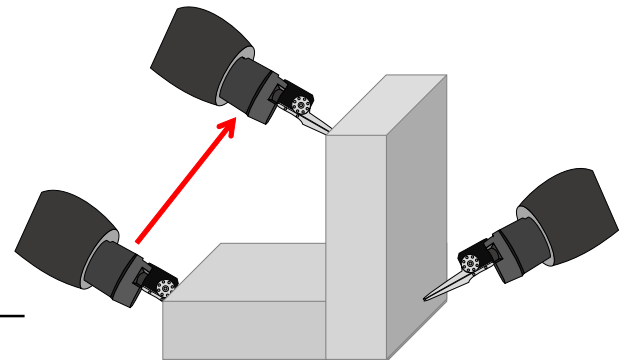


図 4.24: 反転する際のアームの動作図

手順 3-12 : 左右のハンドを左右に移動し対象物から離す.

$$PL3-12 = {}^{box2}(a + 0.05, 0.1, \frac{c}{2}) \quad (4.74)$$

$$PR3-12 = {}^{box2}(-0.05, -b - 0.1, \frac{c}{2}) \quad (4.75)$$

手順 3-13 : 左右のハンドを対象物の両端に移動する.

$$PL3-13 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, 0.1, c - 0.01) \quad (4.76)$$

$$PR3-13 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, -b + 0.02 - 0.1, 0.0) \quad (4.77)$$

手順 3-14 : 右ハンドを対象物の下に差し込み対象物を持ち上げる.

$$PL3-14 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, 0.0, c - 0.01) \quad (4.78)$$

$$PR3-14 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, -b + 0.02, 0.0) \quad (4.79)$$

手順 3-15 : 右ハンドを対象物と共に持ち上げ, 対象物を 90° 回転する.

$$PR3-15 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, -c, b - 0.02) \quad (4.80)$$

手順 3-16 : 左ハンドを上を上昇

$$PL3-16 = {}^{box2}(\frac{a}{2}, 0.0, b - 0.02) \quad (4.81)$$

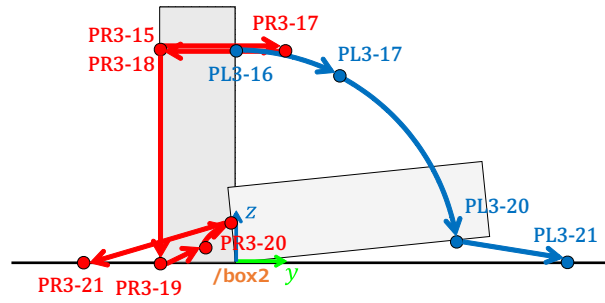


図 4.25: 手順 3 での対象物を倒す動作

図 4.25 のように対象物を倒す動作を行う。手順 3-17 で対象物を 30° 傾けて対象物が傾きの影響でずれないように手順 3-20 で支えつつ倒してゆく。

手順 3-17 : 右手で対象物を少し倒し、左手では完全に倒れないように支える。

$\theta_2 = 10$, i を 1 から 3 まで

$$PL3-17 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, (b - 0.02) \sin(i \times \theta_2), (b - 0.02) \cos(i \times \theta_2)\right) \quad (4.82)$$

$$PR3-17 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, -c + 0.02 \times i, b - 0.02\right) \quad (4.83)$$

手順 3-18 : 左ハンドは維持しつつ、右ハンドを手順 3-15 へ戻す

手順 3-19 : 右ハンドを机上まで下ろす

$$PR3-19 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, -c, 0.0\right) \quad (4.84)$$

手順 3-20 : 左手を徐々に下げて対象物を倒していき、右手では対象物が $box2$ 座標系の y 軸の負の方向へ動かないように支える。

$\theta_3 = 10$, i を 4 から 8 まで

$$PL3-20 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, (b - 0.02) \sin(i \times \theta_3), (b - 0.02) \cos(i \times \theta_3)\right) \quad (4.85)$$

$$PR3-20 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, -\frac{c}{2} \cos(i \times \theta_3), \frac{c}{2} \sin(i \times \theta_3)\right) \quad (4.86)$$

手順 3-21 : 左右のハンドを対象物から遠ざける

$$PL3-21 = \text{box2}\left(\frac{a}{2}, b + 0.1, 0.0\right) \quad (4.87)$$

$$PR3-21 = \text{box2}\left(\frac{a}{2}, -c - 0.1, 0.03\right) \quad (4.88)$$

4.3.7 斜め包み手順 4

手順 4 を開始する前に位置補正動作を横縦横の計 3 回行う。手順 4 では図 4.26, 4.27 のように、基本的に手順 1, 2 と同様に包み動作を行う。

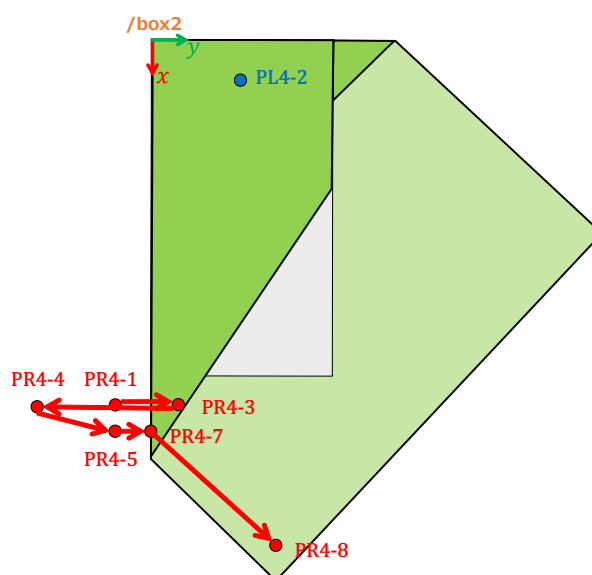


図 4.26: 手順 4 において折り込み動作後に包む

手順 4-1 : 折り込み動作をする前の位置に移動

$$PL4-1 = \text{box2}\left(0.05, \frac{b}{2}, c + 0.1\right) \quad (4.89)$$

$$OL4-1 = \text{box2}(-3.140, 1.007, 1.534) \quad (4.90)$$

$$PR4-1 = \text{box2}\left(a + \frac{3}{4}c, -0.05, \frac{3}{4}c\right) \quad (4.91)$$

