

RGB-D カメラを用いた衣類の仮想展開の性能分析及び改良の考察

Performance Analysis and Improvement Considerations for Virtual Flattening of Clothing Using RGB-D Cameras

中島 雅己[†] 喜多 泰代[†] 松田 一朗[†] 伊東 晋[†]
Masaki Nakajima Yasuyo Kita Ichiro Matsuda Susumu itoh

1. はじめに

近年、日常生活をアシストする自律型ロボットへの期待が高まっているが、その実現のためには日常品の自動認識技術が必須である。身近な日常品である衣類は、様々な形状に変化することから認識が特に困難である。認識方法として、衣類を物理的に広げる手法[1][2]も検討されているが、ロボットにその作業をさせる際の適切な位置の把握が困難であり、動作にも無駄が多くなる。本研究では一点を把持して持ち上げた状態の衣類の形状から、仮想的に平面上に広げる手法について検討する。以降、平面上に衣類を広げた図のことを展開図と記述する。まず衣類を一点で把持した状態の 3 次元形状を、異なる視線方向から計測する。その計測データから測地線を求め、計算機上で衣類を仮想的に平坦(2次元)にし、衣類を認識しやすい形状にする。先行研究[3]では人工データを対象に性能が検討されており、実際の衣類データに対する性能の検討が十分に行われていない。そこで本稿では RGB-D カメラを用いて多数の実際の衣類を多数撮影し、取得したデータを用いてその有用性を確認すると共に、問題点及び改善点を考察する。

2. 手順

提案手法によって衣類の一面全体の仮想的展開図を作成する手順を図 1 に示す。まず、衣類はロボットで把持されている状態であり、そこから輝度情報と同時に奥行き (Depth) 情報を測定できる RGB-D カメラを用いて点群データ(3次元の点の集まり)を取得する。図 2 に今回使用したカメラで取得した点群データの例を示す。一般に一方からの撮影では、衣類の一面の部分的な状態しか観測できない。具体的に図 2 (a)の例では、観測されている背側の面に

