

# M 系列円筒バーコードと AR 和服帯試着システムへの応用

奥山 瑞希\* 的場 やすし† 椎尾 一郎\*

**概要.** AR システムで一般的に使用されている光学マーカは、平面に貼り付けることを前提としたものである。一方、実世界の構造物、家具、調度品や人体には円筒形の部分が多く存在する。そこで本研究では、円筒面を持つ立体物に取り付けることを目的とした、円筒形のバーコード光学マーカを提案する。このマーカは、円筒の高さ方向に平行にバーを並べたもので、カメラに向けたバーのみが認識可能である。部分的な認識のみで位置測定を実現するために、バーコードには、部分数列が一度しか現れない M 系列により生成された 2 進数をエンコードした。これにより円筒回転方向の検出が可能となった。また、本マーカを活用したアプリケーションとして、和服帯の AR 試着システムを作成した。これは、ユーザが実物の和服を着用した上から円筒バーコードを取り付けたベルトを着用し、システムがカメラで取得したそのユーザの画像に、CG 画像による和服帯を表示するシステムである。

## 1 はじめに

実世界の物や場所に情報を提示する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) の手法では、矩形平面に 2 次元コードを印刷した光学マーカ (以下 AR マーカ) が一般的に使用される。壁、天井、机、本や書類など、生活空間内に多く存在する平面の認識には、平面に貼り付けることを前提とした AR マーカは有用である。

しかし、調度品 (例、花瓶、植木鉢)、生活空間の構造物 (柱)、機械部品、家具 (脚)、さらには人の胴、四肢、頭、首など、人体や工業製品には円柱形の部分も多く存在し、世界は平面と円柱で構成されていると言える<sup>1,2</sup>。円柱物体は、AR マーカを側面に貼付することで位置検出可能であるが、複数のマーカを貼付・登録する必要がある上、曲面による変形のために認識率が低下する。そこで本研究では、円筒面を持つ立体物に取り付けることを目的として、円筒形のバーコード光学マーカを提案する。従来の AR マーカに加え、円筒形マーカを採用することで、AR を活用できる場面がさらに広がるであろう。

また、本マーカを活用したアプリケーションとして、女性の和服帯の AR 試着システムを作成した。これは、実物の和服の上に円筒バーコードのベルトを着用したユーザ画像に、CG 画像による和服帯を重畳表示するシステムである。本システムを、複数のユーザに試用してもらい、試着システムとして有用であることを確認した。

Copyright is held by the author(s).

\* お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科

† お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

<sup>1</sup> <http://lleedd.com/blog/2011/05/23/>

<sup>2</sup> 本川達雄. 生きものは円柱形一時代を拓く生物の発想 (NHK ライブラリー), 日本放送出版協会, pp. 354, 1998.

## 2 M 系列マーカ

本研究では、円筒状のバーコード光学マーカを提案する。これは、生活空間や人体部位に多い円柱状の立体物に貼付することで、全周囲から認識できる光学マーカである。提案する円筒型バーコードは、円筒状の側面にバーコードを巻きつけるように配置している。この例を図 1 (a) に示す。円柱側面へのバーの配置方法には、円柱の円周方向にリング状に並べる方法と、それぞれのバーを円柱の高さ方向に平行に並べる方法が考えられる。前者は全方向から同一のパターンを読むことができるため、マーカの ID 取得に適している。後者はカメラに向けた部分しか認識できない制約があるものの円柱の回転方向 (相対角度) を検知することが可能である。両者を組み合わせることで ID と回転方向を検知可能なマーカは実装可能であるが、立体物に貼付するマーカとしての効果を示すため、本論文では後者のバー配置のみを利用したシステムを実装した。また、バーコードの部分的な認識から回転方向の検出を可能にするために、バーコードには、部分数列が一度しか現れない M 系列 (Maximum length sequence, 線形最大周期列または最大長系列) により生成された 2 進数

