

選別一体化を目的とした再生可能資源の自動選別機試作による 実用性の検討とその評価

板垣弦矢¹ 撫中達司²

概要： リサイクルに掛かる費用が自治体の財政を圧迫し大きな問題となっている。中でも効率的な選別が課題であり、昨今自治体による選別作業を省略し再商品化事業者に直接搬入をする選別一体化が検討されているが、選別率が下がり再商品化される物の品質が落ちることが懸念されていることから具体的な実証実験などはまだ殆ど行われていない。収集の時点で選別率を保证する方法としてはゴミ箱に自動選別機能をもたせる方法があり、これまでに幾つか研究が報告されてきた。しかし、それら研究の多くは選別率を評価軸として使用したセンサや学習アルゴリズムが有効であるかなどの検証に焦点を当てており、実用性についてはほとんど言及されていない。実際に自動選別機を社会に投入した場合、様々なシチュエーションで様々な人が利用することを想定する必要がある、選別率だけでなく実利用に向けた検討（実用性）も重要である。本報告では、実用性を機能性や効率性、経済性、明瞭性、環境性、安全性などの評価軸で定義し、試作した自動選別機においてこれにつき評価した結果を示す。結果として、試作機については機能性、経済性、明瞭性、環境性、安全性、効率性については実用性に足るものであったが、効率性が今後の検討課題である。

Investigation of practicality and evaluation of prototype for automatic waste sorter

GENYA ITAGAKI¹ TATSUJI MUNAKA²

1. はじめに

近代における産業の発展はめざましく人々の生活はより便利に、豊かになっている。しかし、その一方で大量生産や大量消費、大量廃棄などによる環境問題という大きな課題を抱えることとなり、いま世界各国で循環型社会の実現に向けた取り組みが行われている。日本では、家庭から出るごみの6割（容積比）を占めるとされている容器包装廃棄物を資源として有効活用するべく1995年に容器包装リサイクル法が公布された。その後、2000年の完全施行に伴い消費者は分別排出、自治体は分別収集・選別保管、事業者は再商品化を行うことが義務となり、その結果、公布時に9.8%であったリサイクル率は20%にまで向上した [1]。しかし、その裏では人の手による異物除去や細かい選別作業など収集された資源ゴミを品質よく再商品化をするために自治体が多く費用を掛けており、財政を圧迫していることが問題となっている [2] [3]。表1に平成27年度に容器包装リサイクルに掛かった費用を示す。

表1 平成27年度に掛かったリサイクル費用とその割合

	自治体			事業者
	収集運搬	選別保管	管理	再商品化
費用[億]	928	554	178	390
割合[%]	81			19

当該年度では収集運搬に約928億円、選別保管に約554億円、管理に約178億円、合計して1660億円掛かっており、再商品化は390億円であった。このデータから分かる通り自治体はリサイクルに掛かる費用の大部分を負担しており、財政の圧迫を解決するためには収集運搬や選別保管の費用を削減することが鍵となっている。

一方、環境先進国のドイツを始めEU各国やアメリカではソーティングセンターと呼ばれる大規模な施設を設置することにより資源ゴミの一括収集や機械による一括分別を可能とし、再商品化までに掛かる費用を抑え経済性を上げている。しかし日本、特に東京などの都市部においては人口が集中し土地が高度に利用されていることなどにより新しく大規模な施設を設置する土地を確保することが非常に困難であることから日本を取り巻くリサイクルの現状として限られた少ない土地で如何に効率的に資源ゴミを収集し選別保管するかが課題となっている。

この課題のうち選別保管に関しては近年、自治体による選別を省略し、消費者が分別排出したゴミを直接再商品化事業者へ引き渡すことで選別保管費用を削減する選別一体化が検討されている。しかし、消費者に依存した選別率となってしまうことから選別率が下がり再商品化される物の品質が維持できないことが懸念され、具体的な実証実験などはまだ殆ど行われていない [4]。

1,2 東海大学 情報通信学研究所
Tokai University, Graduate school of Information and Telecommunication science

再商品化事業者がゴミを受け取るまでに選別率を保証する方法としては消費者による分別排出を機械的に代替する方法が考えられる(自動選別機)。自動選別機ではゴミの種類を定量化されたデータを元に自動的に判断し選別を行うため消費者が行うよりも一定の選別率を保証することができ、選別一体化の一助になる可能性がある。

