

深度情報を用いた平板上物体表面の破損率 および傷形状の推定

井口 雅士^{1,a)} 酒井 道¹ 宮城 茂幸¹

概要: 現在, 日本の物流産業は人手不足, 積載効率の低下といった問題を抱えている. これを解決するために, パレット単位の配送が提案され, 企業間でパレットを共有し効率化を目指す時代が来ている. しかし, 使用パレットの状態を把握するシステムは少なく, 目視で仕分けしているのが現状であり, パレットのような全体寸法に比べて小さい傷は, 見落とす可能性がある. さらに, 現存する自動検出システムではパレットの破損は識別できるが, 表面上の傷の検出は難しい. したがって, 物体の形状, 特に表面形状を把握し, 表面上での微細破損も含めた検出手法が必要である. 本研究では, 破損の程度を推定するために, 深度情報を元に, 物体表面形状を推定し, 物体表面の破損率を算出するシステムを提案する. 実際に, 性能の異なる3種のカメラを用意し, それぞれについて, 深度画像のしきい値処理, および, 点群データの近傍点探索を用いて処理を行い, 実測データとどの程度差が発生するかを求めた. 実測データの破損率が12.14%であるのに対し, 3種のカメラはそれぞれ, 12.66%, 13.86%, 11.86%とほぼ同じ数値を示した. しかし, 表面形状を二値化画像として比較すると, 値の欠損や取得データ数不足が顕著な例があり, 検出精度の差を確認できた. また, 個々の微細な傷の評価に関しては, 取得可能な傷の大きさに変化が生じることが確認できた.

1. はじめに

現在の物流産業は様々な問題を抱え込んでいる. 国土交通省の物流政策課が出している資料によると, 労働者不足を抱える運輸関係事業所の数 [1], トラックドライバー不足を感じる企業の数 [2] は, 年々増加傾向にあるという. また, トラックの積載効率 [3] が年々減少傾向にあり, 現在は約40%にまで低下している. 政府は, 総合物流施策大綱 [4] に従い政策を推進しており, この中では積荷の積載時間短縮を目指して, パレットの規格化, 標準化の考え方が示されている. 今後, 各企業がパレットを管理, 共有し連携しあって配送を行う時代がくる. そのため, 簡易にパレットの状態を判別するシステムが求められる.

しかし, 現存するパレットの検査手法は, 検出対象を木製パレットにしているものが殆どで, 現在, 国内で主流となっているプラスチックパレットとは異なる. これらの手法は, 大きく分けて3種類に分類される.

一つは画像を用いて検出するものである. これに該当するものとしては, RGBカメラを用いてエッジ検出をする

手法 [5], また, 検査光をあてて, 検査部の画像を取得し木目模様等から劣化度を図るもの [6] が存在する. 前者では, 撮影したパレット表面のエッジ検出を行い, 表面の傷を検出する. これには, 複数のカメラを用いた様々な角度からの撮影, さらにパレットの全表面を撮影するために, 回転装置によるパレットの回転が必要となり, コストや物的なスペースも必要になるため実用的ではない. 後者は, パレットの上面の板一枚につき複数の照射用の光源, 及び, 撮影用のカメラが必要となる. つまり, 機械による制限が大きい. よって, 少し形状の異なるパレットを検査にかけた場合, 機器の都合に合わず検出できない.

二つめに, 光電管によるセンサを用いた検出方法 [7] は, パレット上面の穴や破損といった欠損を見極めるものである. パレット上面の板一枚に対して光を照射し, 受光部に入る光量の変化調べる. これを上面の各板に対して行う. よって, 一部が欠けて無くなっている程度の破損や, エッジ部分の細かな欠損などは判別がつかない. つまり, 上板が断絶されているような破損を見つけるものとなり, 細かな傷や欠けといった破損形状の把握は難しい.