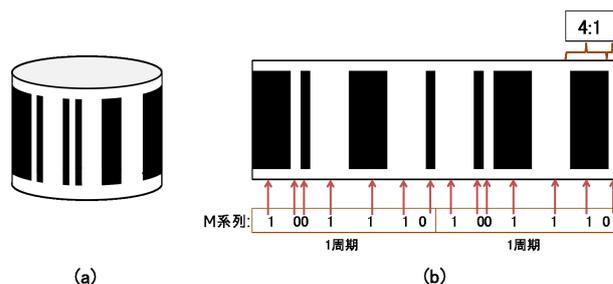


図 1. (a) M 系列マーカ, (b) M 系列マーカの展開図。

を使用した。M 系列を用いた位置検出手法として、Xiao らの Lumitrack[5] が挙げられる。Lumitrack では、M 系列バーコードパターンを平面的に照射・読み取りを行っているが、本研究では、M 系列を立体物の円筒形光学マーカに適用した。本研究で提案する円筒型バーコード光学マーカを、以下“M 系列マーカ”と呼ぶ。

## 2.1 M 系列

本研究では、マーカのバーコードに M 系列と呼ばれる数列を符号化した。M 系列数列は以下の式より生成される。 $\oplus$  は排他的論理和を表す。

$$X_n = X_{n-p} \oplus X_{n-q} \quad (p > q > 0) \quad (1)$$

生成された数列は、周期  $2^p - 1$  であり、数列内の連続する各  $p$  ビットは一意である。例えば  $p = 3$  で生成すると周期 7 の数列が生成され、この中の連続する 3 ビットは唯一である。実際には次の 7 個の数からなる数列が繰り返し生成される。

1 0 0 1 1 1 0

ここでは、連続する 3 ビット、例えば部分数列 1 0 0 は 1 周期の中では 1 ビット目から 3 ビット目までの 1 回のみ出現する。この数列の 1 周期分を円環状に並べ、任意の箇所から読み取りを開始した場合、どこから読み始めても、連続する 3 個の部分数列は他の箇所には出現しない。このような M 系列のビット列を、光学的なパターンとして回転体の周囲に配置すれば、連続した  $p$  個以上の数列を光学的に読み取ることで、円周上の場所を特定できる。

## 2.2 バーコード化

バーコードは、交互に並んだ 2 種類の線幅の白と黒のバーで構成される。太いバー、細いバーに、1 または 0 を割り当てることで 2 進数を表現する。本研究では、太いバー、細いバーにそれぞれ M 系列数列の 1, 0 を割り当て、バーコード化する。

M 系列数列の 1 周期は奇数個である。奇数番目のビットを黒、偶数番目のビットを白が該当するように割り当てると、奇数個のビット列の場合、1 ビット目（最初）と  $2^p - 1$  ビット目（最後）のバーの色は同じ黒色になる。これを円環状に繋げた場合、接続部のビットが、同色のバーになり識別が行えない。この問題は、M 系列数列を、2 周期分を使用することで解決できる。例えば、 $p = 3$  の M 系列の場合は、下記に記す 2 周期分のビットをバーコード化する。

1 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 1 0

2 周期は 14 ビットであり偶数であるため、図 1 に示すように、1 ビット目（最初）の 1 は黒いバーである。14 ビット目（最後）の 0 は白いバーであり、バーコードを円環状に配置して最初と最後のバーを接続しても、識別可能である。この例を図 1 (b) に

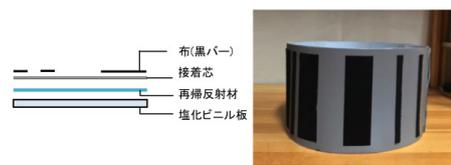


図 2. 試作した M 系列マーカの構造 (左) と外観 (右).