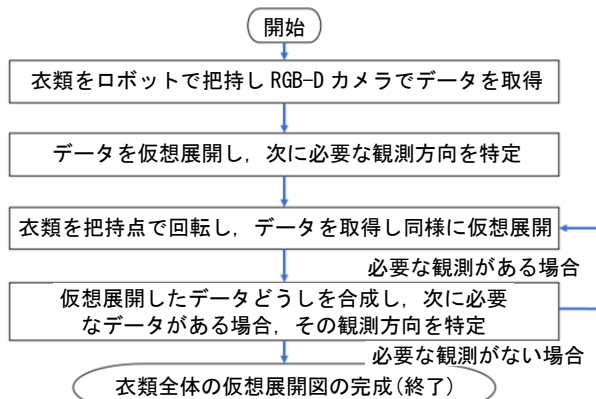


図 1. 衣類全体を仮想展開する処理の流れ

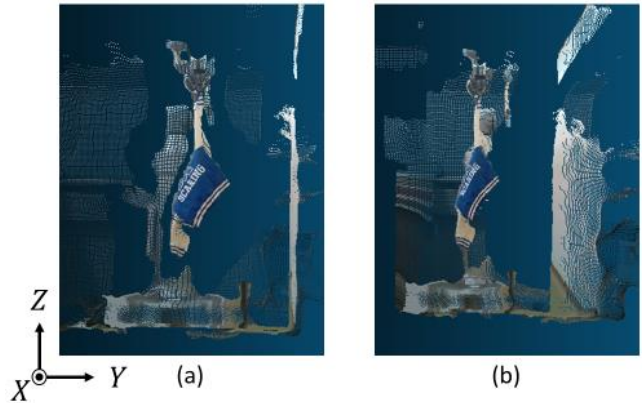


図 2 点群データの例: (a) 正面図. (b) 側面図

つながる袖や周囲の面が観測されていない。このため、複数の異なる観測方向から衣類の 3 次元点群を取得し、最終的にこれらを統合して衣類全体の展開図を作成する。

3次元の座標系に関しては以降、図 2 (a)のように正面から見て縦軸をZ、横軸をY、正面から見て奥から手前の方向に向く軸をXとする。取得した 3 次元点群を元に、計算機上で仮想的に衣類表面を 3 次元から 2 次元平面に展開する。この方法は 3 章で説明する。次に現時点での展開図と整合して連結する 3 次元点群が取得できる観測方向を特定し、RGB-D カメラを固定したまま把持点を通る鉛直軸周りに衣類を回転させることで、その観測方向からの 3 次元点群を得る。続いて、その点群を用いて同様に仮想展開を行い、仮想展開図どうしを連結して展開図を拡張していく。連結後、取得した展開図がまだ衣類一面全体を網羅していない場合、新たな観測方向を特定し、その観測データを用いて展開図を更に拡張する。上記を繰り返すことにより最終的な衣類の展開図を取得することができる。この手順については 4 章に記述する。また、提案手法に関する実験と考察を 5 章に記述し、結論を 6 章で述べる。

3. 一方向から取得した 3 次元点群の平面への展開

ここでは RGB-D カメラで一方向から取得した 3 次元点群データを 2 次元平面上に展開する方法を記述する。衣類の表面を 2 次元画像平面 $F = (u, v)$ に展開できるとすると展開後の 2 次元座標は以下の関係を持つ。

$$\sqrt{(u_{n1} - u_{n2})^2 + (v_{n1} - v_{n2})^2} = G_{n1,n2} \quad (1)$$

ただし、 $G_{n1,n2}$ は衣類表面上の P_{n1}, P_{n2} 間の測地線距離である。測地線とはある面上の 2 点間でその面に沿う最短距離を与える曲線である。ここで、展開された形状の精度は必ずしも高くなくてよいことから、測地線を求める点どうし

[†] 東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科
Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

の距離が小さい場合、測地線距離 G_{n_1, n_2} が 3 次元ユークリッド距離 E_{n_1, n_2} で近似できるものとする。計測された衣類の点群データは十分密であり、全ての 2 点間で測地線を求めることは演算上現実的でないので、図 3 (b)のように衣類の点群データを一定間隔 d でサンプリングして間引いておく(赤色の点、この例では画像平面上で $d = 14$ 画素ごとにサンプリング)。また、求める 3 次元ユークリッド距離に使用する 2 点の距離は十分に近い必要があるため、 E_{n_1, n_2} の計算に用いる点のペアの組み合わせをさらに厳選する。具体的には図 3 (b)のサンプリング点のうち 1 点を選んだ後、その点(注目画素とする)を中心に全 8 方向で探索し、各方向で一番近いサンプリング点をペアのもう一点として対応付ける(各点は最大 8 ペアで共有)。この対応付けを無向グラフの辺の接続関係を表すフラグ $B(n_1, n_2) = \{1, 0\}$ で表現すると平面への展開は以下の目的関数の最小化問題となる。

$$H(u, v) = \sum_{n_1=1}^{N-1} \sum_{n_2=n_1+1}^N B(n_1, n_2) \left(\sqrt{(u_{n_1} - u_{n_2})^2 + (v_{n_1} - v_{n_2})^2} - E_{n_1, n_2} \right)^2 \quad (2)$$

よって、 P_n ごとに以下に示す 2 つの線形方程式が得られ、計 $2N$ 個の連立方程式を解くことで解を得る。

$$\frac{\partial H(u, v)}{\partial u_n} = 0, \quad \frac{\partial H(u, v)}{\partial v_n} = 0 \quad (3)$$

