

深度センサによる織物の破損検知技術の開発

田中克典 橋田 充

Development of fabric damage detection method using depth sensors

TANAKA Katsunori and HASHIDA Mitsuru

タオルの検品作業は人手不足の中で自動化が望まれているが、白単色のタオル等の場合に、場所による色の変化がほとんどないため、パイル抜けのようなタオル表面の凹凸に係る不良をカメラで検知し、通常の画像処理解析をするのは困難である。

そこで、本研究では深度センサカメラ（深度センサ）を用いてタオルの表面凹凸形状を撮影・解析することで“パイル抜け”のようなタオルの物理的な破損を検知し、不良品を判別できるシステムの開発に取り組んだ。

その結果、本システムは白一色のタオルに対しても、最小2mm幅の縦一列の凹凸変化を認識でき、不良品の判定に有効であることが分かった。

キーワード：タオル、破損検知、深度センサ、パイル抜け

はじめに

今治産地におけるタオルの検品作業は、熟練者の目視によって行われており、生産性向上の阻害要因となっている。人手不足の中、検品作業の自動化の要望は高いものの、タオルを構成する数百～数千本のパイル糸からの抜けを判別できる技術が要求され、既存の画像処理のみによる方法ではその判別は困難である。

そこで、本研究では品質検査段階のタオルについて、深度センサをいくつかの撮影角度で使用し、タオル表面の凹凸を測定・解析することにより、“パイル抜け”のようなタオルの物理的破損をより正確に検知できるシステムの開発を行ったので報告する。

実験方法

1. システム開発環境の設定

(1) 深度センサの選定

深度センサには0.1mmの深度分解能を有するIntel社製 RealSense D405 を選択した。同センサはRGBカメラの機能も備えており、深度計測エリアの画像撮影が可能である。深度センサの仕様を以下の表1に示す。

表1 深度センサの仕様

名称	RealSense D405
動作範囲	(最小 - 最大) 7 cm - 50cm
深度検出方法	ステレオカメラによる立体視
Depth 解像度と FPS	720p 30FPS
Depth 視野角	H: 87°, V: 58°
寸法	42 mm × 42 mm × 23 mm

(2) プログラム開発環境の構築

python プログラムにより深度センサから得られる、撮影平面からタオル表面までの距離をサイズ[480×640]の行列データで表した深度情報を取得し、解析を行った。

タオルの破損検知について、取得した深度情報からタオルの破損（パイル抜け）の特徴を学習す

この研究は、「令和6年度起業化シーズ育成支援事業」の予算で実施した。

るプログラムと、撮影中の深度情報に対して正常か破損かを判定するプログラムを作成し、破損検出の評価を行った。

2. 分析対象タオルと分析方法

(1) 分析対象タオル

物理的破損の不具合で最も一般的な”パイル抜け”を取り上げ、パイル抜けのあるタオルを2パターン試織した。一つ目は、縦一列にパイル抜けしたもの、二つ目は、四角形の穴状のパイル抜けがあるものとした。製織条件を表2に示す。2パターンとも3ピック両面パイル構造とし、タオルの大きさは幅82cm、長さ60cmとした。

表2 分析対象タオルの製織条件

使用織機（メーカー名 型番）	高速レピア織機（イテマウィービング製 G-6500）
糸素材	パイル糸：綿糸 20/1 ^S
	地たて糸：綿糸 40/2 ^S
	よこ糸：綿糸 20/1 ^S
よこ糸密度（本/2.54cm）	48
たて糸密度（本/3.79cm）	108
パイル長（mm）	10
箆引き込み	G P [*]
織機回転数（rpm）	300

※Gはグランド糸、Pはパイル糸を表す。

試織したタオルの2パターンのパイル抜けの位置情報をそれぞれ、図1、図2に示す。斜線部がパイル抜けを表す。図1は幅2mm、4mm、6mmの3種のパイル抜けが一枚のタオル内にあるもの、図2は長さ3mm×幅2mmの穴状のパイル抜けが等間隔で存在するものである。