三つめは, パレット上面に圧をかけ強度を図るといったような加圧方式で, パレット上面の板一枚ずつに圧をかけるもの [8], また, パレット上面の板一枚ずつに, ローラーを押し当てるもの [9] が存在する. 前者は, 機械的に各上

¹ 滋賀県立大学
The University of Shiga Prefecture

² 滋賀県立大学院
Graduate school of The University of Shiga Prefecture

a) os23miguchi@ec.usp.ac.jp

板を押し付け、パレットのたわみを検出し劣化度を算出している。後者は、フレキシブル膜に覆われたローラーを押し付け、フレキシブル膜内部の液圧の変化から上板の欠損を検出している。これらの方法は、上板一枚に対しての圧力の変化を調べており、破損や劣化は把握できても上面の細かな傷は検出できない。

そこで、本研究では深度カメラを用いることで、画角内にパレットを収めるだけで表面形状を取得できる方法を提案する。表面形状を深度値を元に再現するため、表面上の細かな傷も取得可能となる。本研究では、パレットに近い物体として、「すのこ」を撮影対象とする。また、すのこの表面形状を深度情報から取得し、物体表面における破損率を算出することを目標とする。なお、本研究では、深度情報を取得するときの空間分解能が破損率の推定値に影響をおよぼすため、実験では、分解能の異なる3種類の深度カメラを使用し、それらから推定した破損率と実測値から求めた破損率の違いを比較している。

1.1 取得データの処理

本章では取得データの処理方法について説明する。使用したカメラは Intel 社の RealSense, システムクリエイト社の SCAN in a BOX, Photoneo 社の PhoXi 3D Scanner M の3種類であり、以下に外観図を示す。



(a) RealSense

(b) SCAN in a BOX



(c) PhoXi 3D Scanner

図 1 3 種類のカメラの外観図

これら3種類のカメラごとの処理過程の説明を行う。

1.1.1 RealSense による取得データの処理過程

Intel 社の RealSense という深度カメラを用いたときの取得データの処理過程について述べる。深度情報は 640×480 の各ピクセルに深度値が入った状態で出力される。そこで、深度値に対して、カメラ実測データから求めたしき

い値を使って、その値以上か以下かで二値化している。この処理により表面データを二値化している。

1.2 SCAN in a BOX, PhoXi 3D Scanner M による処理過程

Photoneo 社の PhoXi 3D Scanner M という深度カメラと、システムクリエイト社の SCAN in a BOX という 3D スキャナーを、用いたときの取得データの処理過程について述べる。これらのカメラは取得データが点群データであるので、まず、点群データの補正処理について述べる。

1.3 点群データの処理原理

1.3.1 四元数による回転行列

実験では処理工程として取得した地面データを元にカメラの傾きの補正を行う。そのために必要な回転行列 R は以下に述べる四元数から求められる。4つの実数 q_0, q_1, q_2, q_3 を記号 i, j, k を用いて

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$$

と表したものを四元数と呼ぶ。特にノルム $|q|$ が 1 であるものを単位四元数と呼び $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ が成り立つ。また、単位四元数であるとき、

$$q_0 = \cos \frac{\Omega}{2}, \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = \sin \frac{\Omega}{2}$$

となる角度 Ω が存在する。任意の単位ベクトルを $l = l_1i + l_2j + l_3k$ として、単位四元数 q をスカラ部とベクトル部に分けると、

$$q = \cos \frac{\Omega}{2} + l \sin \frac{\Omega}{2}$$

と表せる。これは l を回転軸とし、回転角 Ω の回転を表している。4つの実数 q_0, q_1, q_2, q_3 は、

$$q_0 = \cos \frac{\Omega}{2}, q_1 = l_1 \sin \frac{\Omega}{2}, q_2 = l_2 \sin \frac{\Omega}{2}, q_3 = l_3 \sin \frac{\Omega}{2}$$

となる。ここで、ベクトル α からベクトル α' への回転行列を R とすると、

$$\alpha = R\alpha'$$

$$R = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_2q_1 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_3q_1 - q_0q_2) & 2(q_3q_2 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix}$$

で表すことができる。ベクトル α をベクトル α' と平行になるように回転をする回転行列 R を導出する際、 i, j, k をそれぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸の単位ベクトルとみなし、 α, α' から回転角 Ω と単位法線ベクトル l を以下の式から導出する。

