

マイクロスラリージェットエロージョン法を用いた 表面特性評価技術

Technology for evaluating surface properties using micro-slurry jet erosion

川田 尚史^{※1}

Takashi KAWATA

耐摩耗用の硬質薄膜コーティングを開発する中で我々が直面している課題に、 μm オーダーの多層膜の深さ方向に対する強さ推移の評価、および薄膜の破壊に対する強さの評価がある。これら課題を解決できないかと考え導入したマイクロスラリージェットエロージョン（以下、MSE と記す）法により摺動部材の表面にコーティングした硬質薄膜の機械的特性を評価した。その結果、上記課題の解決に有効であることが分かった。

Challenges we are facing in developing hard thin film coatings for wear-resistance is the evaluation of the change in strength in the depth direction of μm order multilayer films and the evaluation of the strength against thin film destruction. The mechanical properties of the hard thin film coated on the surface of the sliding member were evaluated by the micro-slurry jet erosion (hereinafter referred to as MSE) method, which was introduced to solve these problems. As a result, it was found to be effective in solving the above problems.



エコロジー訴求点と
顧客メリット

- ①省資源化
- ②製品寿命向上

1. はじめに

持続可能な開発目標（SDGs）17ゴールの中に「持続可能な消費と生産」がある。メーカーの視点からこのゴールへの貢献を考える場合、生産性向上などによる省エネ・省資源化のみならず、製品の寿命向上によって消費量を抑制することも手段の一つである。

当社の主力製品群であるチェーンや減速機などの動力伝達部品には至るところに摺動部が存在し、これら摺動部が一定量以上摩耗することで製品寿命を迎える。つまり摺動部の摩耗の抑制は製品寿命向上に直結するため重要な課題である。

当社には摩耗抑制のため摺動部に硬質の薄膜をコーティングした製品がある。更なる耐摩耗性を有する硬質薄膜の開発では、単純に硬いだけでなく、基材との界面で剥離しないことや膜内部で破壊しないといった特性が必要である。その優劣の指標を得るには下記評価方法の確立が課題である。

- ① μm オーダーの多層膜の表面からの硬さ推移の評価
- ② 薄膜の破壊に対する強さの評価

本報ではこれらの解決を期待し、新たに導入した試験法「MSE」を用いて当社の硬質薄膜を評価した例を報告する。

2. MSEについて

2.1 MSEで評価できること

薄膜の機械的特性を評価するための従来方法としては硬さやスクラッチおよび摩擦摩耗試験などを用いることが一般的である。これら評価法はある一定範囲に負荷をかけて破壊を生じさせるため、精密な測定が困難である。特に薄膜を評価する場合は基材の影響を受けず、膜単体を評価することが困難である。しかし、MSEはその原理上、負荷をかける範囲が微小（詳細は2.2で紹介）であるため、非常に精密にかつ、基材の影響をほぼ受けることなく測定することができ、深さ方向に変化する特性（強さ）を数十 nm の分解能で連続的に可視化できる。

一方、硬質薄膜の破壊に対する強さを評価する方法としてはインデンテーション法で得られる荷重変位曲線の不連続部を用いる方法が文献¹⁾などで紹介されている。しかし、これもまた上記と同じ理由で膜単体の評価が困難ということに加え、低荷重で測定する場合は経験上、

※1 研究開発部

不連続部が現れることが稀であり、破壊に対する強さの評価は困難を極めていた。MSEは測定条件の変更により、硬さに相当する強さだけでなく、破壊に相関する強さを評価できる（詳細は3.3で紹介）という特長がある。

2.2 MSEの基本原理

水にセラミックス粒子を分散させたスラリーを、圧縮空気で加圧してノズルより一定量試験片に高速投射（図1）すると、試験片表面にはノズルの断面形状とほぼ同じ正方形のエロージョン^{*1}痕（図2）が形成される。このエロージョン痕の形状を触診式の形状測定機で測定する。エロージョンは深さ方向に進行するので、スラリー投射と計測を繰り返すことで、投射粒子量に対するサンプル内部のエロージョン深さ（以下、エロージョン率 $\mu\text{m/g}$ ）の変化がわかる。

スラリーに分散させるセラミックス粒子の大きさは数 μm と微小であるため、一つの粒子が衝突した時のエネルギーは非常に小さい。基材の影響をほぼ受けることなく評価できるのはこのためである。

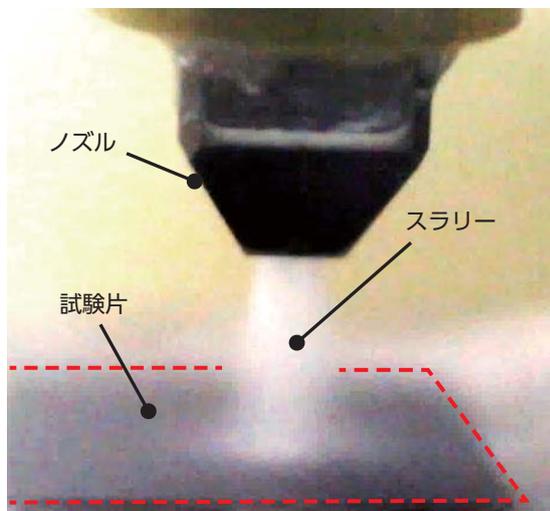


図1. スラリー投射ノズルの外観

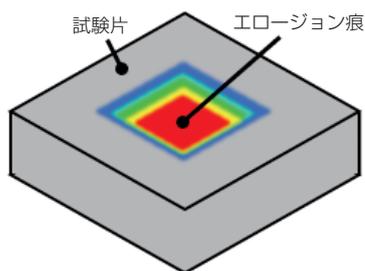


図2. エロージョン痕の模式図

3. 測定例

3.1 硬さと関係

硬質薄膜をMSEで評価するにあたり、従来の評価方法のひとつである硬さ試験の結果との関係性を把握した。

図3は、数種類の硬質薄膜の硬さを縦軸に、MSEで測定したエロージョン率を横軸にプロットした結果である。硬さ試験では基材の影響を小さくするため、負荷荷重をJISに沿い圧痕深さが膜厚の10分の1以下に設定して測定した。エロージョン率は、セラミックス粒子に高硬度の超微小径多角を使用し、表面から基材直上まで測定した際の、エロージョン深さを投射粒子量で除して求めた。尚、サンプルにはいずれも単層で均一な膜を用いて測定した。

硬さの値が高いほどエロージョン率は低い（ \equiv 強さ大）傾向が確認できた。これより、MSEを用いて本条件で測定したエロージョン率は、硬さと相関のある強さを示すことが確認できた。

3.2 膜の構造と強さの関係

硬質薄膜と基材の硬さのギャップが大きい場合、外部から大きな負荷が加わった際に変形量の差から膜と基材の界面に大きな応力が加わり剥離が生じ問題になることがある。その対策法の一つとして、硬質膜の多層化がある。表面から基材にかけて段階的に硬さが低い層を形成して各界面に生じる応力を小さくし、剥離を抑制する狙いである。