$$OR4-1 = \text{box2}(3.078, 0.002, -3.114) \quad (4.92)$$

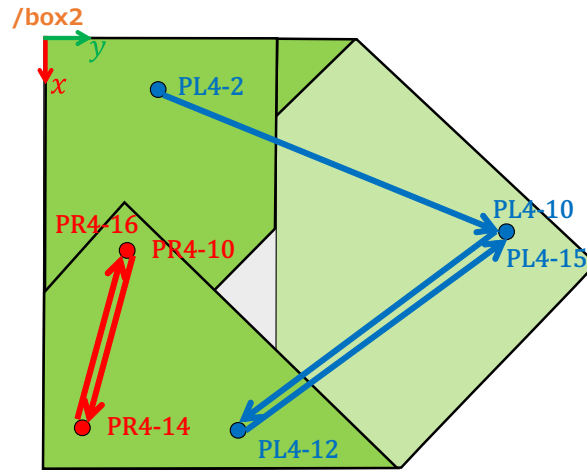


図 4.27: 包んだ所を押さえる動作

手順 4-2 : 左手で対象物を押さえる

$$PL4-2 = {}^{box2}(0.05, \frac{b}{2}, c) \quad (4.93)$$

手順 4-3 : 右手で折り込み部分を押し込む

$$PR4-3 = {}^{box2}(a + \frac{3}{4}c, 0.01, \frac{3}{4}c) \quad (4.94)$$

手順 4-4 : 右手を折り込み部分から遠ざける

$$PR4-4 = {}^{box2}(a + \frac{3}{4}c, -0.1, c + 0.1) \quad (4.95)$$

手順 4-5 : 包装紙を把持するために、折り込み部付近の手前に移動。その後右手を開く

$$PR4-5 = {}^{box2}(a + 0.05, -0.05, 0.0) \quad (4.96)$$

$$OR4-5 = {}^{box2}(2.143, 0.069, -3.141) \quad (4.97)$$

手順 4-6 : いきなり移動してしまうと対象物が移動してしまう可能性があるため、少し前で止まる

$$PR4-6 = {}^{box2}(a + c, -0.05, 0.0) \quad (4.98)$$

手順 4-7 : 右手を折り込み部付近へ指の片側を包装紙の下に入れる

$$PR4-7 = {}^{box2}(a + c, 0.0, 0.0) \quad (4.99)$$

手順 4-8 : 右手を把持点に移動. その後ハンドを閉じる

$$PR4-8 = {}^{box2}(a + r_1, L \cos \theta, 0.0) \quad (4.100)$$

手順 4-9 : 円弧軌道を通る巻き付け動作

その後, 右手を開く

$$ORA-9 = {}^{box2}(-3.050, 1.027, -1.5) \quad (4.101)$$

手順 4-10 : 包んだところを押さえる点に移動するため 1 回迂回する

$$PL4-10 = {}^{box2}\left(\frac{a}{2}, 2b, 2c\right) \quad (4.102)$$

$$PR4-10 = {}^{box2}(a - r_2, L \cos \theta, c) \quad (4.103)$$

手順 4-11 : 左手で包んだところを押さえるために押さえる点の真上に移動

$$PL4-11 = {}^{box2}(a - 0.03, b - 0.04, c + 0.1) \quad (4.104)$$

手順 4-12 : 左手で包んだところを押さえるために押さえる点に移動

$$PL4-12 = {}^{box2}(a - 0.03, b - 0.04, c - 0.005) \quad (4.105)$$

手順 4-13 : 右手を上昇. その後右手を閉じる.

$$PR4-13 = {}^{box2}(a - r_2, L \cos \theta, c + 0.1) \quad (4.106)$$

手順 4-14 : 右手を対象物の角へ下ろして, 対象物を押さえる

$$PR4-14 = {}^{box2}(a - 0.03, 0.03, c) \quad (4.107)$$

手順 4-15 : 左手を手順 4-10 に移動した場所まで移動させる

手順 4-16 : 右手を手順 4-10 に移動した場所まで移動させる

4.3.8 斜め包み手順5

手順5を始める前に位置補正動作を縦の点 f のみ行う。手順5は最後の手順であるため、包み動作後は右手を離すモーションを行い、その後にテープ止めをして終了である。各動作は図4.28, 4.29のような動きとなっている。ここで図4.28の長さ L_H は以下のような式で表される。