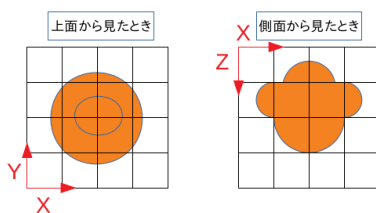
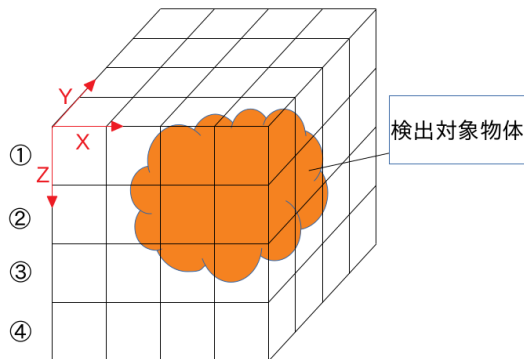
$$\Omega = \arccos \frac{\alpha \cdot \alpha'}{|\alpha||\alpha'|} \quad (1)$$

$$l = \frac{\alpha \times \alpha'}{|\alpha \times \alpha'|} \quad (2)$$

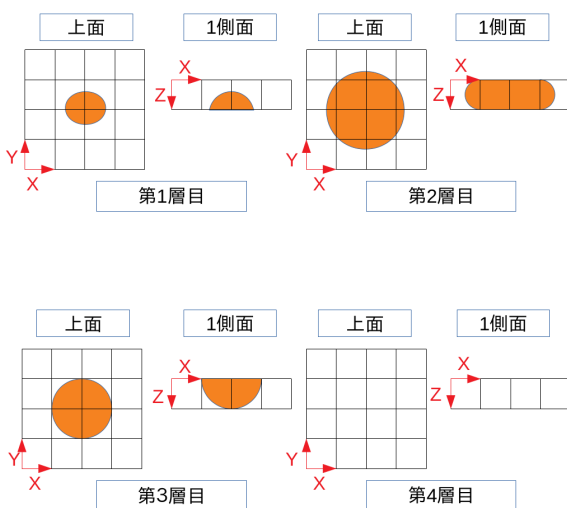
その後、式 (1)、式 (2) より回転行列 R を導出できる。

1.3.2 点群データのボクセル化

点群データは近傍点探索を用いてボクセル化を行う。図2(a)のように検出対象物体周囲の空間にX辺、Y辺、Z辺を区切った立方体を考える。実際には、検出物体は点群データでありカメラから取得してきたものである。つまり、図2(a)中の検出対象物体と記した範囲に大量の点群データが存在している。また、最上面から第1層、第2層、第3層、第4層とみることで、図2(b)のように検出物体を各層ごとに捉えて考える。



(a) 立法空間作成のイメージ



(b) 各層から見た検出物体

図2 ボクセル化のイメージ図

ここにおいて、ある一層について近傍点探索を行う。図3は図2(b)中の第3層目を抜き出して近傍点探索を行うイメージ図である。このように、ある高さ一層について、さ

いの目に区切られた交差する点に対し、ある半径で探索を行う。その結果、ある半径内に点群データが存在すれば、対応したさいの目立法空間に1を立てる。また、点群データが存在しなければ0を立てる。この処理をすべての交差点について行うことで、ある高さ空間を二値化している。

ここまでの、1つ層に対して行った処理を、全ての層に対して行い二値化することで、検出物体のボクセル化を行っている。

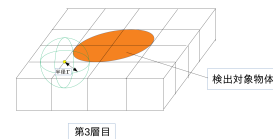


図3 抜き出したある層について近傍点探索を行うイメージ図

1.4 取得点群データの処理過程

Photoneo社のPhoXi 3D Scanner M, システムクリエイト社のSCAN in a BOX, という深度カメラを用いたときの取得データの処理過程について述べる。取得データは、RealSense同様、すのこ表面の深度値の他、すのこ中段の深度値、地面の深度値等が含まれている。また、点群データであり各点群はX軸、Y軸、Z軸の各座標データを保持している。よってここでは、X軸、Y軸、Z軸の単位ベクトルを(0,0,1)とする理想平面を設け、地面の点群データをもとに、理想平面への回転行列を算出し、点群データの傾きを補正する。