耐摩耗用の硬質膜の開発においても、上記の思想の元、多層化膜を試作するが、各層厚が μm オーダーである場合、従来の硬さ試験では各層ごとの硬さを測定することができず、狙い通りの膜構造になっているか確認することが困難であった。そこで、MSEを用いて、多層で構成される薄膜の深さ方向の強度変化を連続的に評価した。

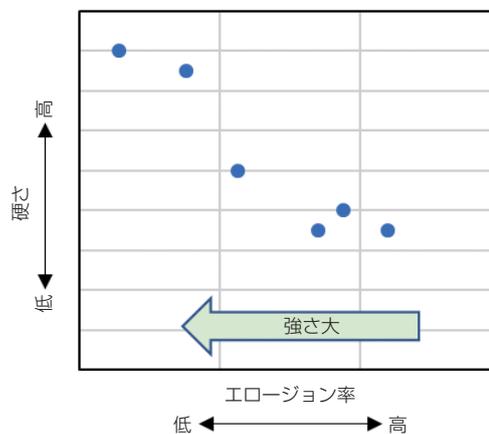


図3. 硬さとエロージョン率の関係

測定に供した薄膜の断面組織写真を図4に示す。表面から基材にかけて4層構造を呈しており、各層の膜厚は数 μm オーダーである。図5は表面から基材にかけての深さ方向のエロージョン率をプロットしたものである。測定条件は前述の通り、硬さとの相関が見られた条件で実施した。

エロージョン率は4層目と3層目の界面近傍が最も低く(強さ大)、基材にかけて2層目、1層目と徐々に高く(強さ小)になっている。これより、狙い通り表面から基材にかけての硬さが徐々に低下し、大きな硬さのギャップがない膜構造になっていることが確認できた。

3.3 測定条件変更による異なる強さの評価

MSEは原理上、スラリーに分散させるセラミックス粒子の大きさや形状が異なると、粒子が衝突するときに測定面に入力されるエネルギー量も異なる。この原理を利用し、粒子の種類を変更することで異なる強さを評価できる²⁾。そこで、非常に硬質な耐摩耗用の薄膜を2種類の粒子で測定した。

1つ目の粒子は、高硬度超微小径多角粒子(以下、多角粒子と記す)である。これは前項で硬さとの相関が認められた条件で使用した粒子である。エネルギー量が少なく影響範囲が狭いため、エロージョン率は、結晶内の原子・分子間結合強度を反映した膜の強さを示す。2つ

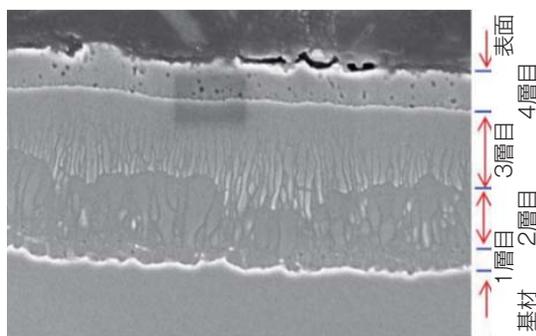


図4. 表面処理膜の断面組織

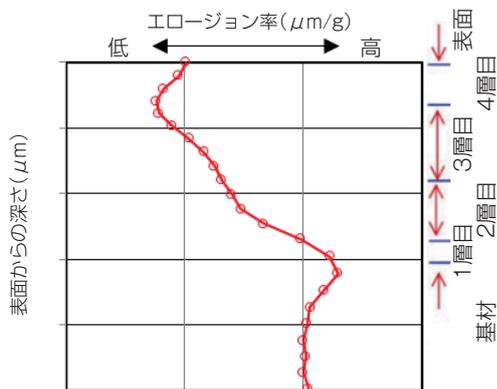


図5. 表面から深さ方向へのエロージョン率の変化

目の粒子は質量が大きい球粒子(以下、球状粒子と記す)で、エロージョン率は、1つ目の粒子に比べて広範囲かつ深くまでの影響を含んだ膜の強さを示し、結晶粒間の結合強度・クラック・ボイドの影響を反映する強さを示す²⁾。金属のように塑性変形による強硬化機構がない硬質材料では、結晶内の原子や分子間結合より弱いこれらの部分が破壊起点となる。つまり、球状粒子で測定した強さは破壊に対する強さを示すと考えられる。

多角粒子および球状粒子で測定した結果を図6に示す。多角粒子の場合、表面から基材近傍まで膜内はほぼ均等に低いエロージョン率を示した。一方、球状粒子で測定した場合、エロージョン率は均等でなく、表面は低く、深くなるにつれて高くなった。

それぞれの測定面を観察すると、多角粒子の測定面(図7)は滑らかなのに対し、球状粒子の測定面(図8)には結晶粒界に沿ってクラック(破壊)が生じていた。多角粒子に比べ比較的広範囲に深くまで大きなエネルギーが繰り返し加わることで、結晶粒界を起点に脆性的な破壊が生じたと推定する。これより、球状粒子を用いた測定で、硬質膜の破壊に対する強さを評価できることがわかった。

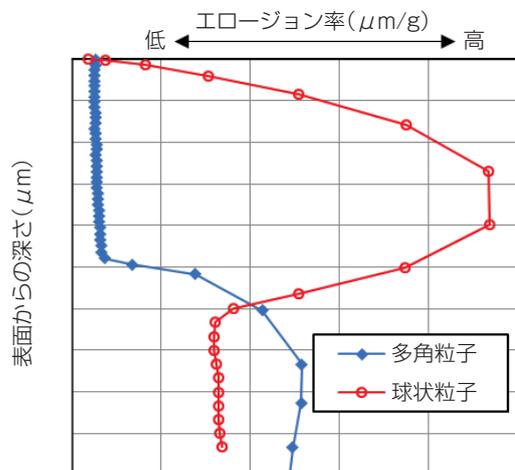


図6. 2種類の粒子で試験した硬質膜のエロージョン率

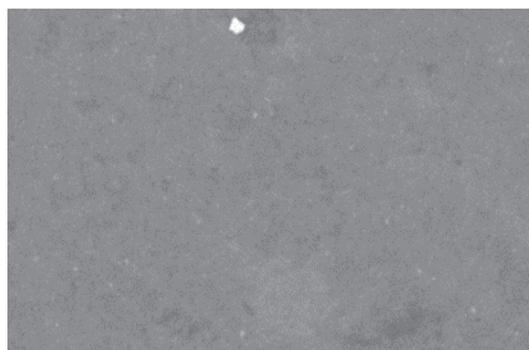


図7. 多角粒子を用いた測定面

3.4 MSEマップ*2

種々の摺動部材について、多角粒子で測定したエロージョン率の逆数を横軸に、球状粒子で測定したエロージョン率の逆数を縦軸にとったMSEマップを図9に示す。この図の位置から硬質膜の特性を読み取ることができる。具体的には、右上に位置するほど、硬さおよび破壊に対して強く、左下に位置するほど硬さおよび破壊に対する強さが弱いということがわかる。