$$L_H = W - (2b + 2c + \gamma) \cos \theta - w \quad (4.108)$$

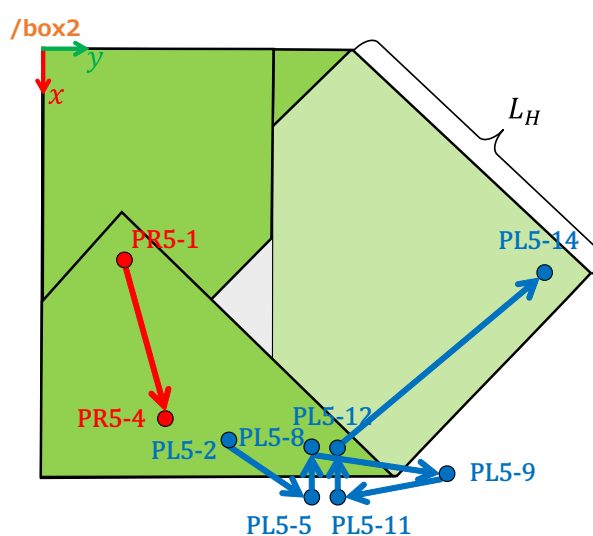


図 4.28: 手順5において折り込み動作後に包む

手順5-1：左手で対象物を押さえる点の真上まで移動

$$PL5-1 = \text{box2}(a - 0.025, \frac{4}{5}b, c + 0.1) \quad (4.109)$$

$$OL5-1 = \text{box2}(-2.113, 0.048, 3.113) \quad (4.110)$$

$$PR5-1 = \text{box2}(a - r_2, L \cos \theta, c - 0.005) \quad (4.111)$$

$$OR5-1 = \text{box2}(-3.064, 1.023, -1.506) \quad (4.112)$$

手順5-2：左手で対象物を押さえる点まで移動

$$PL5-2 = \text{box2}(a - 0.025, \frac{4}{5}b, c) \quad (4.113)$$

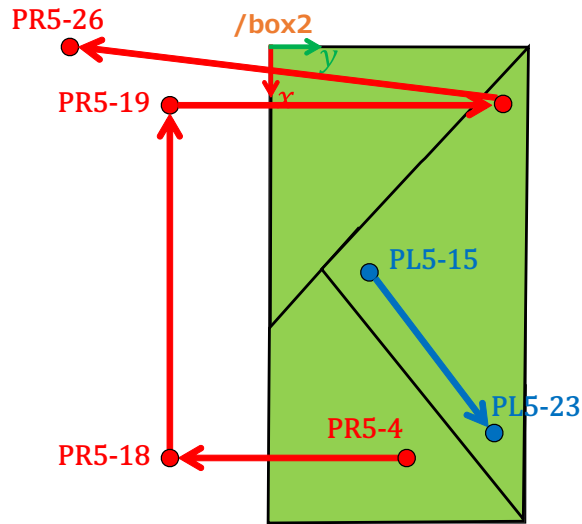


図 4.29: 終了動作

手順 5-3 : 右手で対象物を押さえる点の真上に移動

$$PR5-3 = {}^{box2}(a - 0.05, \frac{b}{2}, c + 0.1) \quad (4.114)$$

$$OR5-3 = {}^{box2}(-3.064, 1.023, -1.506) \quad (4.115)$$

手順 5-4 : 右手で対象物を押さえる点に移動

$$PR5-4 = {}^{box2}(a - 0.05, \frac{b}{2}, c - 0.005) \quad (4.116)$$

手順 5-5 : 左手を折り込み部の真上辺りに移動

$$PL5-5 = {}^{box2}(a + 0.05, b + 0.03, c + 0.1) \quad (4.117)$$

手順 5-6 : その場で左手の姿勢を変更

$$OL5-6 = {}^{box2}(-3.116, 0.033, -1.644) \quad (4.118)$$

手順 5-7 : 左手を折り込み部の手前に移動

$$PL5-7 = {}^{box2}(a + 0.05, b + 0.03, 0.03) \quad (4.119)$$

手順 5-8 : 左手で折り込み動作

$$PL5-8 = {}^{box2}(a - 0.01, b + 0.03, 0.03) \quad (4.120)$$

手順 5-9 : 左手を斜め上の場所に移動

$$PL5-9 = {}^{box2}(a, b + 0.1, c + 0.1) \quad (4.121)$$

手順 5-10 : 左手の姿勢を手順 5-1 に戻す

手順 5-11 : 左手を机上に移動. その後, 左手を開く

$$PL5-11 = {}^{box2}(a + 0.05, b + c, 0.0) \quad (4.122)$$

手順 5-12 : 左手の片指を包装紙の下に入れ込む

$$PL5-12 = {}^{box2}(a - 0.02, b + c, 0.0) \quad (4.123)$$

手順 5-13 : 左手を把持点の 3cm 近くに移動

$$PL5-13 = {}^{box2}(L_H \sin \theta, b + r_1 - 0.03, 0.0) \quad (4.124)$$

手順 5-14 : 左手を把持点に移動後, 左手を閉じる

$$PL5-14 = {}^{box2}(L_H \sin \theta, b + r_1, 0.0) \quad (4.125)$$

手順 5-15 : 円弧軌道を通る巻き付け動作

手順 5-16 : 引き続き左手で対象物を押さえる. その後, 左手を開く.

$$PL5-16 = {}^{box2}(L_H \sin \theta, b - r_2, c - 0.005) \quad (4.126)$$

手順 5-17 : 右手をやや上昇

$$PR5-17 = {}^{box2}(a - 0.05, \frac{b}{2}, c + 0.01) \quad (4.127)$$

手順 5-18 : 右手を対象物から離す

$$PR5-18 = {}^{box2}(a - 0.05, -0.1, c + 0.1) \quad (4.128)$$

手順 5-19 : 右手をロボット側に移動

$$PR5-19 = {}^{box2}(0.05, -0.1, c + 0.1) \quad (4.129)$$

手順 5-20 : 右手で対象物を押さえる場所の真上まで移動

$$PR5-20 = {}^{box2}(0.05, b - 0.025, c + 0.1) \quad (4.130)$$

手順 5-21 : 右手で対象物を押さえる点まで移動

$$PR5-21 = {}^{box2}(0.05, b - 0.025, c - 0.005) \quad (4.131)$$

手順 5-22 : 左手を 1cm 上昇

$$PL5-22 = {}^{box2}(L_H \sin \theta, b - r_2, c + 0.01) \quad (4.132)$$

手順 5-23 : 左手を対象物の角方向に移動

$$PL5-23 = {}^{box2}(L_H \sin \theta + (r_2 - 0.05) \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), b - 0.05, c + 0.01) \quad (4.133)$$

手順 5-24 : 左手を下げて対象物を押さえる. その後左手を閉じる

$$PL5-24 = {}^{box2}(L_H \sin \theta + (r_2 - 0.05) \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), b - 0.05, c - 0.005) \quad (4.134)$$

手順 5-25 : 右手を上昇

$$PR5-25 = {}^{box2}(0.05, b - 0.025, c + 0.1) \quad (4.135)$$

手順 5-26 : 右手を横に移動

$$PR5-26 = {}^{box2}(0.0, -b, c + 0.1) \quad (4.136)$$

4.4 まとめ

本研究における Baxter を用いたハードウェア構成と ROS を用いたソフトウェア構成について記載した。さらに前章の内容を基に斜め包みの作業記述を行った。斜め包み作業中の重要な動作についてはスキルという形でそれぞれ記載した。手順0から手順5までを前章の変数を用いて導出し、さらに3つの座標系を使用して表現した。

第5章 斜め包み作業システムの評価実験

第4章で述べた作業記述を基に実際に対象物を包装可能かを試す。本章では、実際の包装をするために用いた前提条件やロボットを動かした際の重要なポイントを各手順ごとに説明する。

5.1 評価実験の前提条件

本実験では前章までで導出した作業記述を基に斜め包み作業が可能かどうかを調べる。対象物の大きさ a, b, c のみを使用し作業記述まで求めるため視覚フィードバックを一切使用していない。

また、斜め包み作業の過程に存在する、包装紙を配置する作業、対象物を包装紙の上の決められた場所に配置する作業、手順2, 5で指定の箇所にテープ止めをする作業、については人間の手で行うものとする。