示す。ただし、2 周期の数列を使用すると、同じ 3 ビットの部分数列は 2 回出現することになるため、この数列内で唯一でなくなる。しかしながら、これらは白黒の組み合わせが逆になるため区別することが可能である。例えば上記の数列で 1 0 0 は 2 回出現している。ここで、数列最初の 1 を黒いバーに割り当てたとすると、1 回目に出現する 1 0 0 は黒・白・黒の組み合わせになり、一方で 2 回目に現れる 1 0 0 は白・黒・白の組み合わせになり、識別可能である。

なお、太い・細いバーの幅の比は分解能、安定性などの要素に影響する。後述する AR 試着アプリケーションでは太い・細いバーの幅の比を 4:1 とした。

## 3 和服帯 AR 試着システム

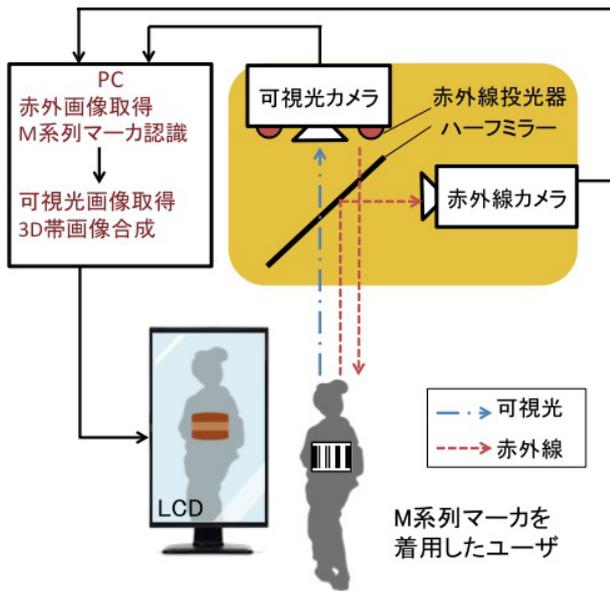
AR 試着は多く研究されており T シャツ [1]、セーター [2]、ジャケットやスカート [6] などを仮想的に試着するシステムが提案されている。今回注目した女性の和服帯の場合は、一般的な衣料品および身につける小物よりも、AR 試着を導入する必要性が高いと考えられる。その理由は、和服の試着は比較的容易であるのに対し、和服帯の装着には時間と技術が必要であり、多種類の帯を気軽に試すことが困難なことである。また、帯を結ぶと帯にシワが残り、商品価値が下がる問題もある。そのため一般的な和服店では、和服帯の試着は行わず、体前面に帯をあてがう程度の簡易な試着を行い、その結果で買い物客は帯の購入を検討する。AR 試着システムにより、帯結びをした状態を体験できれば、多数の帯を気軽に試すことが可能になり、着用イメージが確認しやすいであろう。

そこで、M 系列マーカの有用性を確認するために、和服帯を AR 環境で試着するシステムを作成した。これは、実物の和服を試着し、M 系列マーカのベルトを装着したユーザ映像のウエスト部分に、CG による和服帯を重畳する AR システムである。和服帯と M 系列マーカはいずれも円筒形であるため、M 系列マーカの実施例として適している。

### 3.1 システム概要

#### 3.1.1 使用する M 系列マーカ

AR 試着システムのために開発した M 系列マーカを図 2 に示す。ユーザは、和服を着た上にこのマー



カを和服帯のように装着する。マーカには、 $p = 4$  の M 系列数列の 2 周期分、すなわち 30 ビットをバーコード化した。太いバーと細いバーの幅の比に関して 2:1, 3:1 などの試作を行ったが、安定して検出できる比であった 4:1 とした。太いバーの幅は 4cm, 細いバーの幅は 1cm, 全周囲は 78cm である。マーカのサイズは固定であるが、実際には試着した和服の上から着用するため、服や伊達締め of 厚みにより調整が可能である。このため 65~70cm 程度の胸下サイズのユーザならば圧迫感や緩みを感じることはなかった。認識を容易にするために、試作した M 系列マーカの表地には再帰反射素材を使用した。再帰反射素材で白のバーの幅を表現し、この上に貼った薄いフェルト布で黒のバーの幅を表現した。再帰反射素材のみでは帯の形状が安定しないため、接着芯と塩化ビニル板を裏側に貼り付け補強した。この構造を図 2 の左図に示す。

