

# 双腕ロボットシステムを用いた異種矩形布生地 of 操作

## A Dual-Armed Manipulation System for Unfolding and Folding Rectangular Clothes

○ 栗林祐介 (信州大) 学 吉岡優太 (信州大)  
 吳天鍼 (信州大) 恩田佳祐 (信州大)  
学 山崎隆広 (信州大) 高瀬裕 (信州大)  
 Solvi Arnold (信州大) 正 山崎公俊 (信州大)

Yusuke KURIBAYASHI, Yuta YOSHIOKA, Wu TIANCHENG, Keisuke ONDA,  
Takahiro YAMAZAKI, Yutaka TAKASE, Solvi ARNOLD, Kimitoshi YAMAZAKI, Shinshu University

This paper describes a robot system capable of unfolding and folding manipulations of different rectangular cloth products. Cloth, a kind of flexible object, is an object with the property of transforming into various shapes, and it is difficult to predict or estimate its state when manipulating it. Therefore, we propose a robot system consisting of a pair of serial-link manipulators and one RGBD camera, and motion sequences for the system based on empirically obtained characteristics of cloth motion. Experiments were conducted in three different situations: folding to a right-angle four-fold, and unfolding from a right-angle four-fold or from a crumpled. The results confirm that the manipulation was successful for all combinations of nine different rectangular-shaped cloths and three different situations.

**Key Words:** dual-armed manipulation, flexible material operation, livelihood assistance

### 1. 緒言

自動機械に布を操作させることは、挑戦的で困難な課題である。困難である理由は布が柔軟物であるという事実に起因する。柔軟物は、変形しうる性質を持つ物体である。操作を加えたい立場からすると、これは取り得る状態の数が無限にあることを意味する。そのために状態予測や状態推定が困難になり、結果として操作の戦略も立てにくくなる。この事実は知能ロボット分野でも十分に認識されており、そのうえでロボットに折り畳み等の操作を実現させようとする研究が多く存在する[1-3]。しかしながら、技術的にはまだ完成されているとは言えない。

この状況を打破するために、研究者のコミュニティでは様々な個人研究が進められていくだろう。それに加え、研究者コミュニティの底上げをしようとする魅力的な活動も進んでいる。その一つは、Robotic Grasping and Manipulation Competitions (RGMC) [4]の一つとして企画された Cloth Manipulation Track [5](以後、CMT と称する)である。RGMC は IROS や ICRA などのトップクラス国際会議に併設されており、CMT もその一環として2022年10月に開催された。そこでは、様々な種類の矩形の布製品が設定され、把持点を適切に検出したり、テーブル上にその布製品を展開したり、適切な形に折りたたむことなどが課された。矩形の布に限定されているとはいえ、これらのタスクには布操作の基本事項が多く組み込まれており、よく練りこまれた課題設定である。

本研究の目的は、CMT で課されたすべての課題に対応できるロボットシステムの構築である。このため、RGBD カメラと2台のシリアルリンクマニピュレータを用いる。そして、認識および動作生成の機能をそれぞれ実装する。また、把持を適切に完遂するためのエンドエフェクタを新たに開発する。これらにより、布製品の大きさが様々であったり、布地の硬さおよび表面性状が様々である場合でも、それらの展開や折り畳みを可能にする。

本研究の貢献は次のとおりである。

- **Unfolding** および **Folding** の両方に対して、それらを達成するための動作シーケンスを考案した。小さな矩形布はもちろん、マニピュレータの可動範囲を超える大きさの布製品についても、テーブルを利用した成形などにより所望の操作を加える方法を示した。

- 布地の把持は、フチを掴む場合と、フチ以外の部位を掴まみ上げる場合の両方があり得る。これらを適切に実行可能にするためのデュアルエンドエフェクタを提案し、その駆動方法も示した。
- 上記2項目を備えたロボットシステムを用いて、CMT で用いられた布セットに対して **unfolding** および **folding** の実験をおこない、その結果を整理した。

### 2. Cloth Manipulation Track

CMT は、Household Cloth Object Set [6]に含まれる矩形の布製品を折り畳む競技と展開する競技からなる。競技のために用意された布は全部で15種類であり、個体数としては27である。それぞれ大きさ・硬さ・厚さが異なる。また、中には枕ケースなどの袋状になっている布製品もある。