さらに、今回の実験では、事前に人間の手で包装紙に折り目を付けてからロボットによる斜め包み作業を行う。包装紙の折り目とは、全ての包みを行った後に包装紙に付く折り目の事である。この折り目は第3章にて展開図モデルを用いて計算した結果から事前に導出可能である。実際に実験を行う上で付けた折り目の場所については下記で詳細を述べる。

5.1.1 包装紙に付けた折り目

前述にもあった通り，本実験においては事前に折り目を付けた状態で斜め包み作業を開始する．折り目を事前に付けない状態で斜め包み作業を開始すると，望んでいない折り目が付いたり，包装紙が対象物に沿ってきれいに巻き付けることが困難となる．これらの問題を解決するために本研究ではロボットで斜め包みを行う前にあらかじめ折り目を付与しておくこととする．

今回事前に折り目を付けた場所については図 5.1 の通りである．この図に存在する折り目の端点 $p_1 \sim p_{27}$ は全て第 4.3.1 節で述べた box 座標系を基準に導出した．box 座標系は図に存在する x 軸と y 軸の点，つまり点 p_1 の位置である．

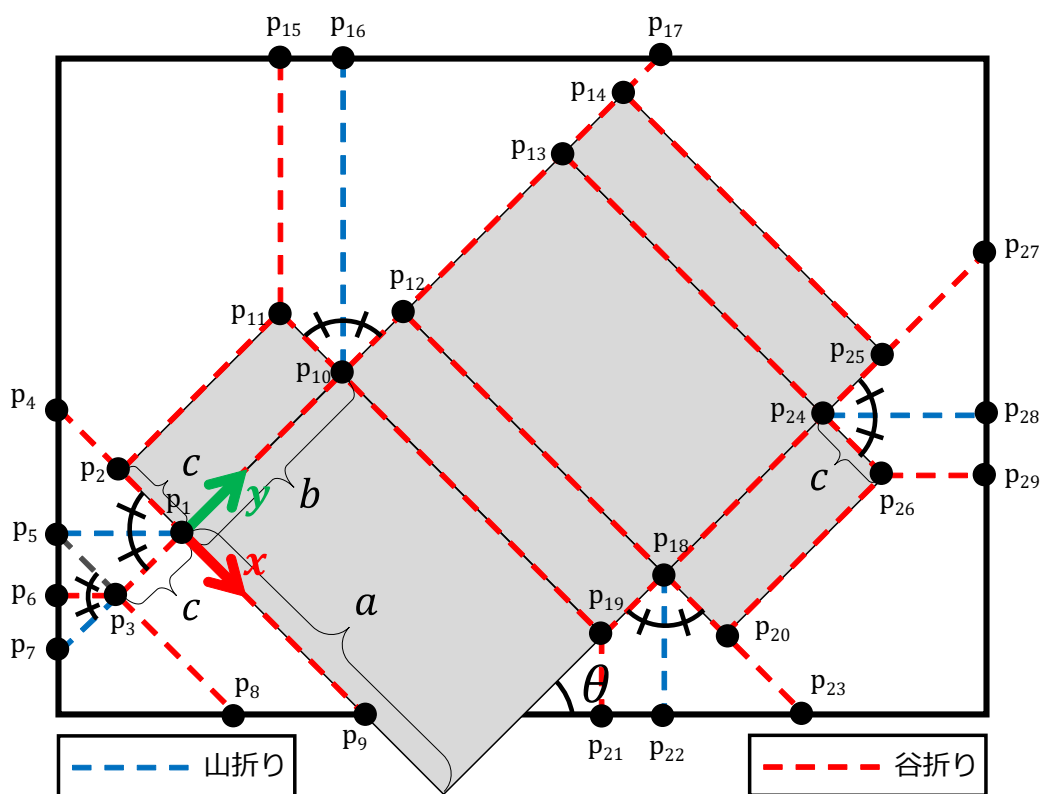


図 5.1: 本実験で付けた折り線

まず手順1,2において必要となるのが線分 $p_4p_9, p_3p_{10}, p_3p_6, p_3p_8, p_1p_5, p_3p_7, p_2p_{11}$ である.

$$p_1 = {}^{box}(0, 0) \quad (5.1)$$

$$p_2 = {}^{box}(-c, 0) \quad (5.2)$$

$$p_3 = {}^{box}(0, -c) \quad (5.3)$$

$$p_4 = {}^{box}(-(c + l_2), 0) \quad (5.4)$$

$$p_5 = {}^{box}(-(l_2 + c) \sin^2 \theta, -c) \quad (5.5)$$

$$p_6 = {}^{box}(-(l_2 + c) \sin^4 \theta, -c - (l_2 + c) \sin^3 \theta \cos \theta) \quad (5.6)$$

$$p_7 = {}^{box}(0, -c - (l_2 + c) \sin^3 \theta \tan \theta) \quad (5.7)$$

$$p_8 = {}^{box}(Q, -c) \quad (5.8)$$

$$p_9 = {}^{box}(P, 0) \quad (5.9)$$

手順3において必要となるのが線分 $p_{10}p_{17}, p_{11}p_{19}, p_{10}p_{16}, p_{11}p_{15}, p_{12}p_{18}$ である.

$$p_{10} = {}^{box}(0, b) \quad (5.10)$$

$$p_{11} = {}^{box}(-c, b) \quad (5.11)$$

$$p_{12} = {}^{box}(0, b + c) \quad (5.12)$$

$$p_{13} = {}^{box}(0, 2b + c) \quad (5.13)$$

$$p_{14} = {}^{box}(0, 2b + 2c) \quad (5.14)$$

$$p_{15} = {}^{box}(-c - ((b + 2c + \gamma) \sin \theta - c \cos \theta) \cos \theta, \\ b + ((b + 2c + \gamma) \sin \theta - c \cos \theta) \sin \theta) \quad (5.15)$$

$$p_{16} = {}^{box}(-(b + 2c + \gamma) \sin \theta \cos \theta, \\ b + (b + 2c + \gamma) \sin^2 \theta) \quad (5.16)$$

$$p_{17} = {}^{box}(0, 2b + 2c + \gamma) \quad (5.17)$$

手順4において必要となるのが線分 $p_{19}p_{24}, p_{18}p_{23}, p_{18}p_{22}, p_{19}p_{21}, p_{20}p_{26}$ である.