### 3.1.2 認識と表示

本システムの概要を図 3 に示す。ユーザは実際に和服を着用し、紐や伊達締めで固定する。その上から、ウエスト（腰）部分に M 系列マーカで作ったダミーの和服帯を身につける。ユーザがカメラの前に立つと、47 インチの液晶ディスプレイ（LCD）にユーザの姿が、姿見に映されたかのように表示される。この時、あらかじめ実物の帯を 3D スキャンしてモデル化された CG の帯が、サイズ、位置、回転方向を M 系列マーカに合わせて、重畳表示される。

今回の実装では、光学マーカ認識プログラムの開発を容易にし、認識精度を向上させる目的で、赤外線カメラ、赤外線投光器、再帰反射素材を使用した。

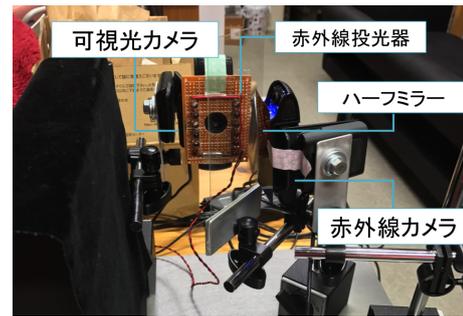


図 4. 作成したカメラ機材の外観.

すなわち、ユーザに提示する映像は可視光カメラで撮影し、M 系列マーカは赤外線カメラで撮影した画像から認識を行う。そこで、2 台の同型ウェブカメラ<sup>3</sup>を用意し、このうち 1 台は、内部の赤外線カットフィルタを除去し、レンズ部に可視光カットフィルタを貼り付け、赤外線カメラに改造した。

また、図 3 に示すように、赤外線カメラと可視光カメラを直交して配置し、ハーフミラーを介して光軸と画角を一致させることで、座標変換に関するプログラミング開発と機器設置におけるキャリブレーションを省略可能にした。図 4 にこの様子を示す。ハーフミラーの直進方向には、ユーザに提示する高品質の画像取得が必要な可視光カメラと、赤外線光源である赤外線投光器を設置したため、ハーフミラーの直進方向の透過率を高く設定する必要があった。そこで、ハーフミラーには透明なガラス板<sup>4</sup>を使用した。一般的な透明フロートガラスの場合、45 度方向の透過率は正面に対して 2~3% 減程度であるため<sup>5</sup> 今回の設定でも大半が透過していると考えられる。可視光カメラ画像に重畳表示を行う際、赤外線カメラが検出した M 系列マーカの画素上の位置と同じ位置に CG 帯を表示すれば、正しく重畳表示することが可能になる。

M 系列マーカをトルソーに取り付け、本システムの可視光カメラと赤外線カメラで撮影した画像を図 5 (a) (b) に示す。図 5 (a) は可視光カメラ画像であり、図 5 (b) は赤外線カメラ画像である。赤外線投光器と再帰反射素材により、M 系列マーカ部分が明瞭に撮影されていることがわかる。AR 試着システムで AR 表示をする CG の帯の 3D データは、実物の帯を文庫結びでトルソーに装着し、これを 3D スキャナ<sup>6</sup> で取り込み作成した。スキャンした生データはデータ数が大きく、加えてポリゴンが細かい

<sup>3</sup> 光学系が同一の Logitech C920 と C920r を使用し、改造の容易な C920 を赤外線カメラに改造した。

<sup>4</sup> 強化ガラス保護フィルム（厚さ 0.33mm）、株式会社ハイスピリット

<sup>5</sup> <https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou-gijutsu/0004a.pdf>