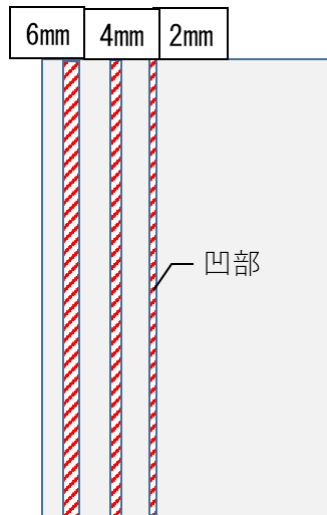


図1 パイル抜けが縦一列のタオル

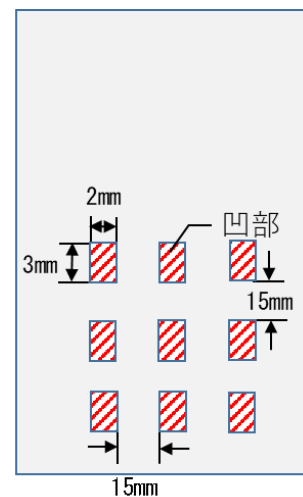


図2 パイル抜けが穴状のタオル

(2) 深度センサによるパイル抜けタオルの測定

試織したパイル抜けタオルを深度センサにより評価した。真上からのみの測定では、隣の倒れたパイル糸によって実際にパイル抜けが生じている部分が撮影できなくなることが予想されるため、深度センサを傾けた測定も行うことで不具合箇所の評価の確度を向上させることも検討した。図3に示すように、測定時の深度センサとタオルとの距離は70mmとし、図3左のように床面に対し、水平方向に深度センサを取り付け、パイル抜けタオルを撮影する方法と、図3右のように床面に対し、深度センサを30°傾けた角度でパイル抜けタオルを撮影する方法で測定した。その測定の様子を写真1に示す。

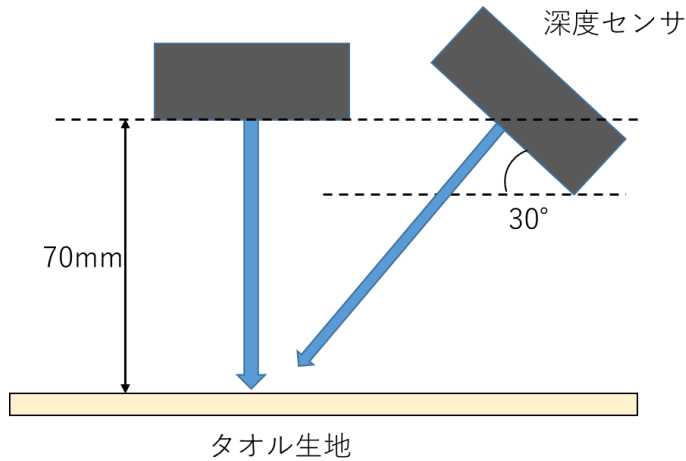


図3 深度センサを用いたパイル抜けタオルの測定方法

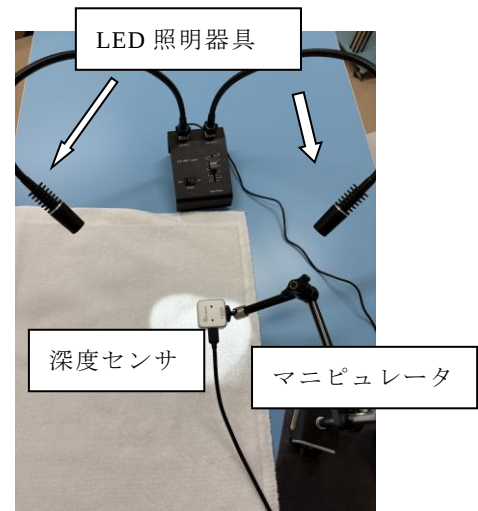


写真1 パイル抜けタオルの測定の様子
(LED照明器具とマニピュレータを使用)