競技で用いるテーブルは、対象となる布がすべてテーブル内に収まるために最低でも700×1200mmの大きさであることが求められる。センサは色または深度が取得できるものとし、テーブル全体を見下ろせる位置に設置する。また、本競技はオンラインで開催されたため、ロボットシステム全体を映せる位置と自由に動かせる手元の位置にカメラを設定することが義務づけられた。

競技は **Perception track** と **Manipulation track** に分かれている。さらに、**manipulation track** は **folding task** と **unfolding task** に分かれている。そして、二つの **track** で得られる点数を競う。

**Perception track** では、広げて置かれた布、直角四つ折りに畳まれた布、無造作に置かれた布のそれぞれから角部を検出することが求められる。そして、検出した角部に関して、ハンドをアプローチさせる方向を示す矢印を撮影画像に重畳表示させ、出力する。これを、布と置き方を変えながら10回おこない、角部の認識精度と角部への接近方向の正確さなどを評価する。

**Manipulation track** では、**folding** と **unfolding** の2種類の作業を実行する。制限時間は75分である。ここでは、布の角部にカラーマーカーを貼り付けることも許されているが、マーカーを用いない場合はボーナスポイントが入る。この **track** は、参加者が布を置くことから始まる。ただし、恣意的な置き方をすることでタスクを優位に進めることを防ぐために、参加者が布をセットした後、審査員側から指示されたとおりに布を動かすことを要求される。以下に、各タスクのルールを記す。

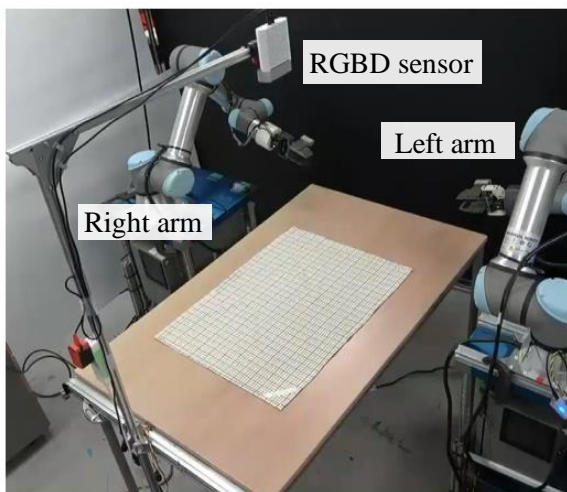


Fig. 1. Robot system

- **Folding task:** 布製品をテーブルの上に広げて置く。そして、その布製品を制限時間内に直角四つ折りに折りたたむ。布製品を変えて計6回試行する。結果の評価は、折り畳みの品質(折りたたまれた布が広げられた布の1/4の大きさであるかどうか、重なり具合が整っているか、しわの少なさ、など)や、折りたたんだ布が最終的にテーブル内に完全に収まっているかなどに基づく。
- **Unfolding task:** 布製品をテーブルに広げて置くタスクである。布製品の初期状態は2種類あり、一つは直角四つ折りの状態である。もう一つは無造作に置かれた状態である。それぞれ3回ずつ、布製品を変えて試行する。結果の評価は、展開されたあとの品質(しわや重なり具合)や展開した布がテーブル内に収まっているかに基づく。

### 3. ロボットシステムと操作戦略

#### 3.1 アプローチ

上記の課題に対応するため、筆者らは以下のアプローチを採る。認識については、直上からテーブルを撮影するように設置された RGB-D カメラを用いて、把持点を自動で検出する。操作については、コンパクトな構成を心掛け、人の腕程度のシリアルリンクマニピュレータを2台用いることとする。ただし、これでは布を完全に持ち上げるなどの目的には可動範囲が不測する。そこで、テーブルのヘリから布製品を能動的に垂れ下げるなどにより、環境構造を積極的に利用する操作手順を考案する。

また、操作を適切に実現するにあたり、ロボットハンドは重要な要素である。タスクによっては布を掴むように持つことが適切な場合があるし、別のタスクでは布を掴み上げる方法が適切な場合もある。また、基本的に双腕操作が必要である。しかし、必要なエンドエフェクタの数だけマニピュレータを設置することは望ましくない。また、すべての作業を担える多指多関節ハンドを使う方針もあるが、費用がかかる。そこで、エンドエフェクタ部に複数の二指ハンドを取り付け、作業目的に応じて使い分ける方針を採る。この詳細は4章に述べる。