具体的な手順を改めて図 3 の例を用いて説明する。まず RGB-D カメラで取得した衣類表面の点群(図 3 (a))を画像平面上で d 画素間隔でサンプリングし、連立方程式を容易に解ける数の点 $P_n (n = 1, \dots, N)$ を抽出する(図 3 (b))。その後サンプリングした点群の深さ方向 x の情報を落とした (y_n, z_n) を各点の平面上での初期座標とし、(2)式の最小化により衣類を平面に展開する(図 3 (c))。次に得られたサンプル点間の中心にサンプル点を追加し、同様な処理を適用してより高密度な展開結果を求める(図 3 (d))。サンプリング間隔を 2 段階で変えるのは、高速化と収束の安定化のためである。最後にサンプル点を頂点とするドロネー三角分割を用いて内部領域のテクスチャ情報を補間し、仮想展開図を得る(図 3 (e))。

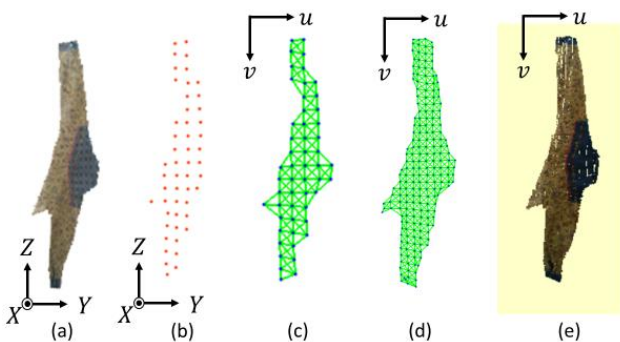


図 3. RGB-D データから平面展開への過程: (a) RGB-D データ, (b) サンプリングした 3D データ(赤点), (c) (2)式の最小化を利用した平面展開(青点), $B(n_1, n_2) = 1$ のペア(緑線), (d) サンプリング点増加後の平面展開, (e) 平坦化された衣類

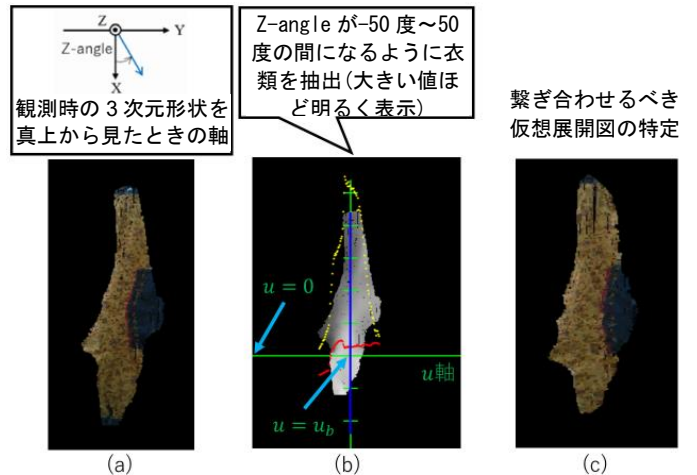


図 4. 繋ぎ合わせるペアの特定: (a) 把持した直後(ここでは 0 度)の方向での仮想展開図, (b) 衣類の抽出及び各パラメータの表示(黄色線:画素数 $h(u)$, 赤線:Z-angle の平均値 $A(u)$, 青線: $u = u_b$), (c) 特定した(a)とのペアの仮想展開図(ここでは 40 度)

4. 異なる視点の仮想展開図の連結

異なる方向から撮影したデータから得た仮想展開図同士を連結させる。ここでは図 4 を用いて、ある方向(図 4 (a)の例では 0 度)で求めた衣類の仮想展開データから次に連結させるための 3 次元データの撮影方向(図 4 (c)の例では 40 度)を特定する手順を説明する。まず図 4 (a)の 3 次元データの z 軸に垂直な面法線の成分に着目し x 軸方向に対する z 軸周りの角度を計算する。これを Z 角(Z-angle)と呼び、次式で定義される。

$$Z\text{-angle} = \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \quad (4)$$