各種アプリケーションの摺動部に必要な、硬さと破壊に対する強さのバランスを持った材料を選定するデータとして活用するため、今後もさらに測定データを蓄積していく。

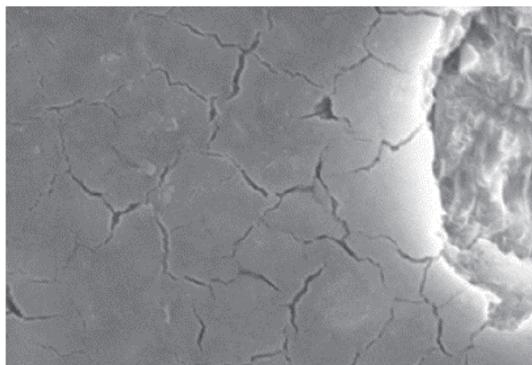


図8. 球状粒子を用いた測定面

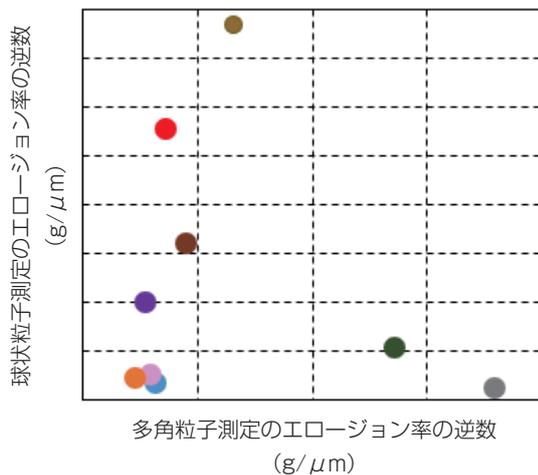


図9. 各種硬質薄膜のMSEマップ

4. おわりに

新しく導入した試験法「MSE」は、耐摩耗性向上を目的とした硬質薄膜コーティングの開発に関する下記の課題解決に有効であることが確認できた。

- ① μmオーダーの多層膜の表面からの硬さ推移の評価
- ② 薄膜の破壊に対する強さの評価

今後も引き続きMSEの測定データを蓄積するとともに、エロージョン現象をより詳しく観察し、実機で生じる摩耗現象との共通点を見出し、硬質薄膜コーティングのみならず摺動部全般の耐摩耗性向上のための技術開発に活用していく。

参考文献

- 1) 日本トライボロジー学会セラミックスのトライボロジー研究会, セラミックスのトライボロジー, 養賢堂, 2003
- 2) 株式会社パルメソのホームページ「2粒子試験でみる硬質薄膜と基材の特性」, <https://palmeso.co.jp/mse/casehardness-2/>, (URL参照日 2020年8月24日)

技術用語解説

*1 エロージョン

材料に個体、液体および気体によって機械的力が繰り返し与えられることによって材料表面が変形・劣化し、少しずつ材料が離脱することで減肉を生じさせる現象

*2 MSEマップ

材料に内在する「硬くて脆い」などの相反する2面性を可視化・数値化する目的でMSEのメーカーである(株)パルメソが開発した評価手法。 <https://palmeso.co.jp/mse/mse-map/> (URL参照日: 2020年8月24日)

画像処理による耐久試験向けチェーン摩耗伸び計測手法

Chain wear elongation measuring method for durability test by image processing

桃野 秀行^{*1}

Hideyuki MOMONO

当社では各種センサーを活用して評価技術の強化に取り組んでいる。取り組みの一例として、画像センサー・画像処理を活用して、耐久試験機用チェーン摩耗伸び計測手法を開発した。この手法により、チェーン摩耗伸び測定業務の効率化を実現できた。さらに、従来評価できなかったリンクごとの摩耗伸びも評価できるようになった。

We are working on improving the evaluation technology by utilizing various sensors. Example of our initiative, we have developed a chain wear elongation measuring method for chain durability testers by utilizing image sensors and image processing. This method has made it possible to improve the efficiency of chain wear elongation measurement work. Furthermore, this method has made it possible to evaluate the link-by-link wear elongation which could not be evaluated in the conventional manner.

エコロジー訴求点と
顧客メリット

- ①チェーン開発業務の効率化
- ②チェーン評価技術強化による商品の高品質化

1. はじめに

当社では顧客ニーズに応えるべく、ローラチェーン（以下、チェーン）の新商品開発や要素技術開発を行っている。開発品の耐久性評価における重要な項目の一つとして、摩耗寿命が挙げられる。チェーンは摩耗により部品間のガタが大きくなって伸びるため、摩耗伸びが所定の値に達した時間を摩耗寿命と定義して評価している。

チェーン摩耗伸びを評価する測長作業は、耐久試験機を停止してチェーンを取り外し、チェーンを懸下してチェーン全長を測長した後、再び耐久試験機に取り付けて運転を再開する、という手順で行われる。1回の測長作業につき20分ほど作業時間を要する。

摩耗伸びの経時的な推移はチェーンの種類や条件により多様であるため、上記の測長作業は試験開始当初から一定時間間隔で実施しなければならず、1サンプルの試験で通常20回から30回程度の測長作業を要する。また、複数の開発品評価を同時並行で実施しており、測長作業に多大な工数がかかっている。

そこで今回、画像処理により試験機運転中のチェーンの摩耗伸びを測長できる手法を開発し、耐久試験実施に要する工数を大幅に削減するとともに、従来手法では不

可能であった評価項目の測定を可能とした。また、計測システムを遠隔制御することで試験環境全体の自動化にも取り組んだので、本稿でこの手法を紹介する。

2. 画像による摩耗伸び計測手法

2.1 チェーン摩耗伸びとピン位置の関係

チェーン構成部品を図1に、チェーン長さ構成を図2に示す。チェーン全長は、外ピッチと内ピッチの2種類のピッチが交互に連なって構成されている。外ピッチは外リンクに嵌合されている2つのピン間距離であり、内ピッチは内リンクに嵌合されているブシュ内周と接触している2つのピン間距離である。両ピッチとも2つのピン間距離で構成されているため、ピン端部の位置から各ピッチに算出でき、さらに各ピッチからチェーン全長を算出できる。

チェーンの摩耗発生箇所を図3に示す。チェーン駆動時にはピンとブシュ内面の摺動により、主にブシュ内面が摩耗するため、異なる外リンクに嵌合されている2ピンで構成される内ピッチが伸びるが、同じ外リンクに嵌合されている2ピンで構成されている外ピッチは変化しない。すなわち、内ピッチの増大を測定できれば、チェーン摩耗伸びを測定できる。