$$p_{18} = {}^{box}(a, b + c) \quad (5.18)$$

$$p_{19} = {}^{box}(a, b) \quad (5.19)$$

$$p_{20} = {}^{box}(a + c, b + c) \quad (5.20)$$

$$p_{21} = {}^{box}(a + ((a - b \tan \theta + c + \beta) \cos \theta - c \sin \theta) \cos \theta, \\ b - ((a - b \tan \theta + c + \beta) \cos \theta - c \sin \theta) \sin \theta) \quad (5.21)$$

$$p_{22} = {}^{box}(a + (a - b \tan \theta + c + \beta) \cos^2 \theta, \\ b + c - (a - b \tan \theta + c + \beta) \sin \theta \cos \theta) \quad (5.22)$$

$$p_{23} = {}^{box}(2a - b \tan \theta + c + \beta, b + c) \quad (5.23)$$

手順5において必要となるのが線分 $p_{13}p_{24}, p_{14}p_{25}, p_{24}p_{26}, p_{24}p_{28}, p_{24}p_{27}, p_{26}p_{29}$ である.

$$p_{24} = {}^{box}(a, 2b + c) \quad (5.24)$$

$$p_{25} = {}^{box}(a, 2b + 2c) \quad (5.25)$$

$$p_{26} = {}^{box}(a + c, 2b + c) \quad (5.26)$$

$$p_{27} = {}^{box}(a, 2b + 2c + (W - (W_1 + W_4)) \tan \theta) \quad (5.27)$$

$$p_{28} = {}^{box}(a + ((W - (W_1 + W_4)) \tan \theta + c) \cos \theta \sin \theta, \\ 2b + c + ((W - (W_1 + W_4)) \tan \theta + c) \cos^2 \theta) \quad (5.28)$$

$$p_{29} = {}^{box}(a + c + (((W - W_1 - W_4) \tan \theta + c) \cos \theta - c \sin \theta) \sin \theta, \\ 2b + c + (((W - W_1 - W_4) \tan \theta + c) \cos \theta - c \sin \theta) \cos \theta) \quad (5.29)$$

5.2 実験

前章までで対象物の大きさ a, b, c を用いて斜め包みの初期配置を求め、さらに2本のロボットアームを用いた斜め包み作業の記述を行った。本節では実際に前章で説明したシステムを用いて、前提条件の基ロボットによる斜め包み作業の動作検証を行う。さらに前章で説明した余分量 α, β, γ については全て 20[mm] とする。本節では、図 5.2, 5.3 の2種類の対象物を使用して斜め包み作業を行う。それぞれの対象物の大きさは表 5.1 の通りである。

表 5.1: 使用した対象物の大きさ

	a[mm]	b[mm]	c[mm]
対象物 1	240	175	46
対象物 2	200	200	50

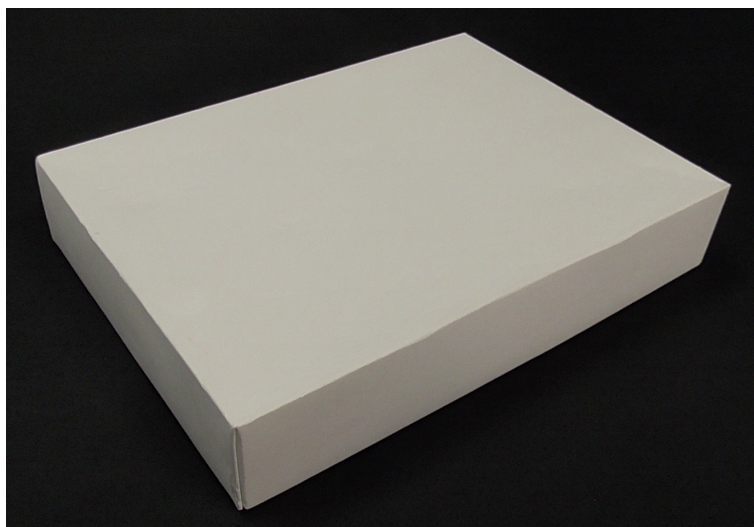


図 5.2: 対象物 1

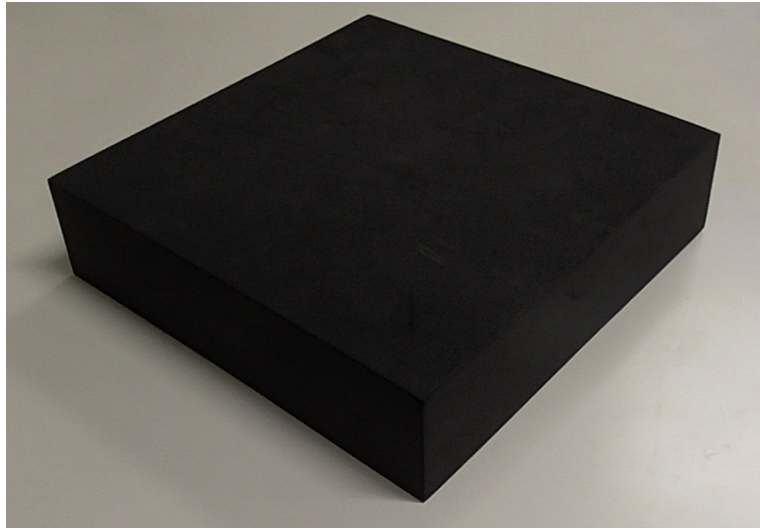


図 5.3: 対象物 2

5.3 結果

本実験の結果は表 5.2 のようになった。第 3 章で提案した手法により、対象物の角度、包装紙の大きさ、対象物の初期位置が導出された。これらの値を用いロボットアームによる斜め包み作業を記述した。前節で示した 2 つの対象物を用いて斜め包みを行った結果が図 5.4, 5.5 の通りであり、全ての手順を通して動作を行い成功する結果に至った。しかし、対象物 1,2 のそれぞれで最大 14[mm],25[mm] ほど紙が浮いてしまい、ラッピングの最終的な形としては必ずしも美しい状態であるとは言えない結果となってしまった。この結果は図 5.6,5.7 に示す。