ただし、 (n_x, n_y, n_z) は各点における法線方向である。RGB-D センサの安定した検出角度はこの Z 角が $-50 \sim +50$ 度の範囲であるとする。図 4 (b)は面上の各点の Z 角を明度表示(Z 角 $+90$)したもので、明るいほど大きい値である。水平方向の座標値 u ごとに面上の画素数 $h(u)$ とそれらの点の Z 角の平均値 $A_z(u)$ を計算する。ここで図 4 (b)に重ねたグラフの黄色線は $h(u)$ 、赤線は $A_z(u)$ を示している。また、青線は以下の式を満たす最小値 u_b を示す。

$$\sum_{u=0}^{u_b} h(u) > S_0 \quad (5)$$

S_0 は現時点での仮想展開データと次の視線方向での仮想展開データを重ね合わせるために必要な最小の共通領域面積である。次の視線方向の角度 A は次式を満たすように設定する。

$$A = A_w - A_0 \quad (6)$$

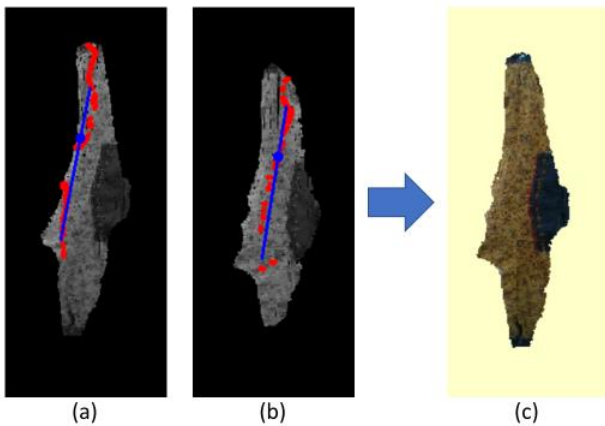


図 5. 仮想展開図の連結 : (a)現在の仮想展開データ (赤点: 共通領域面積内の Z 角の平均値 A_m と同じ Z 角になる点, 青線: 第 1 主軸), (b) 次の視線方向での仮想展開データ (赤点: 共通領域面積内の Z 角の平均値 $A_m + A$ と同じ Z 角になる点, 青線: 第 1 主軸), (c) 連結できた衣類の仮想展開図

ここで A_w は観測限界となる Z 角を意味し, 今回は信頼できる Z 角の検出角度を $-50 \sim +50$ 度と想定しているため $A_w = 50$ である. また, A_0 は $u = u_b$ のときの Z-angle の平均値である. 図 4 (b) の例では $A_0(u_b) = 10$ となっているので次に観測すべき視線方向が $A = 40$ と定まる. この方向から新たな計測データを取得した後, 3 章の手法で同様に仮想展開し図 4 (c) を得る.

現時点での仮想展開図の共通領域面積内の Z 角の平均値を A_m とし, 仮想展開図上で Z 角が A_m となる画素を検出し, 新たな仮想展開データからは Z 角が $A_m + A$ となる画素を検出する. 図 5 (a) 及び (b) の赤点はその時の画素を示している. これより 3 次元空間において対応していると予想される点群が検出されるので, 各仮想展開図上で, それぞれの点群の第 1 主軸を算出する (図 5 (a) 及び (b) の青線). この主軸上で同じ z 値 (3 次元における高さ成分) を持つ画素を探出し, 対応する画素のペアを見つけてその対応する画素と線が一致するように, 仮想展開図を重ね合わせるための平行移動, 回転各の初期推定値を決定する. この状態に微小な並進と回転の修正を加えて最適な重ね合わせ位置を探索し, 図 5 (c) に示す連結結果を得る.