<sup>6</sup> Artec 社 Space Spider

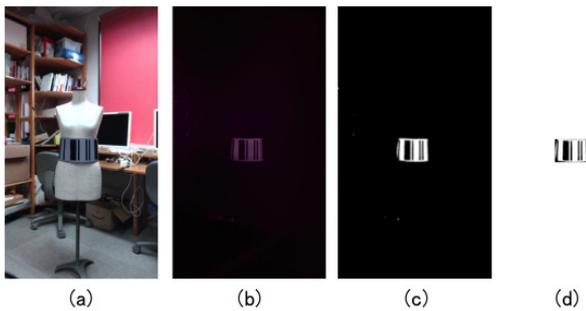


図 5. (a) 可視光カメラ画像, (b) 赤外線カメラ画像, (c) (b) を 2 値化した画像, (d) (c) からマーカ部を切り取った矩形画像.

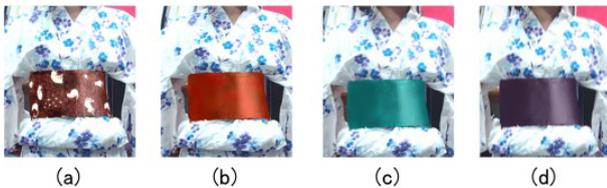


図 6. それぞれ (a) 帯 1, (b) 帯 2, (c) 帯 3, (d) 帯 4 を表示した様子.

め, リアルタイム処理となる AR 試着システムには適さない. そのため頂点数を元データから 0.02% に減少させ, 頂点数 5000 程度のデータを使用した. この帯を表示した様子を図 6 の (a) に示す.

一般の帯の試着においては, 寒色や暖色の帯など大量の帯の中から購入したい帯の色を大まかに決定する場面がある. そこで, 帯合わせをしたい和服を着用したユーザが, 本システムで帯との色合わせができるように, 図 6 の (a) の帯からポリゴンを複製し, 単色の帯モデルを複数作成した. これらを表示した様子を図 6 (b), (c), (d) に示す. ユーザは, システム利用中に重畳表示する 3D の帯のデータを切り替えることによって, 複数帯を AR 試着することができる. 今後, 様々な帯のスキャンを行うとともに, 太鼓結びなど他の結びをした帯モデルを作成し, 帯データの拡充を検討している.

### 3.2 M 系列マーカの認識

CG の帯を M 系列マーカ部分に重畳表示するためには, 図 5 (b) に示す赤外線カメラ画像から, マーカの大きさ, 座標, 回転方向 (カメラに向いている面) を取得する必要がある. また, システムには, あらかじめマーカに使用した M 系列数列とその M 系列数列の各部分数列に対応する回転角度が定義されている.  $p=4$  の M 系列では, 全周囲に対し太いバーと細いバーの比は 4:1 であるため, 細いバーは  $4^\circ$  分, 太いバーは  $16^\circ$  分が割り当てられる. この設定をもとに以下の処理を行った.

最初に, 図 5 (b) の赤外線カメラ画像を OpenCV の 2 値化機能を利用し 2 値画像とした. この結果を図 5 (c) に示す. 図 5 (c) 中に, マーカ部分は大きな白い連結領域として撮影されている. この処理によってマーカ部分がほぼ検出されているが, 小さな点状ノイズが現れることがある. そこで, ラベリングクラス<sup>7</sup> を利用してラベリング (連結成分抽出) を行い, 面積が 3,000 画素以下の領域を破棄した. この面積値は, ユーザがカメラから 3m 以内に立っていることを想定して設定した. これにより小さな領域として現れるノイズが除去される. 次に, ユーザが着用した M 系列マーカの縦横比率から外れる領域を破棄した. すなわち, 白領域の縦のサイズに対する横のサイズの比率  $a$  を求め,  $0.65 < a \leq 1.1$  の範囲から外れる領域を破棄した. これにより, マーカ部分に比べて著しく縦長や横長である領域を, ノイズ領域として除去可能となる. この結果, 効率的にノイズを除去しマーカ領域を特定できる.