結果と考察

1. システム開発環境の設定

(1) 深度センサから得られる情報

写真2のように、高さ80mmの位置から床面に置かれたA4用紙を撮影した。高さ80mmの位置からの撮影では測定範囲は縦99mm×横133mmとなり、深度情報はサイズ[480×640]の行列データであるため、縦方向、横方向の位置分解能はいずれも0.21mmとなった。正確に得られなかったノイズ部分を除くと、深度値はおよそ800を示した。また、深度センサの動作範囲の上限である500mmの高さから床面を撮影して得られた深度情報は撮影範囲で全体的に5,000前後を示した。

このことから、深度センサからの距離1mmが深度値10に対応しており、測定分解能は0.1mmであることが確認できた。また、取得される深度情報は図4のように、深度センサのある中心点から対象物の各点までの距離を表すのではなく、センサの撮影面からの距離を表すことが確認できた。

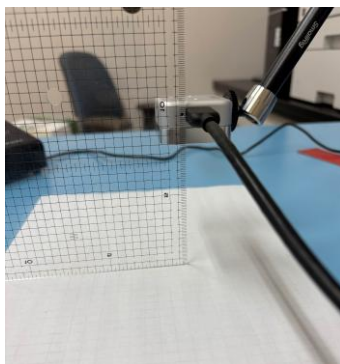


写真2 高さ80mmから撮影した時の様子

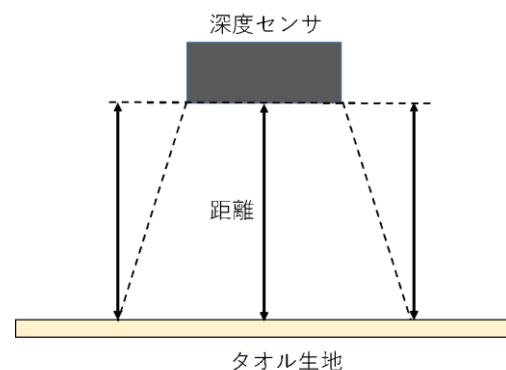


図4 深度センサから得られる深度情報
(※実線矢印長で評価される)

2. 深度センサによるパイル抜けタオルの測定

試織したパイル抜けタオルについて、深度センサで真上および斜めから測定した深度情報により“パイル抜け”を検知できているのかを評価した。なお、深度情報は色の違いにより表した。また、得られた深度値の一部には、光の反射や2つのカメラ視差により、深度値が5,000以上や0として出力されるノイズ箇所がある。そのため、写真1に示しているように、撮影範囲を照明器具で照らすことで、データのノイズ箇所が減少し、深度情報の取得精度が向上した。

(1) 水平方向に設置した深度センサによる測定

縦一列のパイル抜けタオルを測定した結果を写真3に、測定した深度情報を3次元化した結果を図5にそれぞれ示す。3次元グラフにおいては、深度値をマイナスの値に変換後、深度が正しく測定できなかった部分のデータを削除し、[480×480]の範囲で表示した。これで、3次元グラフ上では

タオルのパイル抜け部分は窪んだように見え、パイル抜け部分の特徴を捉えていることが分かった。なお、グラフ全体の傾きは深度センサのわずかな傾きによるものである。幅 2 mm、4 mm、6 mm のパイル抜け部分は図 5 に示されるように、一列につながった凹部が 3 つ確認でき、縦一列のパイル抜けは 2 mm 幅のものまで認識できることが分かった。ただし、場所によっては 2 mm 幅のパイル抜けが確認できない箇所もあった。これは倒れたパイルによりパイル抜け部分が隠れてしまったためである。