次に、補正後のすのこの深度値について、近傍点探索を行い、すのこ表面の深度値のみを二値化して表現する。ここでは、X軸、Y軸、Z軸を、各1mm幅で区切った立方体を作成する。すのこが収まるサイズの立方体は、点群データの最小値、最大値を各軸に対して取得し、X軸、Y軸、Z軸の幅を決定している。その後、各交差点に対して半径0.8mmで近傍点探索を行う。この時、探索対象となるのは平面化した点群データである。半径0.8mm範囲内に点群データが存在すれば、対応したボクセル空間に1を立てる。また、点群データが存在しなければ0を立て、ある高さ空間を二値化する。そして、すべての高さにおいて二値化を行う。ここで、すのこの表面データとなるのは、ボクセルに1が立った数が最も多い高さ空間であるので、各高さ空間の1の立ったボクセル数を取得し図4のように、最大値となった高さの±1mmの空間を合成し、すのこ表面データの2値化画像を作成している。

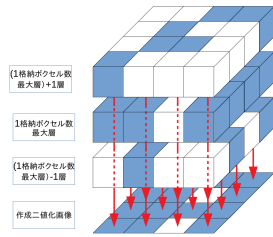


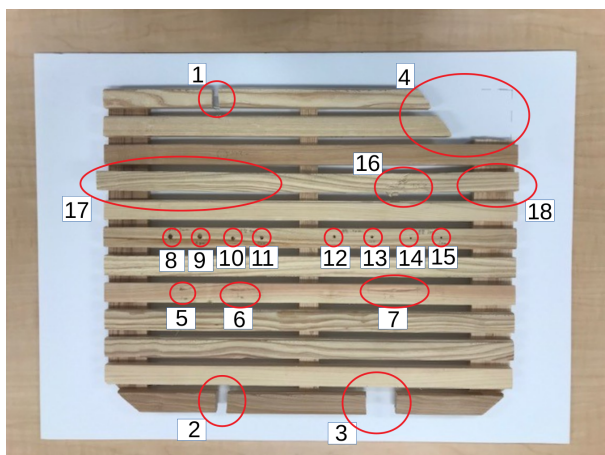
図 4 すのこ表面データ作成のイメージ図

2. 撮影実験

本章では、実際に撮影を行った際の撮影環境について述べる。実験では、表面情報及び、破損情報を取得する対象として「すのこ」を使用し撮影した。図 5(a) は使用したすのこの画像であり、図 5(b) は破損状態として使用したすのこの写真である。図 5(b) 中の番号は破損箇所を示しており、番号に対応した破損の状態を表 1 に示す。



(a) 未破損状態として使用したすのこの画像



(b) 破損状態として使用したすのこの画像

図 5 使用したすのこの外観図

表 1 すのこにつけた傷の一覧

図 5(b) 中の番号	傷の種類
1	上面欠損 10mm
2	上面欠損 30mm
3	上面欠損 50mm
4	角欠損
5	切り傷 長さ 5mm, 最大幅 5mm, 最大深さ 3mm
6	切り傷 長さ 10mm, 最大幅 5mm, 最大深さ 3mm
7	切り傷 長さ 30mm, 最大幅 5mm, 最大深さ 3mm
8	穴 直径 5mm 深さ 10mm(貫通)
9	穴 直径 5mm 深さ 4mm
10	穴 直径 4mm 深さ 10mm(貫通)
11	穴 直径 4mm 深さ 4mm
12	穴 直径 3mm 深さ 10mm(貫通)
13	穴 直径 3mm 深さ 4mm
14	穴 直径 2mm 深さ 10mm(貫通)
15	穴 直径 2mm 深さ 4mm
16	凹み
17	突出