#### 3.2 ロボットシステム

図1は構築したロボットシステムの外観である。テーブルを中心として2台のシリアルリンクマニピュレータ (Universal Robots 社, UR5e) を固定した。これらのマニピュレータにはそれぞれの役割があるため、以降の説明では、写真の通りに左右を区別する。また、把持点検出等に用いるために Azure

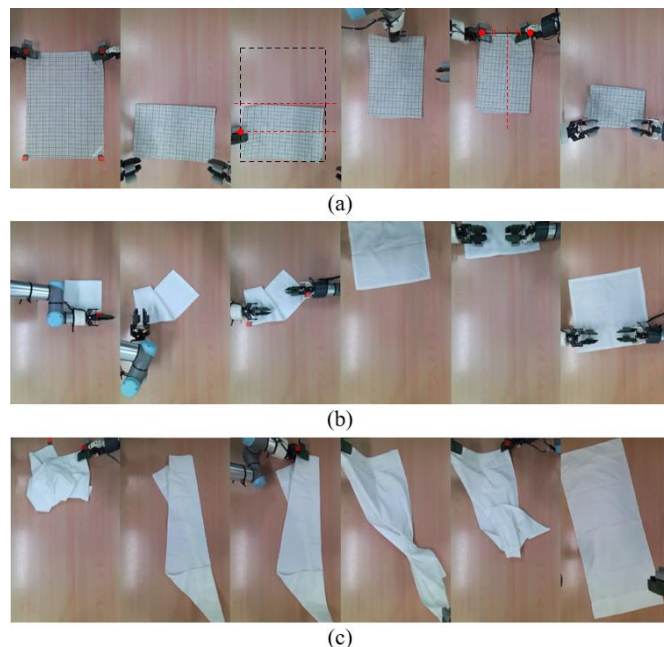


Fig. 2. Motion sequence for each task

Kinect をアルミ材で作成したアームの先端に設置し、テーブル全体が撮影できるようにした。処理速度および不測の処理遅延を避けるため、ロボットの動作を実行する PC と布の状態認識をおこなう PC を分けることとした。また、ロボットシステムのソフトウェア実装においてはロボティクス分野で広く使われている ROS を用いた。

#### 3.2 操作戦略

本節では、Folding task および Unfolding task について、筆者らのマニピュレーション戦略を紹介する。操作方法は以下の3つのパターンそれぞれについて個別に存在する。

- 展開されている布製品の Folding
- 四角く折り畳まれている布製品の Unfolding
- 無造作に置かれている布製品の Unfolding

このほかに、無造作に置かれている布製品を折り畳む作業も従来研究ではよく対象とされるが、このタスクは上記の組み合わせで対応可能である。具体的には、(c)のための操作手順をおこなったのち、(a)のための操作手順をおこなえばよい。以下では(a)から(c)をそれぞれ説明していく。

(a)に示したタスクの実行手順は以下のとおりである。図2(a)も参照されたい。

- 布製品の角部を検出し、掴む。
- 見つかった角部のうち、それぞれのマニピュレータの根本に最も近い位置にある角部を把持対象として決定し、それぞれ両手で把持して布製品を半分折りたたむ。
- 角部を把持していた位置から布の長辺の1/4の長さ分、上方の位置を把持する。そのまま布を鉛直軸まわりに90度回転させる。
- 把持していた位置に布の中心線が通ると仮定し、布の角部を推定して両手で把持する。そして、もう一度折りたたむ。

以上の手順により、可動範囲を超えないように布を回転させたり持ち替えたりして、折り畳みを完遂する。

(b)に示したタスクの実行手順は以下のとおりである。図2(b)も参照されたい。

- 布製品の角部を検出する。その角部は4枚の布地が重

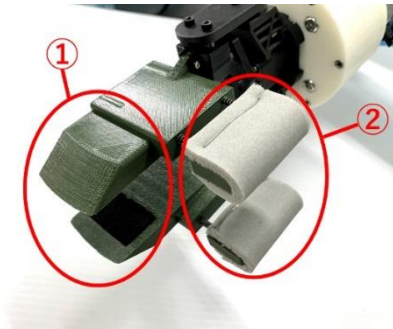


Fig. 3. End-effector with two types of gripping part.