次に、穴状のパイル抜けタオルを測定した結果を写真 4、測定時の深度情報を 3 次元化した結果を図 6 に、穴状のパイル抜け箇所の一部を取り出し、その周辺の深度グラフを示した結果を図 7 にそれぞれ示す。図 7 からは、場所によってはパイル抜けと考えられる情報は取得できているが、図 6 の全体データでは穴状のパイル抜けの特徴を認識できなかった。これはパイル糸がパイル抜け部分に重なることに加え、縦一列のパイル抜けとは異なり、縦方向のパイル抜け部分が短く、特徴的な凹凸箇所が捉えられないためと考えられる。ただし、1 パイルだけの抜けであっても、タオル基布部分が確認できれば、人の目でもパイル抜けを確認できることから、パイルが倒れず垂直に立つような処理ができれば、認識精度を向上させることができると考えられる。

撮影したタオルと同規格で長さ 4 mm×幅 4 mm の穴状のパイル抜けを持つタオルを試作し、深度センサで測定した結果を写真 5、深度情報を 3 次元化した結果を図 8 にそれぞれ示す。パイル抜けのサイズが拡大し、肉眼でも判別できるものになれば、パイル抜けを認識することができた。

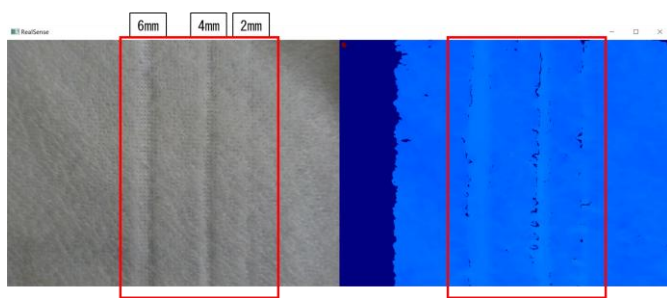


写真 3 真上から縦一列のパイル抜けを持つ
タオルを撮影した時の深度情報データ
(左：RGB カメラ、右：深度情報)

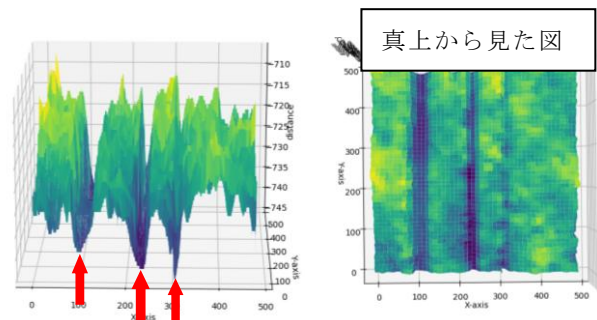


図 5 得られた深度情報のグラフ
(列状のパイル抜け)

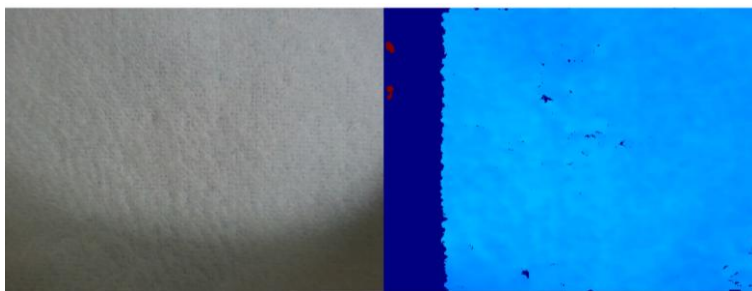


写真 4 真上から穴状のパイル抜けを持つ
タオルを撮影した時の深度情報データ
(左：RGB カメラ、右：深度情報)