マーカを検出した後, 図 5 (d) に示すようにマーカを含む矩形領域を切り取った. このマーカ領域を含む矩形の中心座標を求め, CG の帯を表示する中心座標とした. また矩形サイズから CG の帯を表示するサイズを決定した. さらに, 矩形内の M 系列を読み取ることで, マーカの回転方向を取得し, これを CG の帯の回転方向として設定した. M 系列の読み取り処理においては, 以下の処理を行った. マーカが存在する矩形の画像領域 (図 5 (d)) の上から  $i$  画素目を左から右へ水平方向に走査し, 黒と白が連続する画素数 (ランレングス) とバーの個数を取得する. また, 矩形の中心座標と, カメラに正対するバー (正面に映るバー) として矩形の中心に位置するバーを記録する. 連続する画素数から各バーが, 太いバーと細いバーどちらに類するか算出し, 1 と 0 の数列に変換する. 読み取りに失敗した場合や, 画像から得られた数列が  $p$  ビットに満たない場合は,  $i$  を更新し別の行を読み取る. 作成した 1 と 0 の数列内の連続  $p$  個ずつを 1 つの部分数列として取り出し, これとシステムにあらかじめ定義しておいた M 系列数列とを照合する. 部分数列のうち正対するバーを含む数列が, M 系列数列の部分数列と一致した場合, 一致した部分数列に定義された回転角度を取得する. このとき取得した角度は, 1 つのバー内で  $0^\circ$  から  $16^\circ$  の誤差が生じるため, カメラに正対するバーと矩形の中心座標がバー内のどこに位置するか計算し, 回転角度を算出し更新する. この処理を行うことで,  $1^\circ$  単位の回転角度で CG の帯の重畳表示が可能である.

作成した M 系列マーカをトルソーに装着し, これを手で回転させた状態でシステムを稼働させた. この状態で重畳表示の毎秒フレーム数 (fps) は 26fps 程度, 赤外線画像からマーカ認識に失敗するエラー

<sup>7</sup> <http://imura-lab.org/products/labeling/>

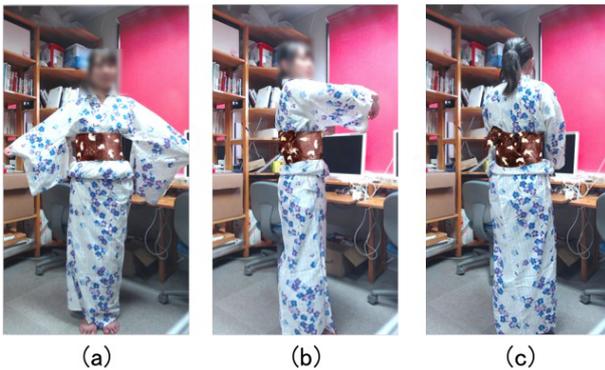


図 7. (a) 正面表示, (b) 側面表示, (c) 背面表示.



図 8. (a) M 系列マーカの一部が隠されても機能した例, (b) 袖で隠されたために認識できなかった例.

率は 1%以下であった。エラー率は、トルソーを 3 回転させた際の総フレーム数のうち、認識に失敗したフレーム数の割合から求めた。

M 系列マーカ帯を着用したユーザ映像に AR 表示された帯の様子を、図 7 に示す。また、図 8 は、重畳表示された CG 帯と、その時の赤外線カメラ画像の二値化画像をそれぞれ示す。図 8 (a) では、M 系列マーカの一部を手で隠した状態でも、正しく認識できていることがわかる。

## 4 評価実験

### 4.1 実験の概要

AR 試着システムの有用性を確認するために、4 名 (20-24 歳, 女性) に試用してもらった。これにより、「帯を結んだ時のイメージを持つことができるか否か」および「帯を購入する時の判断材料として用いることができるか」について評価を行った。

図 9 のようにカメラを床上約 80cm の高さに設置し、ディスプレイをその横に設置した。なお本実験後にも改良を進めたため、3 章の仕様とは異なる仕様の試作機 [8] を使用している (M 系列 1 周期, 応答速度 13fps)。また、CG 帯データは図 6 (a) の 1 種類を使用した。実験は以下の手順で実施した。

1. ユーザに本システムの操作方法を説明する。



図 9. AR 試着を行う様子.