なっているので、そのうち上二枚を把持する。この把持方法については次章を参照。

- (2) 布を持ち上げ、把持した面が下の面に引っかからないよう、円弧軌道を描きながら展開する。
- (3) 展開した布製品の角部のうち、下方にある角部を検出する。検出した角部の近くで布生地の上一枚だけを掴み、一度展開する。
- (4) 布の大きさに応じて適度な位置までハンドを戻し、両方のロボットハンドで布製品全体を押さえながら動かすことで、布の一部をテーブルの縁から垂らす。
- (5) 押さえを外さずに手の位置を下方に移動させることで、布製品がテーブル上に展開された状態にする。

この動作のポイントは、布をテーブルの外に垂らすことにより布の整形を達成するところである。また、この動作を実現するには重なっている布の上面のみを把持するといった器用さが求められる。そのため、ロボットハンドやその動作方法にも工夫がある。この詳細は次章で述べる。

最後に、(c)に示したタスクの実行手順を説明する。図 2(c)も参照されたい。

- (1) 布製品の角部を検出し、UR5(左)の根本に一番近い角部を片手で掴む。
- (2) 布を把持しながら一度持ち上げ、テーブルの縁に引っ掛けるようにしながらテーブルに広げる。この時、図 2(c)左から 2 枚目の写真のように把持している角部の対角に位置する角部が末端に来るような形状を作る。
- (3) 把持している角部の対角の角部が末端にあるという事前知識に基づいて、その角部を検出し、把持する。
- (4) もう一度、テーブルの縁を使って一度テーブルに広げる。この時、図 2(c)左から 4 枚目のような UR5(右)が把持している角部の短辺側の隣り合う角部が UR5(左)の前に来るような形状を作る。
- (5) UR5(左)が近くの角部を把持する。この時も、システムは把持する角部が UR5(左)の前に来るという事前情報を持ちながら認識する。
- (6) 最後に、布をテーブルの外に垂らし、縁を使って広げる。

この動作のポイントは、高度な認識技術や巧みな把持方法を必要とせず、テーブルの縁を使うことで様々な種類の布で同じような形を作ることができることである。すなわち同じ動作シーケンスでタスクを実行できる。

## 4. 視覚処理とエンドエフェクタ

### 4.1 角部の検出

Perception track では、布製品の角部を適切に検出することが求められる。筆者らには、角部検出の手法として YOLO[7]を

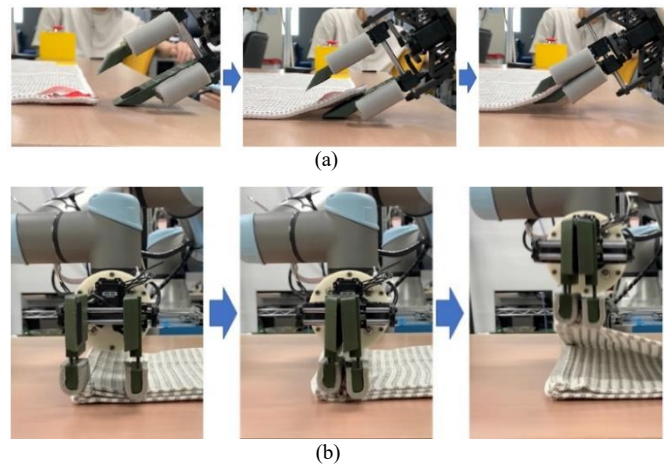


Fig. 4. Picking up a cloth part: (a) Scooping-based hem grasping, (b) Picking up using friction