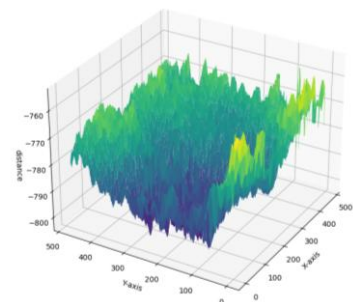


図 6 得られた深度情報のグラフ

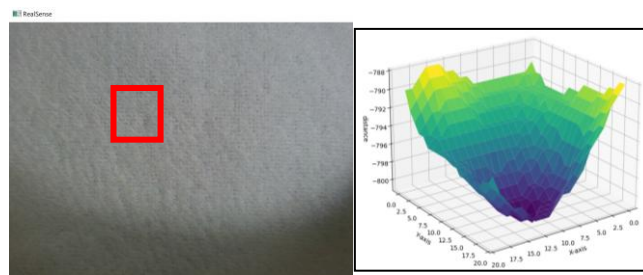


図 7 パイル抜け部分の深度グラフ拡大図（穴状のパイル抜け）

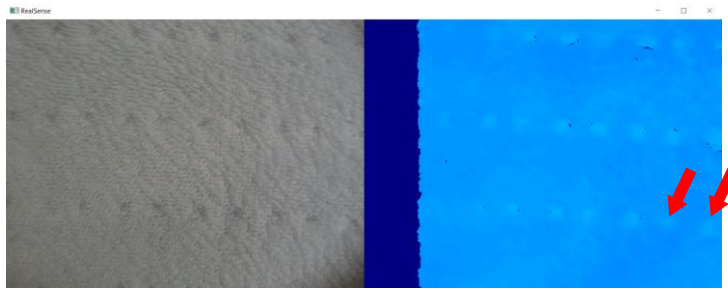


写真5 真上から長さ4mm×幅4mmの穴状のパイル抜けを持つタオルを撮影した時の深度情報データ
(左: RGB カメラ、右: 深度情報)

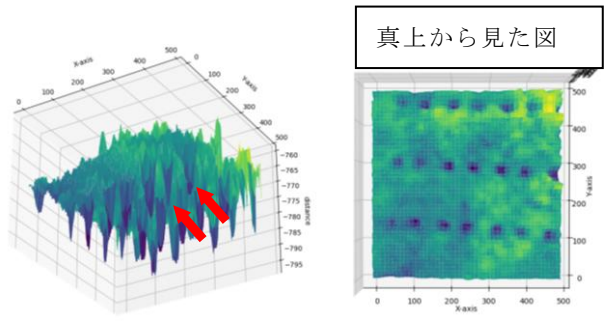


図8 得られた深度情報のグラフ
(長さ4mm×幅4mmの穴状のパイル抜け)

(2) 斜めに設置した深度カメラによる測定

図9のように、斜めからの測定ではセンサから離れるほど、深度値が大きくなり測定できる距離を超えてしまうため、水平方向に置いた深度カメラから撮影した時のようにパイル抜けの特徴が得られにくい。そこで、深度情報に対して撮影角度に応じた補正を行い、水平に置かれたカメラから撮影したかのように深度情報を変換した。

補正は、得られた深度情報（行列データ）の各行のデータに対して、撮影範囲の上下位置に応じた補正係数を掛けることで行った。まず、平面に置かれた紙を30°の角度で撮影した時の深度情報について、それぞれの撮影範囲中央の値を基準とし、中央位置の縦方向の各深度値に対して、基準と同じ数値にする補正倍率を求め、そのグラフの近似式を補正值とした。角度30°で平面を測定した深度情報について、補正前後の3次元グラフを図10に示す。深度情報は撮影角度に応じて一定の割合で変化しているため、近似式は一次関数で表すことができる。近似式を補正值として、斜めからの測定データに用いると、深度情報の数値の勾配がなくなり、深度情報を水平方向に設置した深度カメラから測定した値に変換することができた。