*1 研究開発部

2.2 テンプレートマッチングによるピン検出

チェーン画像からのピン端部の検出にはテンプレートマッチング手法を使用した。テンプレートマッチングは、検出対象のテンプレート画像を入力画像上で走査させながら一致度を算出し、一致度が高い値となる位置を検出する画像処理である。

ピン画像をテンプレート画像としてチェーン画像にテンプレートマッチング処理を実施した結果を図4に示す。ピン部で一致度のピークが発生しており、ピンのみ検出することが可能である。



図1. チェーン構成部品

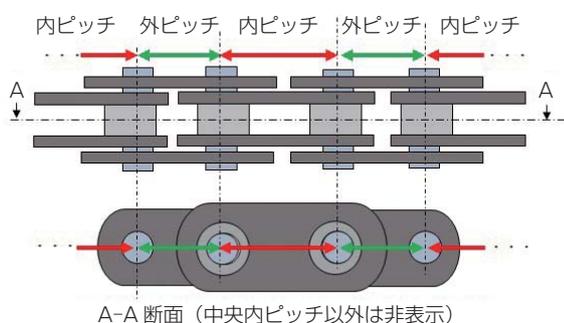


図2. チェーン長さ構成

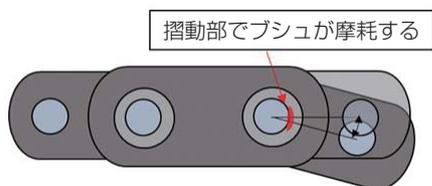


図3. チェーン摩耗発生箇所

一致度の算出には、撮影環境の明るさの変動に強い正規化相互相関法(式1)を用いた。また、一致度は画素単位の離散値の配列として得られるため、ピーク値とその近傍の値から曲線近似にてピーク位置を推定するサブピクセル処理を用いて検出位置の精度を向上している。

2.3 撮影条件の決定

画像処理計測において必要精度を確保するには、対象物とその環境に応じた適切な撮影条件の選択が必要である。一例として、照明光の違いによる同一チェーンの画像と処理結果を図5に示す。両画像とも画像中の左のピンをテンプレート画像として右のピンを検出させ、ピン検出の安定性を評価した。ドーム照明を用いてピン端面に対して様々な方向成分を持つ光を照射すると、個体差が現れやすい表面凹凸形状や汚れ等が目立つ画像となり、一致度が低くなった。一方でローアングルリング照明を用いてピン端面に対して角度が浅い傾斜光を照射すると、個体差が小さいピン外縁部のみが目立つ画像となり、高い一致度を示した。本システムではピン端面に対して角度が浅い傾斜光を照射する方が高精度で安定したピン位置検出が期待できる。

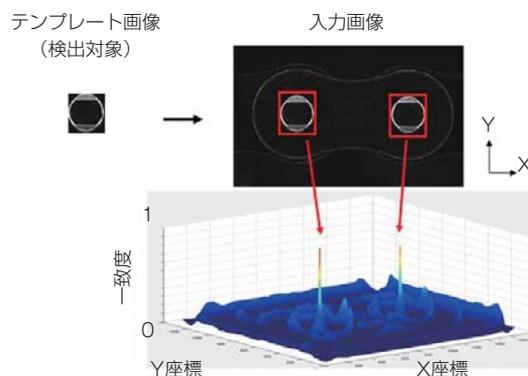


図4. ピン画像とのテンプレートマッチング結果

$$C(x, y) = \frac{\sum \sum \{g(x+i, y+j) - \mu_g\} (f(i, j) - \mu_f)}{\sqrt{\sum \sum (g(x+i, y+j) - \mu_g)^2} \sqrt{\sum \sum (f(i, j) - \mu_f)^2}} \quad \dots (1)$$

(なお、 $\sum \sum = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h$)

- $C(x, y)$: 入力画像の位置 (x, y) における一致度
- $g(x, y)$: 入力画像の画素値
- $f(x, y)$: テンプレート画像の画素値
- w, h : テンプレート画像の幅と高さ
- μ_g, μ_f : 各画像の画素値の平均値

撮影条件としてはこのほかに、照明の位置、カメラレンズの画角、カメラの露光時間などがあるが、これらの影響を総合的に評価して最適な選択肢あるいは設定値を得るために品質工学の手法を応用した。

測定精度の評価は、予め摩耗伸びの程度が異なる3種類のチェーンを用意し、開発手法（画像処理）と従来手法（試験機から取り外したチェーンを懸下して測長）との測定結果と対比することにより行った。数値的指標としては、横軸に従来手法、縦軸に本手法の伸び率測定結果をプロットしたときのSN比を算出し、実用時の安定性確保のためのノイズ因子には試験時に変動するチェーン走行速度を設定した。撮影条件の組み合わせには直交

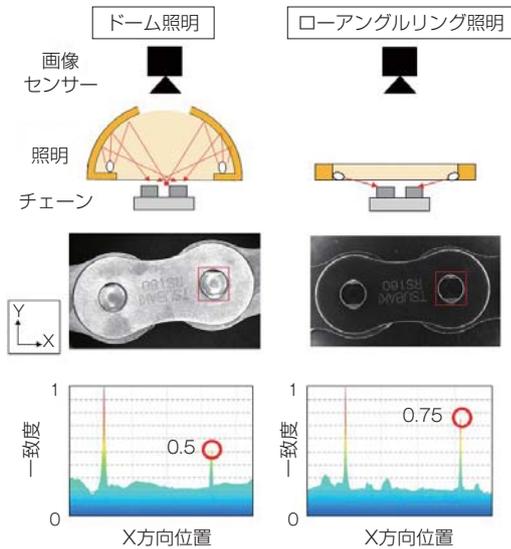


図5. 照明光違いの画像と処理結果

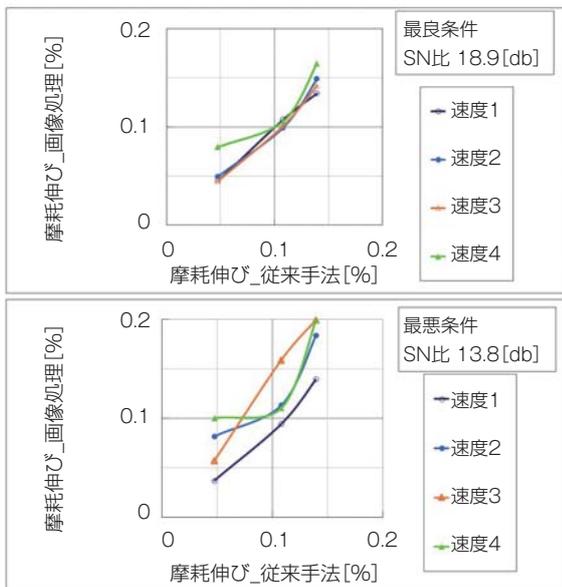


図6. 測定精度評価の例

表を使用し、複合条件による影響の確認と実験効率化の両立を図った。

図6に直交表実験における測定精度が高い最良条件と低い最悪条件の例を示す。また直交表分析による要因効果図の例を図7に示す。これらの情報より、設置スペースや撮影機材コストなどを加味して撮影条件を決定した。