用いることが有効であるとの知見があるため[8]、ここでは YOLO v7 を転移学習することで角部検出器を構築する方針を採る。

YOLO の学習にあたっては、布製品の角部にカラーマーカーを張り付け、次の手順によっては学習データを収集した。まず、布製品の RGB 画像および深度画像を取得する。その後、RGB 画像に対して HSV 色抽出と GrabCut [9]を適用することで、テーブルの領域を排除し布領域のみが映りこむようにする。次に、カラーマーカーを抽出することで、布の角部の画像座標を取得する。最後に、角部の座標と布の深度画像を対応させ、教師データとして記録する。ただし、ここで利用する深度画像は、テーブルの位置を 0 とし、カメラ方向にある一定の距離進んだ位置を 1 とする正規化を施した。これは深度情報の特徴を際立たせることで、しわや折り目などを角部と区別させ、検出精度を上げるためである。学習は、展開された布・折りたたまれた布・無造作に置かれた布のすべてのパターンで行い、収集した学習用画像の枚数は約 5600 であった。また、回転・拡大・ずらし・画像統合の 4 パターンで水増し処理もおこなった。

角部へアプローチしに行く方向を表す矢印は、認識により取得した角部と認識した角部付近をクロップし、エッジ検出において取得した点を結ぶ直線を矢印の傾きとして作成した

### 4.2 エンドエフェクタ

布製品を折り畳みおよび展開する作業では、どのように変形させたいかに応じて、布のどこを掴むか、どう掴むかを変える必要がある。一方で、複雑なハンドを構築して制御するのは負荷が大きい。本研究では、課せられたタスクに求められる把持方法を整理し、安価で構築できるシンプルなハンドによってそれらに対応するアプローチを採る。

図 3 は製作したエンドエフェクタの概観である。二つの平行グリップが直交して存在している。①として囲んだ部分は、布生地をフチを把持するためのグリップである。片方の指を布生地の下に滑り込ませ、その後に指を閉じることで把持をおこなう。展開されてテーブル上に置かれた布生地を掴み上げる目的に適している。②として囲んだ部分は、布生地の面を把持するためのグリップである。指先を布面に押し付け、その状態で指間の距離を狭めることで布の一部を浮き上がらせ、その部位を把持する。この様子を図 4 に示す。