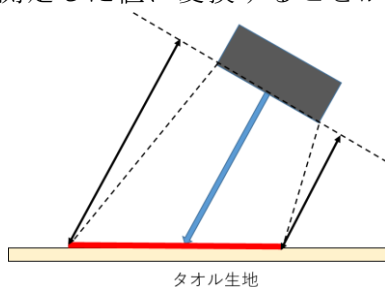


図9 斜めから測定した時の深度情報の変化

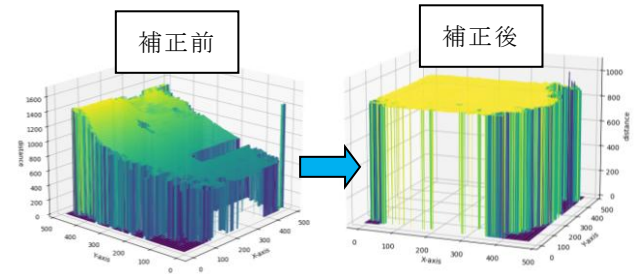


図10 角度30°で平面を測定した深度情報の補正

縦一列のパイル抜けタオルを角度30°で測定し、補正した結果を写真6に、深度情報を3次元化した結果を図11にそれぞれ示す。さらに、穴状のパイル抜けを持つタオルの補正後の結果を写真7に、深度情報を3次元化した結果を図12にそれぞれ示す。特定方向からの測定では、縦一列2mm幅のパイル抜けを確認できなかったが、別の撮影方向からではパイル抜けの隙間を確認できた。これは、ロングパイルが倒れることによってパイル抜けの部分が隠されてしまうが、パイルの倒れる向きはタオル全体では同方向となるため、例えば、反対方向の角度からの撮影では、パイル抜けの箇所を直接撮影できるからである。また、穴状のパイル抜けタオルについては真上からの撮影と同様、タオルのどの向きからでも確認できなかった。これは真上からの測定と同様、パイル抜け部分が短く、特徴的な凹凸箇所が捉えられないことが理由と考えられる。

真上からの測定で用いた、長さ4mm×幅4mmの穴状のパイル抜けタオルを角度30°から測定し、補正した結果を写真8に、深度情報の3次元グラフを図13にそれぞれ示す。斜めからの測定においても、肉眼で判別できる大きさのパイル抜けであれば、認識することができた。

また、撮影角度が高くなるほど深度値が計測不能となる部分の面積割合が増えるため、深度カメラの角度は低い方が広い領域を精度よく分析できることが分かった。

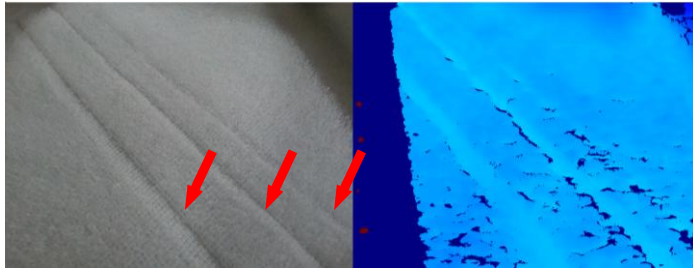


写真6 角度30°から縦一列のパイル抜けを持つタオルを撮影した時の深度情報データ
(左: RGB カメラ、右: 深度情報)

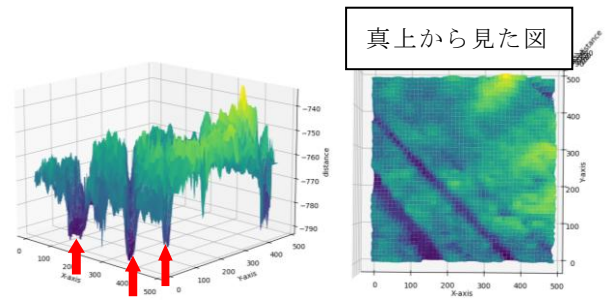


図11 得られた深度情報のグラフ
(列状のパイル抜け)