2. ユーザは和服と M 系列マーカを身につけ、約 10 分間自由に試着を行う。
3. 実験者はユーザからシステムについて自由記述形式の回答を得る。
4. 実験者は、CG の帯データを作成する際に使用した実物の帯をユーザに見せ、イメージとの差などを確認する。

### 4.2 試用の様子と評価結果及び考察

4 名全員が共通して下記のような好意的な意見を述べた。

- 提案システムは、簡単に疑似試着が可能のため、複数種類の帯が試着可能ならば有用である。
- 提案システムでは、帯結びをした状態で重畳表示が行われ、CG で表示される帯を実際に着用し帯結びをした場面をイメージしやすい。
- 和服の着用経験が少ない人物は、帯についての知識を持った人物の誘導がなくとも、帯の着用イメージを持つことができる。

「帯を結んだイメージを持つことができるか」という項目について、4 名全員が持てると回答した。

つぎに、「帯を購入するかしないかの判断材料としてシステムを用いることができるか」という点については、「用いることができる」と回答した人は 2 名、「用いるには改善が必要だ」と回答した人が 2 名であった。本システムの不十分な点として、CG の再現率と、AR 表示の問題が挙げられた。CG の再現率を向上させるために、今後、ポリゴン数やテクスチャの色合い、光源設定を検討する必要がある。AR 表示については、袖によって M 系列マーカの大部分が隠れてしまう場合や、図 8 (b) のように袖を下ろした状態でユーザが横を向いた場合に、マーカ認識に失敗し、重畳表示がされない問題があった。今後は、認識できた過去のフレーム情報から現フレームを推定するなどの手法を検討したい。

今回は被験者に姿勢を助言し、一般的な袖丈の和服を使用したことで、円滑な試着体験を提供した。振袖などの袖丈が長い和服を着用した場合は、M 系列マーカ認識に影響を与える可能性がある。

## 5 関連研究

部分パターンが一度のみ出現する M 系列は、物体の位置検出に利用されている。Xiao らの Lumitrack[5] では、プロジェクタから M 系列バーコードパターンを投影し、これを 1 次元イメージセンサで読み取ることで双方の位置関係を計測する。Lumitrack ではパターンを平面的に読み取っているが、本研究では M 系列を円筒形光学マーカに適用した。

光学マーカの非平面への適用を目指す研究として、AR マーカの黒枠部分に複数の白点を一列に並べたマーカを作成し、白点の並びからマーカの曲がり具合を推定し、認識する手法が提案されている。これにより、笹沼らは折り曲げたマーカ [7] を、鈴木らは円筒面に貼り付けたマーカ [10] を検出可能であることを示した。小野らは、通常の QR コードにカラー補助線を格子状に重畳したマーカ [9] を提案した。この手法は補助線の着色パターンを利用して、局所的な歪みの補正を行う。しかし、立体物を全周囲から認識可能にするためには、複数のマーカを貼付する必要がある。本研究では円筒状バーコードに M 系列パターンを採用することで、歪みの少ない正面部分の部分的な画像を用いての認識を可能にした。

Usami ら [4] は、様々な角度の L 字型に手で曲げることのできる棒状の RGB のカラーコードを作成した。本研究で提案したマーカも、円筒状の立体的な構造をしているが、物体周囲に貼付することを目的としている。また、カメラと物体の間を遮蔽されマーカの一部が欠けた場合でも機能するよう工夫した。