5. 実験

実際にロボットアームで衣類を把持して, RGB-D カメラで撮影した計測データに対して提案手法を適用した. 本研究では RGB-D カメラとして Intel の RealSense D435i [4] を, ロボットアームとしてユニバーサルロボット社の UR3 e [5] を使用した. 図 6 に, ロボットで衣類を把持し, 衣類を回転させてデータを RGB-D カメラで取得する実験における装置の配置を示す. 衣類の把持箇所は, K. Kyouu らの研究 [6] の第二把持点を参考にしており, 衣類の任意の状態からロボットで一点を把持して持ち上げたときに最下点となる位置を目安に選定している. 具体的には, 長袖トレーナ系統では腰コーナーと袖先把持の 2 箇所, ズボン系統では腰コーナーと裾先の 2 箇所となる. 実験条件としてサン



図 6. 実験配置図

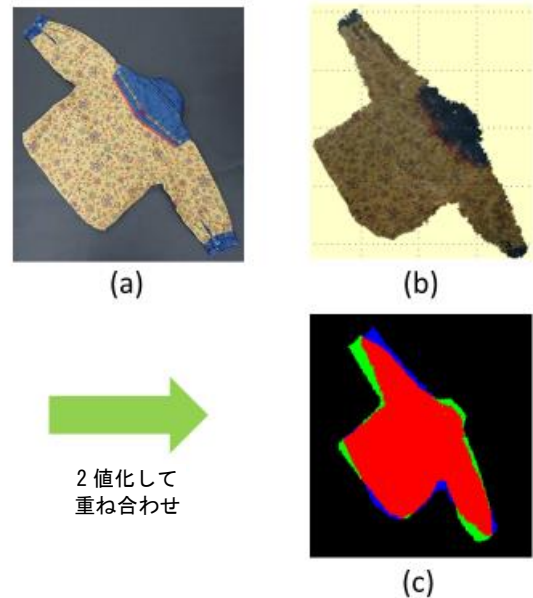


図 7. 仮想展開の例 : (a) 実際の衣類, (b) 仮想展開した衣類, (c) 比較図 (再現率 91%)

プリング間隔 $d = 14$ (画素), 観測限界 $A_w = 50$ (度) とし, 共通領域面積 $S_0 = 6000$ (画素) とした. また, 対象となる衣類は長袖トレーナ系統を 17 着, ズボン系統を 12 着の計 29 着を用意して実験を行った.

実験の結果, 良好に仮想展開できたものが 16 例, 仮想展開の結果に一部欠損が認められたものが 8 例, 仮想展開に失敗したとみなされたものが 5 例であった. まず, 仮想展開に成功した例を図 7 に示す. 同図において, (a) は対象衣類を実際に机上で広げて撮影した画像, (b) は提案手法によって得られた仮想展開図である. また, (c) は (a) と (b) の画像を 2 値化して衣類領域を抽出した後, 両者のスケールを合わせて重ね合わせた結果を可視化したものである. この重なり精度を定量的に評価する指針として, 次式で定義される再現率を算出する.

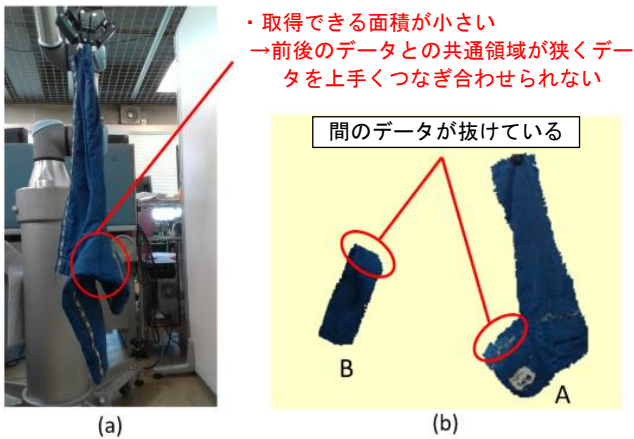


図8. 仮想展開の例2: (a) 抜けている視線方向のデータ, (b) 抜けているデータの前後の視線方向による仮想展開図(連結済み)

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

ただし, TP は図 7 (c)において赤色に着色された共通領域の面積である. また, FN は実際の衣類領域のうち仮想展開図に含まれない緑色の領域の面積である. なお, 青色領域は仮想展開した衣類のみに対応する領域であり FP に相当する. 図 7 (c)の例では再現率 91% であり, 良好に仮想展開できた例における再現率の平均は 77.2% であった.