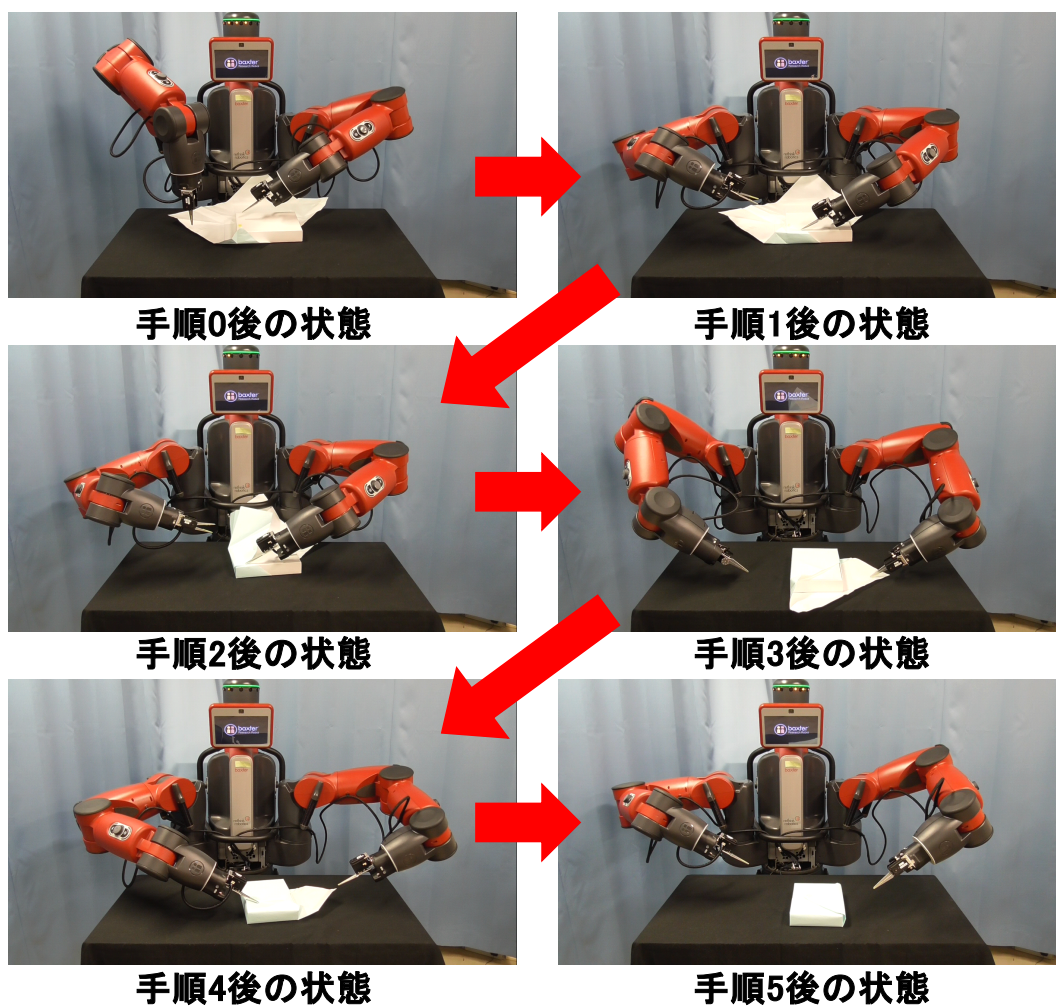


図 5.4: 対象物 1 の各手順完了時

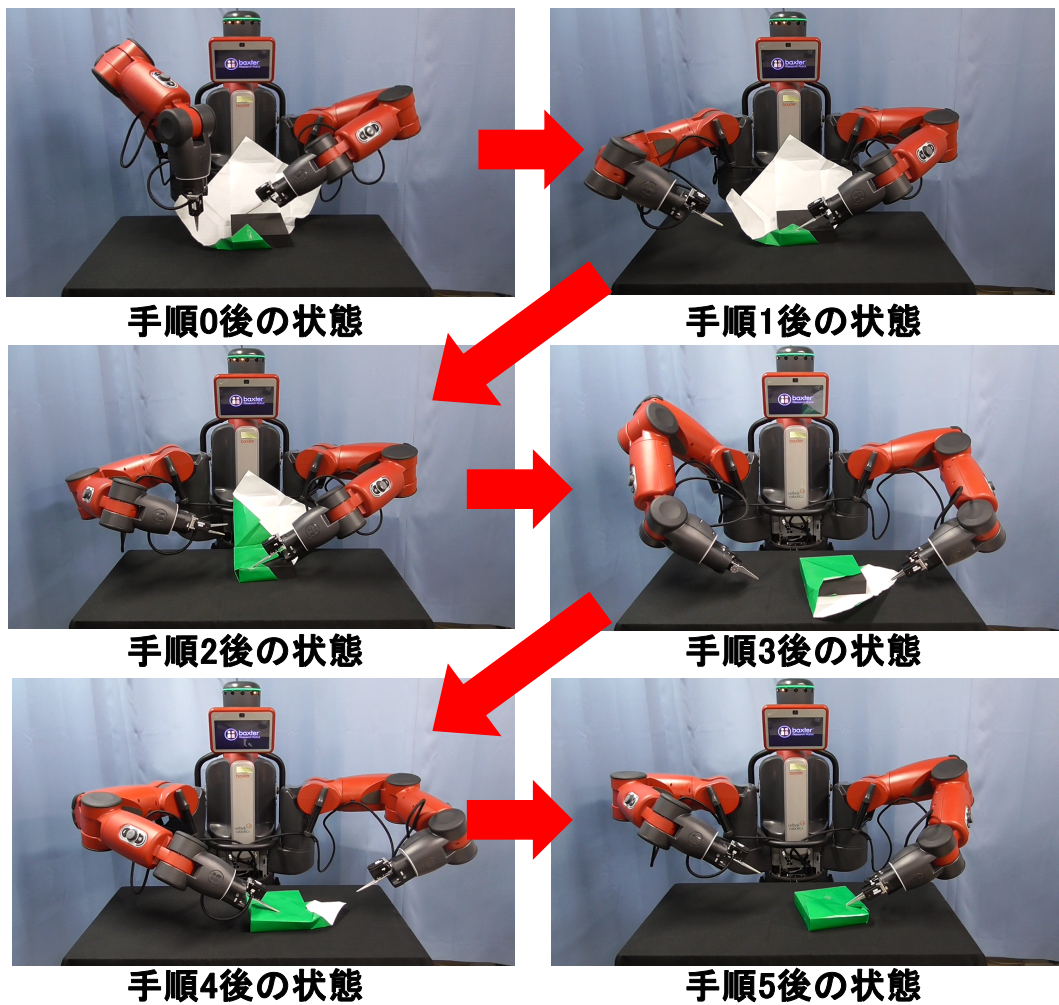


図 5.5: 対象物 2 の各手順完了時

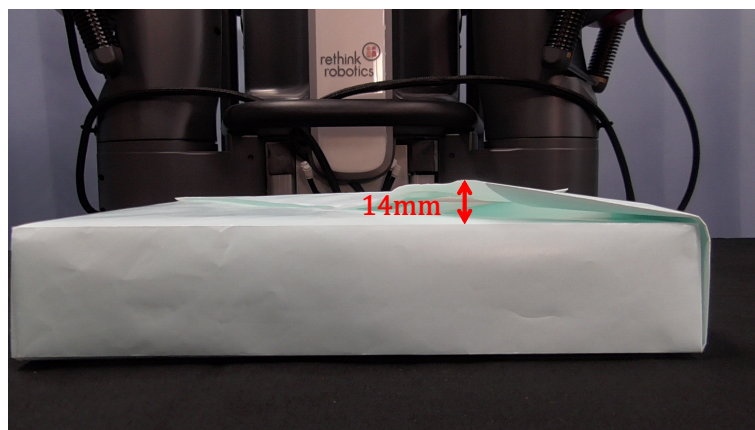


図 5.6: 対象物 1 の結果

表 5.2: ロボットによる斜め包み作業の結果

	対象物 1	対象物 2
対象物の角度 θ [°]	46.7	36.0
包装紙の縦 H[mm]	422.49	421.38
包装紙の横 W[mm]	559.28	602.82
対象物の初期位置 (縦)h[mm]	86.26	115.73
対象物の初期位置 (横)w[mm]	61.48	60.76
経過時間	29 分 15 秒	30 分 20 秒

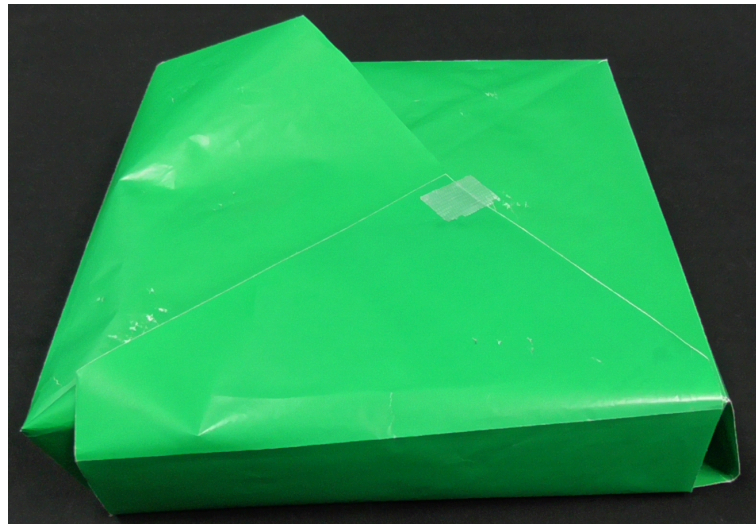


図 5.7: 対象物 2 の結果

5.4 考察

包装紙に事前に折り目を付け、配置作業やテープ止めを人間が行ったという前提条件下での実験であったが、斜め包み作業としては全ての手順において成功したと言えるだろう。しかし、対象物に包装紙が浮くことなく斜め包みを達成したわけではなく、結果として14[mm]間隔があき、包装紙が浮いた状態となってしまった。本来のラッピングにおける斜め包み作業としては綺麗な包みとは決して言えない。この結果になってしまった原因として、挙げられるのが各手順ごとでの誤差が最後の手順に影響した結果だと考えられる。各手順において片手で対象物を上から押さえつける形で支えていたが、対象物を本研究のようにロボットアームで支えるだけでは多少の誤差が発生した。そこで視覚フィードバックを用いて対象物がずれたとしても場所を認識することで今回のような誤差は減少するはずである。

5.5 まとめ

前章で記述した動作手順をロボットに実装し，ある対象物を使用し斜め包み作業が可能であるかを確認した．今回の実験では包装紙に事前に折り目を入れ，さらにテープ止めや配置作業は人間が行うものとし，全ての手順を最初から最後まで通して動作可能かを調べる．結果としては，14[mm]ほど間隔が空いたものの全ての手順を通して成功できた．