本研究ではアプリケーションとして AR 試着システムを試作した。既存の AR 試着システムには、人の位置検出に Kinect<sup>8</sup> などの深度カメラを利用するシステム [3, 6]、光学マーカを利用するシステム [1, 2]、などがある。これにより、T シャツ [1]、セーター [2]、ジャケットやスカート [6] などの仮想的な試着を実現している。本研究では、容易に試着できる洋装品と違い、試着が困難で AR で実施することに大きな利点がある和服の帯に着目した。

## 6 まとめと今後の展望

円筒面を始めとする立体物に適するマーカとして、M 系列を使用した円筒形光学マーカ、M 系列マーカを提案した。また、M 系列マーカを使用し、和服の帯の仮想試着を実現する AR 試着システムを実装した。円筒形の M 系列マーカはマグカップ、植木鉢、ワインボトルや花瓶など日常空間における円筒形物体の検出やトラッキングに応用できる。また、球体、錐体などの回転体にも貼付可能であり、認識手法を調整することで角柱や立方体にも適用可能と考えている。

本方式は円筒形物体にマーカを貼付するため、撮影されたマーカ画像は両端に歪みが生じる。今回実装したマーカ認識では、歪みの少ない正面部分の画像を使用した。今後は端部分の歪みを考慮した補正処理を行い、正面のみならずマーカ全体で認識するように改良し、障害物による遮蔽に対してより強固なシステムを目指したい。また、バー幅、遮蔽物に対する耐性などを測定評価し、認識手法の改良を行いたい。

## 参考文献

- [1] J. Ehara and H. Saito. Texture Overlay Onto Deformable Surface for Virtual Clothing. In *Proceedings of the 2005 ICAT*, ICAT '05, pp. 172–179. ACM, 2005.
- [2] K. Kjaerside, K. J. Kortbek, H. Hedegaard, and K. Groenbaek. ARDressCode: augmented dressing room with tag-based motion tracking and real-time clothes simulation. In *Proceedings of the CEMVRC*, 2005.
- [3] M. Sekine, K. Sugita, F. Perbet, B. Stenger, and M. Nishiyama. Virtual fitting by single-shot body shape estimation. In *Proceedings of 5th 3DBODY.TECH*, pp. 406–413, 2014.
- [4] M. Usami, K. Miura, and M. Isshiki. Augmented Reality System to use 3-dimensional Marker for 360-degrees Graphic Rotations Seamlessly in Hand-Motions. Vol. 72, pp. 1–8, 2014.
- [5] R. Xiao, C. Harrison, K. D. Willis, I. Poupyrev, and S. E. Hudson. Lumitrack: Low Cost, High Precision, High Speed Tracking with Projected M-sequences. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on UIST*, UIST '13, pp. 3–12. ACM, 2013.
- [6] Z. Zhou, B. Shu, S. Zhuo, X. Deng, P. Tan, and S. Lin. Image-based Clothes Animation for Virtual Fitting. In *Technical Briefs of SIGGRAPH Asia 2012*, SA '12, pp. 33:1–33:4. ACM, 2012.
- [7] 笹沼 啓, 眞鍋 佳嗣, 矢田 紀子. 4-8 折れ曲がる面で利用可能な AR マーカの提案 (第 4 部門映像表現 (CG,AR, 計測技術)). 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, p. 4.8, 2014.
- [8] 奥山 瑞希, 的場 やすし, 椎尾 一郎. M 系列に基づく円筒バーコードを用いた AR 和服帯試着システム, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 174, No. 1, pp. 1-8, 2017.
- [9] 小野 智司, 川上 雄大, 伊藤 拓也, 澤井 陽輔, 川崎 洋, 中山 茂. ゴミ袋に貼付された歪んだ 2 次元コードの復号. 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 26, pp. 1–4. 人工知能学会, 2012.
- [10] 鈴木 朝日, 眞鍋 佳嗣, 矢田 紀子. 7-1 円筒面を利用可能な AR マーカの提案 (第 7 部門 AR のためのメディア処理). 映像情報メディア学会冬季大会講演予稿集, p. 7.1, 2012.

<sup>8</sup> <https://developer.microsoft.com/windows/kinect>