3. 実機測定結果例

3.1 チェーン全長伸び

実際の耐久試験で、従来手法と同じようにチェーン摩耗伸びを測定できるか評価した。チェーン摩耗伸び結果を図8に示す。両手法の誤差は許容範囲内であり、本画像処理手法で従来手法と同等精度で測定ができることを確認できた。

3.2 チェーン局所伸び

図9に特殊な条件下における各内ピッチの摩耗伸び結果例を示す。この例では、2、4、21番目の内リンクで局所的な伸びの発生とその経時変化を確認できた。チェーン現物を確認すると、主にこれら内リンクのブッシュで摩耗が発生していたことが確認できた。このような摩耗伸びの不均一な分布は全長伸びだけを計測する従来手法では計測できなかった項目であり、今後本方式により詳細な解析を行うことでチェーンの耐摩耗伸び性能に関するさらなる技術力向上に寄与できる可能性がある。

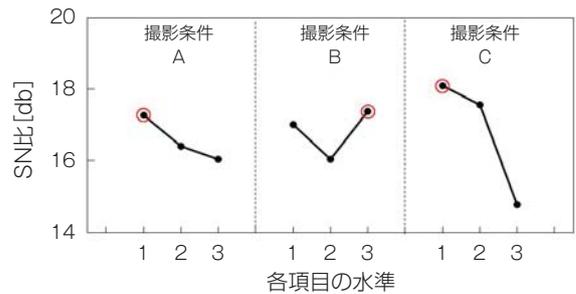


図7. 要因効果図の例

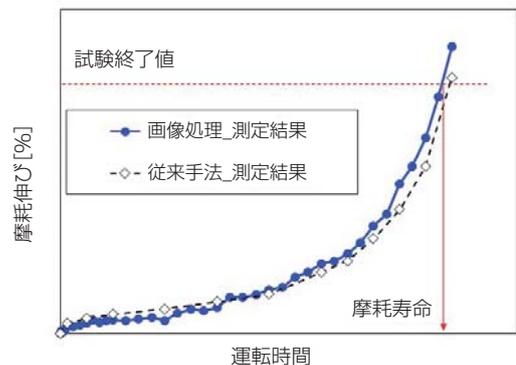


図8. チェーン全長伸び結果

4. 自動測長システム

本画像処理手法を実現した自動測定システムを紹介する。システム外観を図10に示す。画像処理用PCで画像センサーと照明を制御し、任意のタイミングで耐久試験を止めることなく（チェーンが駆動したまま）自動で数秒間の動画撮影を行う。動画取得後、測長プログラムを起動して摩耗伸びを算出する。

さらに利便性向上を図るため、ネットワークを介して遠隔で画像処理用PCを操作できるようにすることで、実験工場から遠く離れた事務所より遠隔的に測定結果の確認や、撮影時間の設定変更をできるようにした（図11）。

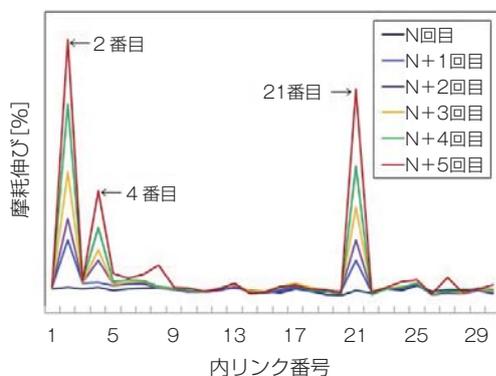


図9. 内リンクごとの内ピッチ摩耗伸び結果

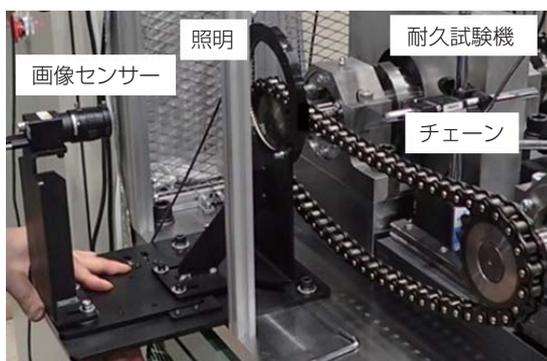


図10. 自動測定システム外観

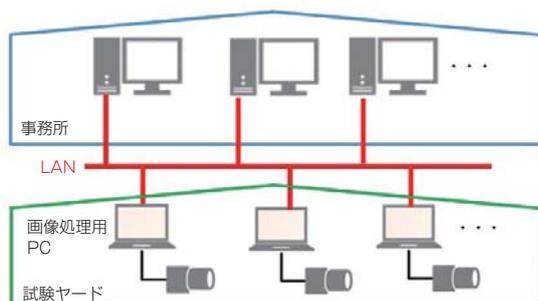


図11. 遠隔操作

5. おわりに

本技術により、当初の目的であった摩耗伸び測定作業の自動化を実現することができ、耐久試験1回あたり約8時間の作業時間削減につながった。また、副次的な成果として、従来の測定方法では評価できなかったピッチごとの摩耗伸び評価も可能となった。

今後も各種センサーと対象製品の固有技術を組み合わせることにより新規の測定・評価技術の開発を行うとともに、生産工程だけでなく商品開発段階においても効率化、省人化を推し進めていきたい。

日用雑貨品のランダムピックにおける把持点検出方法

Gripping point detection method in random picking of daily commodities

千田 暁慧^{※1}
Akisato CHIDA

松村 翔太^{※1}
Shota MATSUMURA

梅村 良佑^{※1}
Ryosuke UMEMURA

本報告では、様々な形状を有する日用雑貨品に対して、ロボットでピッキングを行うために必要な把持位置の検出方法について述べる。複数の形状が対象となるため、物体情報の登録を行わず、3次元カメラにより取得された3次元情報より算出する手法を提案した。本手法を実装し実験を行ったところ、実用的な時間で把持位置の検出が可能であった。また、ロボットを用いたピッキング動作で物体の把持を確認した。

In this report, we state the method for detecting the grasping position of daily miscellaneous goods with various shapes by a robot picking. We proposed the method for calculating 3D image obtained by a 3D camera without registering the object shapes. As the result, we were able to detect the grasping position in practical time. In addition, it was possible to grip objects by robot operation.