第6章 結言

6.1 本研究のまとめ

本研究では，双腕マニピュレータを用いて斜め包みを行うために対象物の大きさを基にした動作記述を提案し，主に次の項目について行った．

1. 対象物の大きさに対する初期配置の決定
2. 決定した初期配置に基づく斜め包み操作の設計
3. ロボットを用いた斜め包み作業

1において，本研究では対象物を直方体とし，その3辺の大きさより「包装紙の大きさ」と「包装紙上での対象物の初期位置」を導出した．導出方法として展開図モデルを用いて幾何学計算をし，使用する包装紙の面積が最小になるよう最小化計算を行い，包装紙上の対象物の角度を一意に決定した．その後，対象物の大きさである3辺と対象物の角度から，幾何学的に導出した初期位置と包装紙の大きさを求め，斜め包み作業の数式化を行うことができた．

2において，ほぼ全ての手順のアーム座標に対して第3章にて使用した変数を用いて作業手順を決定した．双腕マニピュレータを用いた斜め包み作業において必要な動作スキルを示した上で各動作を提案した．

3において，視覚フィードバックがないために多少の誤差は出たものの全ての手順を通して行い，結果として本研究の条件下において双腕マニピュレータでの斜め包み作業は成功した．さらに成功したことによって幾何学的解析を用いて動作記述をすることについての有効性を示した．

本研究は双腕マニピュレータによる斜め包み作業の基本的な動作計画の構築をしたことで、今後の発展に寄与することができた。

6.2 今後の課題

ロボットを用いた斜め包み作業を行い、現状のままでは人間が関与する工程がいくつか存在する。今後これらの箇所は全てロボットで行うことが望ましいと筆者は考えている。

事前に行う折り目の付与について、現状は人間があらかじめ指定場所に折り目を付けておく必要がある。しかし将来的には研究室内で折り紙ロボットの研究がされているように折り目を付ける専用のロボットに折ってもらうという可能性が存在する。