次に仮想展開図に一部欠損が生じた例を図 8 に示す. ズボン系統では片方の裾先を把持するともう一方の足部分が折れやすく, 折れが急峻なところでは共通で取得できる面積が小さくなりやすい (図 8 (a)). その結果面積 S_0 以上の共通領域が確保できない場合は, 連結対象とならない (図 8 (b)の A). このため, 右側の A から先の部分の連結が行えず, 折れた足部分が欠けた展開図となる. このように仮想展開図に一部欠損が生じた衣類についての再現率の平均は 64.1% であった. 仮想展開図に欠損が生じた 8 例は図 8 のようなズボン系統を裾先で把持した場合と長袖トレーナー系統を腰コーナーで把持した場合であった. 後者の場合も同様に, 片側の袖側の急な折れが要因であるので, このような折れに対する対策が必要である. 欠損部分を観測できる方向から作成した展開図を別途作成し (図 8 (b)の B), 2 つの展開図を連結する方法を検討中である.

仮想展開に失敗した例の多くは, 布を垂らしたときに生じるドレープと呼ばれる“ひだ”が観察された. ドレープによって離れた面同士が接触するとその間の領域が隠蔽され, 観測できなくなることが失敗の原因であると考えられる. この状況を解決するには, 別のアームで衣類を軽く広げた後, 観測した画像を仮想展開するなど追加のアプローチが必要になる. ドレープの生じやすさは, 生地の高さに加えて, 肌触りが柔らかい・固くしっかりしているといった特性に依存しており, 原材料 (ポリエステルやレーヨンなど) や編み方で変化する. 現時点では提案手法はある程度厚手で丈夫な服に対して有効であるといえる.

6. 結論

本稿では, 実験に基づいて仮想展開手法の実用性を検証した. 結果として, 実験に使用した衣類の半数以上が仮想展開できた. 仮想展開図に欠損が生じた例でも, 片面の過半部分を仮想展開できており, 欠損の要因も明示的であるため, この問題を解決できればより汎用性が高くなることが分かった. また, 実際の衣類を広げた状態との相違度を, 再現率を用いて数値化した結果, 仮想展開できた例では高い値を示すことが確認できた. 今後の課題は図 8 のように一部欠けがある場合の改善と, 得られた仮想展開図を衣類の種類判別などに活用することである.

謝辞

本研究は科研費 16H02885 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] M. Kaneko and M. Kakikura, “Planning strategy for putting away laundry —Isolating and unfolding task—”, Proc. of 4th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP 2001), pp.429-434, May 2001.
- [2] D. Triantafyllou, I. Mariolis, A. Kargakos, S. Malassiotis and N. Aspragathos, “A geometric approach to robotic unfolding of garments”, Robotics and Autonomous Systems, Vol.75, pp.233-243, Jan. 2016.
- [3] Y. Kita, I. Matsuda and N. Kita, “Integration of multiple RGB-D views of a clothing item into its canonical shape”, Proc. of 16th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2021), pp.910-918, Feb. 2021.
- [4] <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/architecture-and-technology/realsense-overview.html>
- [5] <https://www.universal-robots.com/ja/製造ラインナップ/ur3e/>
- [6] K. Kyouu, H. Jingyu and Y. Kita, “Classification of the category of clothing item after bringing it into limited shapes”, Proc. of IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2015), pp.588-594, Nov. 2015.
- [7] Y. Kita and N. Kita, “Virtual flattening of clothing item held in the air”, Proc. of 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2016), pp.2770-2776, Dec. 2016.