 エコロジー訴求点と 顧客メリット	①省人化・無人化
	②ティーチングレス

1. はじめに

近年、スマートフォンの普及で、個人でのインターネットを利用した物品購入が一般的になってきている。経済産業省¹⁾によると、物販系分野のEC^{*1}市場規模は9兆円を超えており、年度の伸び率は8.12%となっている(表1)。また、そのうちスマートフォンを利用した購入は年々増加しており40%近くの比率を占めている(図1)。

即日配送に対応している企業も多く、注文の翌日には配送を完了させるサービスも存在する。物流センターでは、これを実現するために商品在庫を一定数抱え、受けた注文に応じて在庫から必要数集めるピッキング作業を行い、配送先ごとに梱包し配送している。さらに注文を24時間受け付けて、夜間もピッキング作業を行うことでより短時間での配送を行う。

しかしながら、ピッキング作業は重労働で、なおかつ夜間帯も含まれるということもあり、人員の確保が難しくなっている。代替の案としてロボットを使いピッキングする手法が考えられるが物流現場におけるいくつかの問題が存在する。

表1. 日本における BtoC-EC 市場規模 (経済産業省)

	2017年	2018年	伸び率
物販系分野	8兆6008億円 (EC化率5.79%)	9兆2992億円 (EC化率6.22%)	8.12%
サービス分野	5兆9568億円	6兆6741億円	11.59%
デジタル分野	1兆9474億円	2兆382億円	4.64%
総計	16兆5054億円	17兆9845億円	8.96%

※ EC化率とは対面や電話なども含めた全ての商取引金額の内のECの割合



図1. 日本における BtoC-EC 市場規模 (経済産業省)

※1 技術開発部 技術開発課

ロボットピッキングにおいて、物体を把持するためには、把持するポイントを明らかにする必要があります。現在、工場のラインなどで利用される産業用ロボットでのピッキングでは、把持対象物の種類の制限や、対象物が整列しているなど限られた条件下で利用されることが多い。

しかし、通信販売などの物流センターでは、多様な商品を扱っていることが多く、複数の商品を同一のコンテナで保管されていることもあり、問題を複雑化させている。

本技術報告では、物流業界向けのロボットピッキングのための基礎研究として、様々な形状の日用雑貨品が同一のコンテナに複数格納されていても物体の把持が可能な点を算出することを目的とする。

2. 関連研究

ロボットを用いて物体を把持する研究は古くから行われており、様々な手法が提案されている。ここでいくつかの手法を紹介し課題を説明する。

2.1 把持対象が一意的な物体のピッキング

佐藤らは、バラ積みされた対象ワークをピッキングする手法を提案した²⁾。工場組み立て作業での部品供給を想定してボルトやナットをピッキング対象ワークと設定している。ボルトやナットは光沢塗装がされていることもあるため、深度データ（距離データ）取得時にデータ抜けなどの問題が生じる。

バラ積みされて重なっている状況でも、粗く複数個把持し別の容器に移載して重なりをなくし、再度一つのワークのピッキングを行う、2段階での物体把持手法を提案して問題の解決をはかった。

2.2 同一グループを対象にしたピッキング

ピッキング対象のワーク形状が単一ではない研究として、農産物を対象にした研究も進められている。矢口らは、トマトの収穫用のピッキングロボットの開発を行った³⁾。

トマトを収穫する際には、ロボットハンドは茎の箇所を認識して切断する必要がある。対象物が農産物であるため、産業用で利用されている製品のCAD図を基にしたパターンマッチングでの検出手法では対応ができない。そこで、3次元カメラで3次元情報を取得し、球体検出のアルゴリズムによりトマトを認識、トマト本体との距離関係より茎を認識する手法を提案した。また、矢口らは距離画像での認識のみではなく、台車となる走行部分、ハンド部分のロボット検討も行い農場での動作検証を行った。

2.3 形状を対象にしたピッキング

野田らは複雑な形状の物体を多品種扱う把持課題に取り組んだ⁴⁾。部品供給の自動化問題を対象にしており、複数の形状のものが一つのコンテナの中にある場合を想定している。それぞれの部品が特定の向きに並び替えが完了するまで搬送を行う。

複雑な問題を単純化するために、物体の単離と持ち替えの2つ動作に分けることでこの問題を解消した。物体の持ち替えには、3次元形状を利用することでを行い、複数回の持ち替えをすることで、目標の向きに並び替えを行う。

2.4 日雑品の把持対象の課題

日用雑貨品を対象としたピッキングでは、対象となる物品は多種類、多形状となるため、画像処理を用いて登録された物品とのマッチング手法は適していない。

また、外形を取得することで把持の可能位置を算出する手法についても、数百のモデルとの比較では計算量が膨大になってしまい、現実的な処理時間での位置判定は困難である。さらに、多様なワーク情報の登録作業も必要となり手間がかかってしまう。2.1節～2.3節で述べた関連研究のアプローチでは実用化に課題があり、我々は物体の情報を登録せずに認識ができる手法を検討した。さらに一つのコンテナの中に複数の商品が重なり保管されていることもあるためこれも考慮する。

3. 提案手法

3.1 処理の基本コンセプト

物流の現場で利用することを考えると大量の注文を短時間で処理する必要があるため、把持位置検出の速度も重視する必要がある。ここで、ピッキングの対象物体は、様々な商品形状を含む日用雑貨品とする。また、一つのコンテナの中にランダムに積み重なった状態か整列された状態で配置されることを想定する。

これらの条件により、提案する手法は、3次元情報を活用し測定可能な物体形状のみ使用して、物体位置の算出を行うこととした。また、複数の形状の物体の把持が必要となるため、これに適した吸着ハンドを想定して把持位置の算出を行う。

算出候補点としては、物体の重なりを考慮して、上部から把持ができるように、高い位置のものが選定されるようにする。

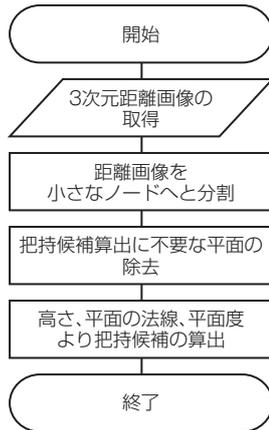


図2. 提案手法のフロー

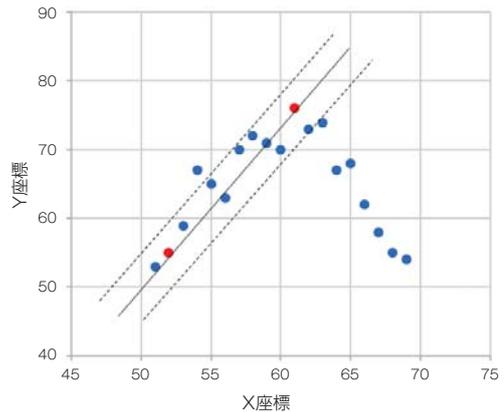


図3. RANSACによる直線検出

3.2 取得した3次元の情報からの処理の流れ

今回提案する手法のフローを図2に示す。はじめに、3次元計測カメラより対象物体の位置座標を取得する。次に、距離画像をグリッド状に小さなノードへと分割する。各ノードの中で把持位置検出に不要な箇所の削除を行う。