包装紙と対象物の配置について、現状はロボットが場所を指定してくれた場所に人間が配置するような動作を作っている。さらに包装紙上には対象物の置く位置が記述されているため対象物を置くタイミングで配置すればよい。しかしこれらの動作も人間の介入なしに完了するのが望ましい。対象物は視覚フィードバックによって発見でき移動可能と考えられるが、包装紙は薄く柔軟物であることから操作がとても困難な問題となる事が予想される。

テープ止めについては、あるタイミングで指定場所にテープ止めをすればよい。人間が通常テープ止めを行う際には片手でテープの束を持ち反対の手で切るため両手が必要である。しかし、テープ止めを片手で可能な器具が存在するため、それをロボットに固定し、テープ止め操作を行うことで片手操作が可能であると考えられる。

また、ロボットを用いた斜め包みの全手順において、視覚フィードバックを導入していないため各手順で誤差が生じる。特に手順3においての対象物の反転作業の際にはかなりの位置誤差が生じるために手順4と手順5のそれぞれの始めで位置補正動作を導入している。現在は誤差の発生が著しいところを以上のように補正しているが、補正動作をしたとしても正しい位置に対象物が位置しているかはわからない。そのためこれらも視覚フィードバックにより補正することが一番であると考えられる。

さらに今回はロボットの可動範囲を考慮していないために理論上は可能であるが、本研究で用いたロボットを使用した場合には実験で試した対象物と比べてより大きい物については失敗する可能性がある。そのため今後は可動範囲についても考慮すべきである。

謝辞

本研究を進めるにあたり，様々な視点から多くのご助言やご指導を頂いた末廣 尚士教授，工藤 俊亮准教授，富沢 哲雄助教に感謝の意を表します．本システムを作成するにあたり，とても多くのご指導を頂いた林 直宏氏に感謝の意を表します．また，ハンド作成や日々のご指導を頂いた松田 啓明氏に感謝の意を表します．最後になりますが，日頃の研究活動や学生生活など様々な場面でお世話になった知能システム学講座の皆さまのおかげで充実した研究室生活を送ることができました．ありがとうございました．

参考文献

- [1] Baxter research robot wiki. http://sdk.rethinkrobotics.com/wiki/Main_Page.
- [2] 平井慎一. 展望:柔軟物操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 136–139, 1998.
- [3] 宮田真由美. イチバン親切な ラッピングの教科書. 新星出版社, 2014.
- [4] Let's wrapping. <http://www.lets-wrapping.jp/index.html>.
- [5] 原田研介. マニピュレーション研究. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 320–325, 2013.
- [6] 原田研介. 「マニピュレーション研究の最前線」特集について. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 319–319, 2013.
- [7] 並木明夫. 高速マニピュレーション. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 358–363, 2013.
- [8] K. Harada, T. Foissotte, T. Tsuji, K. Nagata, N. Yamanobe, A. Nakamura, and Y. Kawai. Pick and place planning for dual-arm manipulators. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 2281–2286, 2012.
- [9] K. Huebner, S. Ruthotto, and D. Kragic. Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pp. 1628–1633, 2008.

- [10] I.G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, M. Kaneko, Chia-Hung Tsai, and Imin Kao. Nonprehensile dynamic manipulation of a sheet-like viscoelastic object. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 5103–5108, 2011.
- [11] A. Cosgun, T. Hermans, V. Emeli, and M. Stilman. Push planning for object placement on cluttered table surfaces. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4627–4632, 2011.
- [12] N. Vahrenkamp, T. Asfour, and R. Dillmann. Simultaneous grasp and motion planning: Humanoid robot armar-iii. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, Vol. 19, No. 2, pp. 43–57, June 2012.
- [13] Trinh Van Vinh. 単腕ロボットによる再利用性の高いひも結び動作の実現. 電気通信大学 IS 科 MS 専攻 2010 年度修士論文, 2010.
- [14] 工藤俊亮 末廣尚士 Trinh Van Vinh. マニピュレータによる柔軟紐の片手結び. 第 11 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会,, 2010.
- [15] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊. 高速ロボットアームを用いた柔軟紐の動的マニピュレーション. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 6, pp. 628–638, 2013.
- [16] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠. ロボットハンドの構造・運動を考慮した操りスキルの統合に基づく結び目の生成計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 283–291, 2013.
- [17] J. Maitin-Shepard, M. Cusumano-Towner, J. Lei, and P. Abbeel. Cloth grasp point detection based on multiple-view geometric cues with application to robotic towel folding. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 2308–2315, May 2010.
- [18] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊. 高速多指ハンドシステムを用いた布の動的折りたたみ操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 225–232, 2012.

- [19] 前田雄哉. 折り紙公理に基づいたロボットアームによる折り紙作業. 電気通信大学 IS 科 MS 専攻 2011 年度修士論文, 2011.
- [20] 西村国俊. 紙のハンドリング技術. 精密工学会誌, Vol. 55, No. 7, pp. 1169–1172, 1989.
- [21] A. Namiki and S. Yokosawa. Robotic origami folding with dynamic motion primitives. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 5623–5628, Sept 2015.
- [22] 横小路泰義. 折り紙を折るロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 334–340, 2013.
- [23] 島貫博, 加藤ジェーン, 渡邊豊英. 展開図を用いた折り紙操作過程における手順毎の折り方構成. 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 102, No. 55, pp. 71–78, 2002.
- [24] 松島健太, 島貫博, 渡邊豊英. 紙類包装手順の設計 (一般セッション, センシングのための認識・理解). 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 108, No. 46, pp. 7–12, 2008.
- [25] 寺田英嗣, 輻形和幸. 風呂敷包み作業用マルチロボットシステムの運動計画法. 精密工学会誌, Vol. 76, No. 5, pp. 546–551, 2010.
- [26] 輻形和幸, 寺田英嗣. 3245 風呂敷包み作業用複数台ロボットシステムの運動計画法 (s38-1 機構の開発とシミュレーション (1), 21 世紀地球環境革命の機械工学: 人・マイクロナノ・エネルギー・環境). 年次大会講演論文集: JSME annual meeting, Vol. 2008, No. 4, pp. 187–188, 2008.
- [27] 加納崇光. 主観的輪郭を用いたラッピング支援. 情報処理学会 インタラクション 2010, pp. 173–176, 2010.
- [28] 宮岡宏会. 決定版 ラッピングの教科書. ナツメ出版企画, 2013.

[29] 小倉崇. ROS ではじめるロボットプログラミング. 株式会社工学社, 2015.

[30] Ros.org. <http://wiki.ros.org/>.