実験では、このすのこを 3 種類のカメラを用いて撮影した。

2.1 RealSense による深度値取得

一つ目の撮影環境として、intel 社の RealSense D435 を使用し、深度値を取得する。表 2 に RealSense の仕様を示す。図 6 に動作環境の模式図を示す。カメラ、パレットはなるべく水平になるように取り付けパレット全域が深度画像の画角内に収まるよう取り付けられた。

表 2 Intel Realsense D435 の仕様

仕様一覧	
深度画像解像度	最大 1280 × 720 @90fps
深度カメラ視野角 (D × V × H)	87° ±3° × 58° ±1° × 95° ±3°
認識範囲	最小 10.5cm

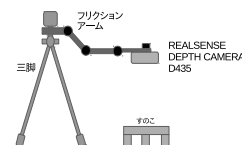


図 6 RealSense による撮影環境の模式図

2.2 PhoXi 3D Scanner による深度値取得

二つ目の撮影環境として、Photoneo 社の PhoXi 3D Scanner M を使用し、深度値を取得する。表 3 に PhoXi 3D Scanner の仕様を示す。図 7 に撮影環境の模式図を示す。カメラ、パレットがなるべく水平になるように、カメラを固定台に設置しパレット全域が深度画像の画角内に収まるよう取り付けられた。

表 3 PhoXi 3D Scanner M の仕様

仕様一覧	
カメラ解像度	3.2MP
点間ピッチ [mm]	0.286
スキャンエリア [mm]	590 × 421
認識範囲 [mm]	458~1118

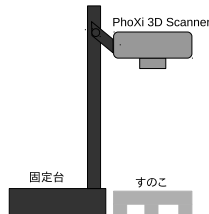


図 7 PhoXi 3D Scanner M による撮影環境の模式図

2.3 SCAN in a BOX による深度値取得

三つ目の撮影環境として、システムクリエイト社のSCAN in a BOX を使用し、深度値を取得する。表 4 に SCAN in a BOX の仕様を示す。また、図 8 は撮影環境の模式図である。表 4 で示したように撮影範囲は 500 × 400mm とパレットサイズの 412 × 300mm よりも広い範囲を取得可能としている。しかし、実際にはスキャナの補正の際、カメラの焦点が合わず深度値の取得することが叶わなかった。なので、本実験では撮影範囲を狭め、補正が上手くいく範囲でパレットを撮影した。よって、実験では、250 × 200mm の範囲でパレットの四分の一ずつを撮影した。その後、それら 4 データを合成し 1 枚の深度画像のように見せている。

表 4 SCAN in a BOX の仕様

仕様一覧	
カメラ解像度	1.3MP
点間ピッチ [mm]	0.078~0.390
スキャンエリア [mm]	100 × 80~500 × 400

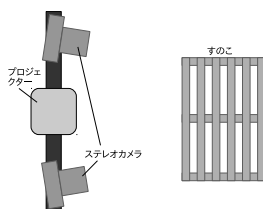


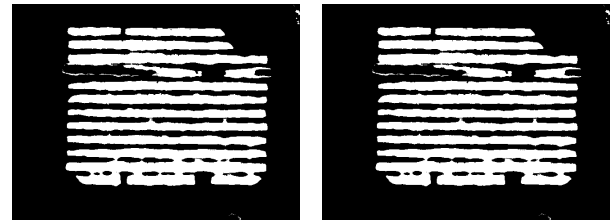
図 8 SCAN in a BOX による撮影環境の模式図

3. 結果

本章では、実際に行った実験の結果について説明する。各結果は、取得点群データの処理を終え、表面データを抜き出している。

3.1 Realsense による撮影の結果

図 9(a), 図 9(b) は RealSense によって取得した深度値から、すのこ表面の二値化画像を作成したものであり、図 9(a) が未破損状態、図 9(b) が破損状態を示している。



(a) 未破損すのこ表面の二値画像 (b) 破損すのこ表面の二値画像

図 9 realsense による撮影で作成した画像

3.2 PhoXi 3D Scanner による撮影の結果

図 10(a), 図 10(b) は SCAN in a BOX によって取得した深度値から、すのこ表面の二値化画像を作成したものであり、図 10(a) が未破損状態、図 10(b) が破損状態を示している。