把持位置の算出には、積み重なっているワークのピックアップを想定して、位置が高い・平面である・面の法線が上面を向いているという条件で行う。

3.3 平面の検出手法について

3次元情報として得られたデータの中で不要な箇所を除去することを考える。例えば、不要な床面、コンテナの側面や底面にあたる部分である。

今回は、様々な形状の物体が重なりを含む条件下で存在するため、ロバストな推定が可能なRANSACを用いて平面の検出を行う。

RANSACとは、RANdom SAmple Consensusの略称で、Fischlerらが1981年に提案したロバスト推定のアルゴリズムである⁵⁾。動作アルゴリズムを図3にて、直線の検出方法を紹介する。

- ① はじめに、全体のデータ点の中からランダムに2点を選択し、その2点から直線の算出を行う。
- ② 算出された直線とデータ点を比較し、そのずれがある閾値内に収まる点の個数をカウントする。
- ③ ①と②を複数回実行し、②の最大値を保存する。
- ④ ③での最大であった直線が、確からしい候補直線として決定される。

複数の直線を検出する場合は、④上でカウントされた点を除去してもう一度アルゴリズムを実行することで次の直線が検出可能である。

単純な手法ではあるが、データ内に複数の直線が含ま



図4. 画像をノードへと分割処理例

れている場合に、複数の直線を効率的に検出が可能となる。④で選択される直線は、確からしい直線であり、反復回数を増やすことで精度が高まる。

反復回数は、以下の式(1)で算出することができる。

$$N = \frac{\log(1-P)}{\log(1-W^M)} \quad \dots (1)$$

N: 反復回数

P: 検出確率 (パラメータ)

W: 全検索データの中で直線または平面からのずれが閾値内の点の比率

M: ランダムに抽出された最小サンプル数 (直線では2点、平面では3点)

上記の式(1)より、検出対象の1平面のデータ割合が全体の30%の場合、99%の確率で正解の平面を検出するには169回の試行回数が必要となる。

3.4 詳細な分割による高速化処理

前節で紹介した平面検出手法は、検索範囲中の対象平面の取り方により、Wが大きく変わるため、反復処理の回数も大きく変化し、大量の点の中から狭い範囲の平面を検出するには、計算時間が膨大になってしまう。

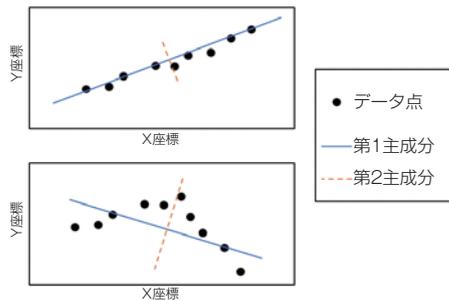


図 5. 主成分分析による直線度の算出

Fang らは、3次元点群情報から高速な平面を検出するアルゴリズムを提案した⁶⁾。3次元距離画像からアルゴリズムとして、データ画像をグリッド上に小さい範囲(ノード)に分割して平面の検出を行う(図4)。それぞれのノードの平面状態を、周囲のノードと同一平面かどうか判定を行い結合していく手法となる。

3次元距離画像に対して、小さな範囲で平面検出を行うことで対象範囲に対する平面の割合が増加するため、RANSACでの反復回数を減らすことが可能となる。

上記手法を用いて平面を高速で検出することで、不要な平面の除去が可能となる。

3.5 平面度の算出

吸着ハンドで物体を把持する場合、把持面に凹凸があると把持が難しくなる。そのため、把持しやすさの指標として平面度を定義し、平面度を評価することで、把持箇所を特定することにした。

平面度を説明するにあたり、次元を1つ減らした直線度に置き換え説明する。図5上のように1本の直線状にデータが分布する場合、第1主成分(軸)(射影したデータの分散が最大になる軸)のみで直線成分を十分に表すことができる。一方、図5下のような場合、第1主成分だけではデータの特徴を表現できず、第1主成分(軸)に垂直な第2主成分(軸)(第1主成分に垂直で射影したデータの分散が最大になる軸)が必要になる。つまり直線度は、第2主成分の寄与度を評価することで評価できる。この原理を3次元に拡張し平面度を表し、把持しやすさを評価する。

特定の平面状にデータが分布する場合は、第1主成分と第2主成分で平面上の成分を表示し、第3主成分が平面の高さ方向の成分となり小さくなる(式(2))。

$$\text{第1主成分} > \text{第2主成分} \gg \text{第3主成分} \approx 0 \quad \dots (2)$$

箱型の角の部分などの複数の平面で構成される場所にデータが分布する場合は、面に対して高さ方向を意味す

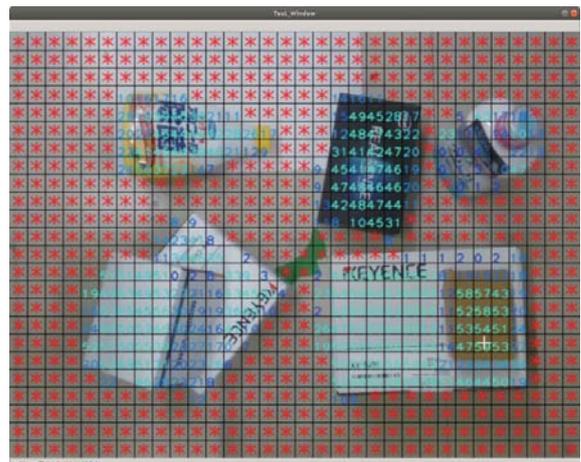
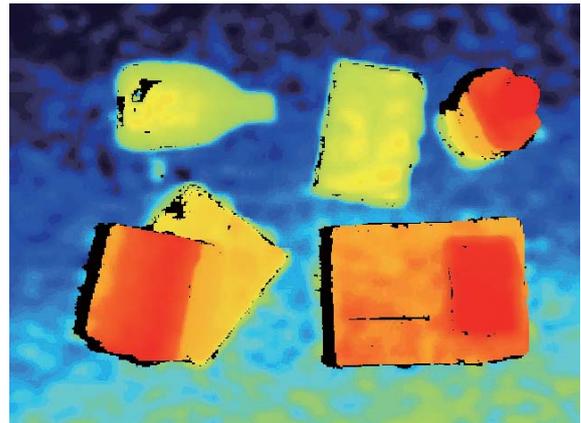


図 6. 取得された3次元距離画像(上)
本手法での検出結果(下)