②のグリップおよび把持方法の工夫を説明する。まず、指先には滑り止めのためのスポンジをつけている。また、布生地の



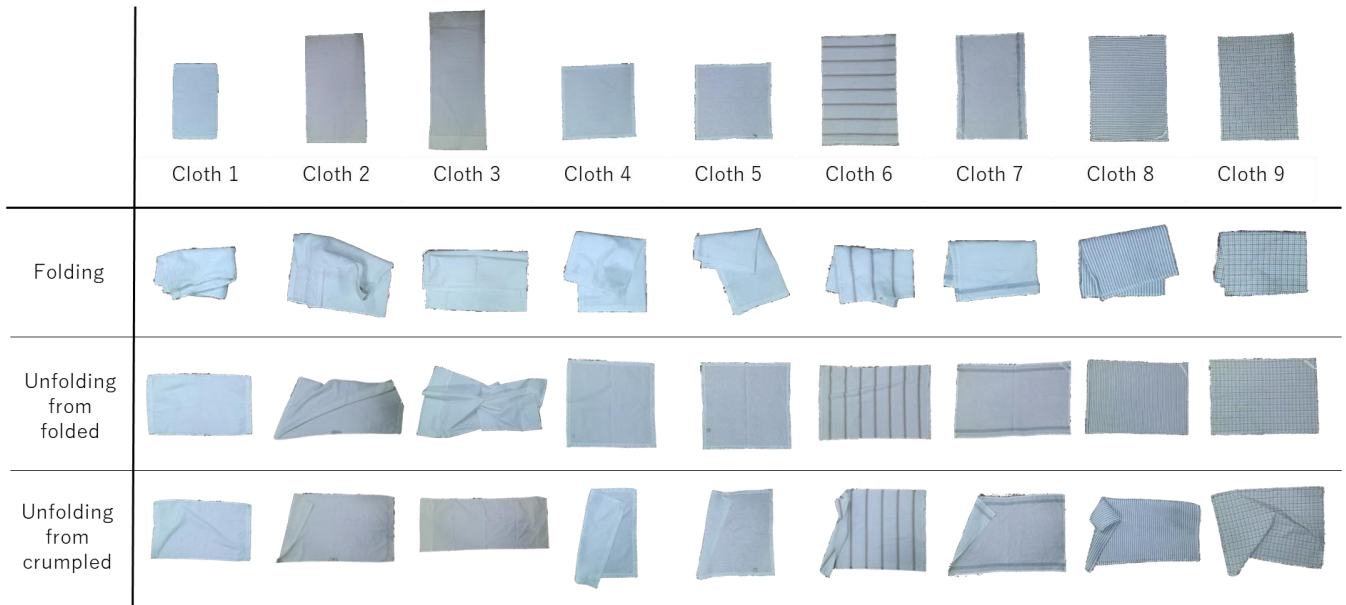


Fig. 5. The final shapes of cloth after manipulation

硬さの違いや重ねられた枚数などに対応するために、鉛直方向にスライドできる機構がある。ただし、そこにはばねが仕込まれており、スポンジと合わせて布と指の間に適度な摩擦を生じさせる仕組みである。なお、このグリッパで布が複数枚重なった状態から、安定的に一枚だけ持ち上げるには、ハンドを少しずつ上昇させると同時にグリッパの開き幅も少しずつ狭めていくよう連動させることが効果的であった。

## 5. 検証実験

Household Cloth Object Set のうち、9 種類の布を選択した。具体的には、Bath towel(small, middle), Rect pillowcase, Dinning napkin(Cotton, Linen), Kitchen rag(Towel, Linen, Waffle, Chekered) である。これらの布製品を対象として、CMT の 3 種類のタスクを実行した。なお、各タスクの動作シーケンスは一つの関数として実装されており、布の大きさや厚さによるパラメータのみを引数として渡せばよいようにした。

実行後の布の形状は、テーブルの上に広げられた状態か、四つ折りの状態になっていることが望ましい。図 5 に各タスクでの布の最終形状を示した。これは、天頂に設置したカメラにより撮影したものである。形状が不十分なケースも存在するが、Folding においては四つ折り自体はできており、Unfolding においては適切に展開できている事例が半分以上であった。本システムでは布の状態推定とそれに基づく動作のフィードバックを入れていないため、この結果は妥当である。一方で、それらを導入するための素地と言える結果にはなっていると考えられる。

## 6. 結言

本稿では、大きさや種類が異なる矩形の布製品を対象として、角部の検出、展開作業、折りたたみ作業を実行可能にするロボットシステムを構築した。作業実現のためには、様々な形に変形しうる布の性質を考慮する動作が必要であった。そこで、経験的に得られた布の動きをもとに適切な動作シーケンスを考案し、フィードフォワードで作業を実現する方針を採った。これにより、9 種類の異なる布製品に対して作業が実行

可能であることを確認できた。

今後は、動作シーケンスの再考や逐次的なフィードバックの追加、認識精度の向上などの改良を行う

## 謝辞

本研究の一部は KAKENHI および JST [Moonshot R&D][Grant Number JPMJMS2034]の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] F. Osawa, H. Seki, and Y. Kamiya: "Unfolding of Massive Laundry and Classification Types by Dual Manipulator," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.11 No.5, pp. 457 - 463, 2007.
- [2] 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 *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2308-2315, 2010.
- [3] A. Doumanoglou, J. Stria, G. Peleka, I. Mariolis, V. Petrik, A. Kargakos, L. Wagner, V. Hlavac, T.-K. Kim, and S. Malassiotis, "Folding clothes autonomously: A complete pipeline," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1461-1478, 2016.
- [4] Robotic Grasping and Manipulation Competitions@ICRA2022, [https://rpal.cse.usf.edu/rgmc\\_iros2022/](https://rpal.cse.usf.edu/rgmc_iros2022/)
- [5] Cloth Manipulation and Perception@ICRA2023, <https://www.iri.upc.edu/groups/perception/ClothManipulationChallenge/>
- [6] I. Garcia-Camacho, J. Borràs, B. Calli, A. Norton and G. Alenyà, "Household Cloth Object Set: Fostering Benchmarking in Deformable Object Manipulation," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 5866-5873, July 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3158428.
- [7] C. Wang, A. Bochkovskiy, H. M. Liao: "YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors," *arXiv: 2207.02696*, 2022.
- [8] S. Demura, K. Sano, W. Nakajima, K. Nagahama, K. Takeshita, K. Yamazaki, "Picking up One of the Folded and Stacked Towels by a Single Arm Robot," in *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 1551-1556, 2018.
- [9] C. Rother, V. Kolmogorov, A. Blake, "'GrabCut': interactive foreground extraction using iterated graph cuts," in *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 309, 314, 2004