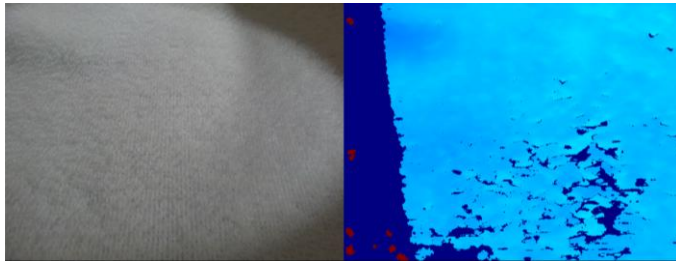


写真7 角度30°から穴状のパイル抜けを持つタオルを撮影した時の深度情報データ
(左: RGB カメラ、右: 深度情報)

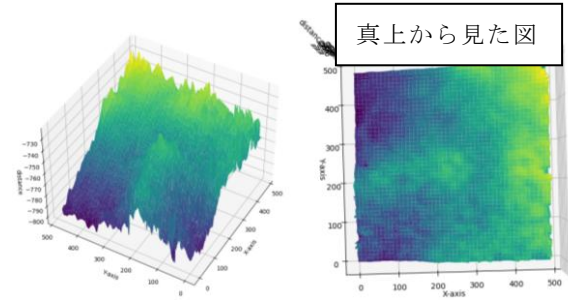


図12 得られた深度情報のグラフ
(穴状のパイル抜け)

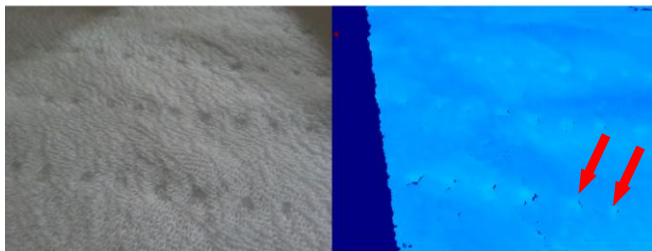


写真8 角度30°から長さ4mm×幅4mmの穴状のパイル抜けを持つタオルを撮影した時の深度情報データ
(左: RGB カメラ、右: 深度情報)

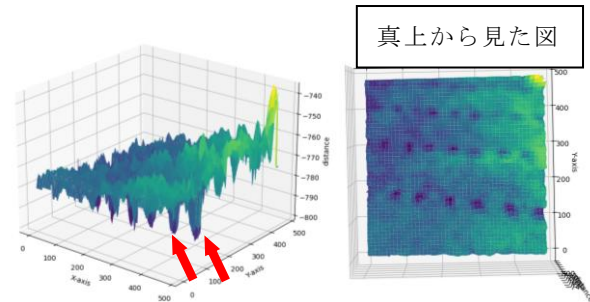


図13 得られた深度情報のグラフ
(長さ4mm×幅4mmの穴状のパイル抜け)

以上の結果から、真上及び斜めからの測定によって、列状及び長さ4mm×幅4mmサイズ程度までの穴状のパイル抜けは検出可能であるが、長さ3mm×幅2mmの穴状のパイル抜けは検出困難であることが分かった。ただし、検出できなかったパイル抜けについては、パイルが倒れず垂直に立つような処理ができれば、検出できる可能性は向上すると考える。

ま と め

深度センサを用いてタオルのパイル抜け物理的破損を検知するシステムの開発を実施した。以下に要点をまとめる。

深度センサとして、深さ方向分解能0.1mmのセンサを使用し、横・縦分解能が0.21mmで分析を行った。

1. 最小2mm幅の列状のパイル抜けの識別は可能であった。
2. 穴状のパイル抜けは、長さ3mm×幅2mmのものは識別できなかったが、長さ4mm×幅4mmのものは識別することができた。
3. 深度センサは、真上からの撮影のみならず、斜めからの撮影により凹凸の不具合の検出を補完することができ、不良品の識別の精度を高めるのに有効であることが分かった。