る第3主成分の寄与度が大きくなる(式(3))。

$$\text{第1主成分} > \text{第2主成分} > \text{第3主成分} \gg 0 \quad \dots (3)$$

この原理を利用して、空間上に点在する座標値に関して主成分分析をあてはめ、第3主成分の寄与度を用いて把持可能位置の算出に利用した。

3.6 把持点位置の検出

本章で紹介した、RANSAC、距離画像のノード分割による処理の高速化、主成分分析による第3主成分の寄与度による平面度の算出、重なりを回避するよう考慮した高さ成分のそれぞれをパラメータとして把持候補点の算出を行っていく。

4. 実験

前章で述べたシステムに関して、実際に3次元カメラでデータの取得を行い、把持位置の算出実験を行った。

表2. 処理時間

平均検出時間	検出時間偏差
439 ms	1.5 ms

4.1 実験条件

計測に用いたカメラは、Intel 社製の RealSense D435 を用いた。このカメラは、赤外光のドットパターンを照射することで3次元距離画像と2次元画像を取得できる。今回の実験では、把持位置算出の精度と計算コスト考慮して、640×480の大きさで3次元距離情報をPCへ取り込み、把持位置の算出に用いた。

検出物体の条件として、ピッキングの対象となるワークが日用雑貨品ということ想定して、箱型の形状や、ボトル形状の物体を平積みにした環境とする。カメラの設置位置として、物体から0.8m程離れた場所でデータの取得を行う。

4.2 実験結果

図6に検証した際のデータの一部を示す。図6(上)は、カメラからの距離値により、赤がカメラに近く青がカメラから遠い位置を表すよう表示している。この深度情報より、提案した手法の把持位置検出を行った結果が図6(下)である。この図では、平面探索処理にグリッド形状に分割している。各マス目で、赤い×印の記されているマスは床として検出されたマスとなる。各マス目に記載されている数字は、平面度、高さ、平面の方向より算出された値を、大小関係がわかりやすいように2桁の数値で表したものである。画像右下の小さな段ボール上の白の十字あるグリッドが算出された把持ポイントである。

処理時間を表2にまとめた。100回把持試行時の平均検出時間及び偏差の値となる。3次元画像の取得時間も含めた把持位置の算出には、500ms以内での処理が可能であることがわかった。この時間は、想定されるピッキング動作では実用的な値であると判断する。

4.3 ピッキングロボットシステムの構築

前節の実験の把持位置検出アルゴリズムにより、実際にロボットの把持が可能かシステムの構築を行った。実験条件として、対象ワークに様々な形状が含まれることを考慮し、バルーンハンドでの吸着ハンドリングとする。

カメラは、前節でも利用した、Intel 社製の RealSense D435 を利用した。ロボットは、三菱電機社製の MELFA^{*2} RV-7FL-1Q-S57 を利用した。このロボットは6軸を保有する垂直多関節ロボットである。バルーンハンドは妙徳社製の SGB シリーズを用いて行った (図7)。バルーン



図7. 把持機構 バルーンハンド



図8. 装置の写真 ハンド、3次元カメラ、ロボット

ンハンドは、吸着により把持する機構であり、物体に押しあたると先端部分に変形する。しかしながら、穴を含む形状や、大きな凹凸がある表面では、空気が漏れてしまい吸着が困難となる。

それぞれのモジュールを取り付けた装置の全体を図8に示す。6軸ロボットの先端にバルーンハンドを取り付け、手首にあたる箇所には3次元カメラを設置した。動作としてカメラを対象物体が存在する上部に移動し、3次元情報を取得する。今回提案した手法により把持位置の算出を行い、アームを操作しバルーンハンドで吸着を行う。

4.4 動作確認

動作確認を行ったところ箱形状のようなものに関しては、正しく把持位置が検出され、把持し物体を移載することが可能であった。

一方、包装が透明なビニールで包まれている物体は把

持が困難であった。これは、今回用いた3次元カメラの特性上、透明なものを介して距離座標を正確に検出できないことが影響している。

また、箱形状が隣り合わせになっている場合に距離画像のみでは、物体の境界の判定ができずハンド先が境界部分にアプローチし、空気が漏れることで吸着ができないこともあった。これは、高さ方向の差分が小さく同一の物体として認識されてしまったためである。

5. おわりに

本技術報告では、物流現場での利用を想定し、日用雑貨品を対象とするロボットピッキングのための3次元画像処理手法の検討を行った。

3次元情報からの物体把持位置の算出に関しては、把持候補点を500msec以内に求めることが可能であった。これは、実際のピッキング動作に求められる処理時間の範囲内であり、実用可能な時間である。

また、バルーンハンドを用いたロボットにアルゴリズムを実装し、実際に把持が可能であるか検証を行ったところ、検出が容易な箱型の場合、形状の認識及び把持を問題なく実行できた。しかしながら、3次元カメラが正しく距離検出を行えない表面形状の場合は、アルゴリズムが正常に機能しないため、正常に把持位置を算出することができない。

今後の予定として、3次元距離画像と通常の2次元画像の両方を用いることで把持位置算出の安定化をはかりたい。また、把持位置算出のアルゴリズムを最適化することにより、位置検出のさらなる高速化を行っていく。さらに、実際にロボット上での動作検討も同時に進めていき、一連のピッキング作業（動作）が成立するように実用的なシステム構築の検討をしていく。

参考文献

- 1) 経済産業省 商務情報政策局 情報経済課, 平成30年度我が国におけるデータ駆動型社会に係る基盤整備(電子商取引に関する市場調査), 2019
<https://www.meti.go.jp/press/2019/05/20190516002/20190516002-1.pdf>
- 2) 佐藤優也, 原田研介, 坂田信親, 万俣偉, ラミレスイクシェル, バラ積みされた難識別対象物に対する2段階ピッキング手法, 日本機械学会誌論文集, Vol.84, No.861, 2018, p.1-14
- 3) 矢口祐明, 長谷川貴巨, 長濱虎太郎, 稲葉雅幸, 収穫装置と視覚認識に着目したトマト自動収穫ロボットの構成法, 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.10, 2018, p.693~702
- 4) 野田哲夫, 堂前幸康, 永谷達也, 奥田晴久, 田中健一, 一般形状部品の多品種供給の自動化, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.5, 2015, p.387~394
- 5) M. A. Fischler and R. C. Bolles: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, Vol. 24, No. 6, 1981, p.381-395.
- 6) Fang, C.; Taguchi, Y.; Kamat, V. Fast Plane Extraction in Organized Point Cloud Using Agglomerative Hierarchical Clustering, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. p. 6218-6225.

用語解説

* 1 EC

ECとは、Electronic Commerceの略で電子商取引のことである。B to C ECでは、オンラインショッピングや、デジタルコンテンツのオンライン販売などが含まれ、C to C ECでは、ネットオークションや、フリマアプリなどが含まれる。

* 2 MELFA

三菱電機株式会社の登録商標