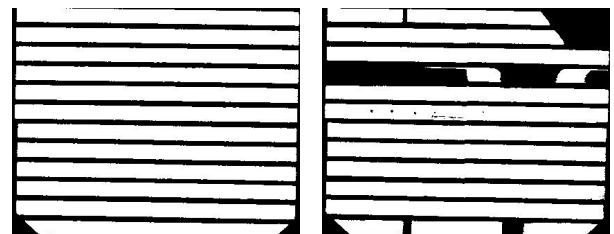


(a) 未破損すのこ表面の二値画像 (b) 破損すのこ表面の二値画像

図 10 PhoXi 3D Scanner M による撮影で作成した画像

3.3 SCAN in a BOX による撮影の結果

図 11(a), 図 11(b) は SCAN in a BOX によって取得した深度値から、すのこ表面の二値化画像を作成したものであり、図 11(a) が未破損状態、図 11(b) が破損状態を示している。



(a) 未破損すのこ表面の二値画像 (b) 破損すのこ表面の二値画像

図 11 SCAN in a BOX による撮影で作成した画像

3.4 表面の傷の取得

図 12 はすのこ表面を基準に、±1mm 層、つまり、3 層分を抜き出して比較したものである。図 12 中の傷 1, 2, 3 には傷をつけており変化を示している。パレット上面につ

けた傷が各層で取得できているのがわかる。これより深さ方向に関しては1mmオーダーでの取得が可能であった。



図 12 傷の深度値取得結果

次に、同様に図 12 の、「穴取得範囲」と示した範囲をみる。ここでは、直径を1mmずつ小さくした穴を、左から8箇所開けている。各直径の穴には、貫通と深さ4mmの2パターン用意して検出を行った。このうち左4つの穴(直径5mmの貫通と深さ4mm, 直径4mmの貫通と深さ4mm)のみ取得できた。よって、幅に関しては4mm以上のものであれば取得可能という結果になった。また、幅4mmのようなギリギリ取得可能なものは、深さの取得は曖昧な結果であった。

4. 結論

本研究では3種のカメラ, RealSense, PhoXi 3D Scanner, SCAN in a BOXにて深度値を取得し物体表面の破損率を算出する手法を提案した。検出結果をすのこ上面の面積で評価したとき, 実測データが95342mm²であるのに対し RealSenseは89941mm², PhoXi 3D Scannerは105938mm², SCAN in a BOXは99228mm²とどれも近い値となったが, 深度画像では RealSenseは欠損が多く物体表面の状態取得に向かないことを確認した。また, 破損率は実測データが12.14%であるのに対し, RealSenseは12.66%, PhoXi 3D Scannerは13.86%, SCAN in a BOXは11.86%であり, SCAN in a BOXによる撮影が最も近い値を取った。傷の取得においても SCAN in a BOXは5mmほどの幅を持つものなら検出することができ, SCAN in a BOXほどの性能で点群データを取得できれば, 高精度のパレットの検出に期待が持てる。

参考文献

- [1] 厚生労働省, ”労働力経済動向調査”, 2月, 2019
- [2] 全日本トラック協会, ”トラック運送業界の景況感”, 第103回, 7~9月期, 2018
- [3] 国土交通省, ”自動車統計輸送年報”, 第56巻, 第13号, 2018

- [4] 国土交通省, ”総合物流施策大綱”, 2017~2019
- [5] M.A. Patricio, D. Maravall, ”A novel generalization of the gray-scale histogram and its application to the automated visual measurement and inspection of wooden Pallets”, Image and Vision Computing, vol.25, pp 805–816, 2007
- [6] 大谷 昌司, 山本 匡徳, ”パレット検査装置”, 特開 2009-42193, 2009-02-26
- [7] 飯野 薫, 中島 政夫, ”パレット検査装置”, 特開 1989-99012, 1989-07-03
- [8] 中村 和成, ”木製パレットの不良検出方法及び装置”, 特開 2000-321042, 2000-11-24
- [9] 緑川 浩史, 加藤 一郎, 中嶋 仁志, ”パレット検査機構”, 特開 1996-215644, 1996-08-27