そこで、本稿では選別一体化を目指し、試作した自動選別機における選別率の評価、また、その他の実用性についても定義し、評価した結果を示す。

2. 関連研究

大規模な設備を用いらずに自動で選別を行う方法としてはこれまでにゴミ箱に対して自動選別機能を持たせる研究が幾つか報告がされている。Archana Babu S et al [5]の研究では手作業による資源ゴミの選別作業を改善することを目的として、投入された資源ゴミを三種類に分ける自動選別機を複数のセンサを用いて試作している。当該論文では主にセンサ値を評価軸として選別のために組み込んだセンサが資源ゴミの認識に有効であるかを評価している。他 Aleena V.J. et al [6]や Amrutha Chandramohan et al [7]の自動選別機を題材とした研究においても同様のカテゴリズで自動選別機を試作しており、それぞれ使用しているセンサは違えども、センサの有効性を評価しているという点については Archana Babu S et al [5]と同じである。

その他、ゴミ箱に対して自動選別機能を持たせる研究以外では Andres Torres-García et al [9]や Mindy Yang et al [8]の研究では機械学習を用いることにより、カメラで撮影した画像から資源ゴミの種類を予測するシステムを試作している。前述した関連研究とは異なり、複数のセンサを用いずにカメラ一つで数種類の資源ゴミの認識を可能としている。当該論文では主に選別率を評価軸として、ゴミの認識のために使用した学習アルゴリズムの有効性について評価しており、Andres Torres-García et al は KNN を用いて 98.3%での選別率を達成している。また、Mindy Yang et al [8]は SVM で 63.0%、CNN で 22.0%の選別率を達成している。

これらの関連研究は選別のために使用された手段の有効性を検証しているものであるが、実際に自動選別機を社会に投入した場合、様々なシチュエーションで様々な人が利用することを想定する必要があり、実利用に向けた検討(実用性)が重要である。しかし、これまでに行われてきた関連研究では実用性について言及されておらず、自動選別機において実用性の検討は課題の一つとなっている。

3. 提案

3.1 実用性における評価軸の定義

自動選別機の実用性を検討するにあたり、まず実用性を

評価するための評価軸を定義しなければならない。前述したとおり、本試作機は選別一体化の一助を目指すという性質上、消費者における分別排出の代替として機能させる必要がある。そこで、消費者における最終的な排出先が集積所であることから、集積所において考慮されている事項を明確にし、自動選別機に当てはめることで評価が可能になると考え、その結果以下の事項で実用性を定義した。

- ・機能性
- ・効率性
- ・経済性
- ・明瞭性
- ・環境性
- ・安全性

上記6つの評価軸のうち機能性、効率性、経済性の3つは分別排出を機械的に代替するための機能要件として定義しており、残りの明瞭性、環境性、安全性については非機能要件として各自治体が定めている集積所の設置基準を参照し [10] [11], 定義している。

機能性とは自動選別機における選別機能のことを指しており、選別率により評価される。効率性は自動選別機における選別処理の速さのことを指しており、選別に掛かる時間により評価される。経済性は自動選別機における開発運用コストのことを指しており、従来の集積所に掛かる設置運用コストや自治体が負担している選別保管費用と比較して評価される。明瞭性は自動選別機における使用方法の分かりやすさのことを指しており、集積所で標示されている分別ルールと比較して分かりやすさを評価する。複雑な分別ルールが正しく守られるよう、多くの自治体が集積所の設置基準の中で分かりやすさについて言及していたため実用性として定義した。環境性は自動選別機における汚臭への配慮のことを指しており、従来の集積所でとられている汚臭対策などと比較して評価する。汚臭は周囲の人々に不快感を与えるだけでなくネズミや虫の発生など、二次的な被害を生む恐れがあり、これは集積所の設置基準の中でも言及されていたことから実用性として定義した。安全性は自動選別機における使用上の危険性への配慮のことを指しており、国際的な安全規格である ISO 12100[12]を参考にして評価する。自治体が定める集積所の設置基準の中では集積所の利用者に対する安全の確保について言及されており、自動選別機は機械であることから安全工学での視野が必要になると考え国際規格を元とした実用性として定義した。

4. 試作機の実装

今回は、定義した実用性を元に容器包装廃棄物の中でも再商品化率が高くまた、収集費用や選別費用も高いビン、缶、ペットボトルの3つを選別の対象とした。実装した試

作機のシステム構成，ソフトウェア構成，ハードウェア構成をそれぞれ図1，図2，図3に示す。



図1 自動選別機のシステム構成

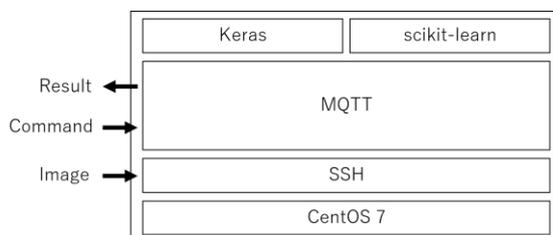


図2 画像認識サーバーのソフトウェア構成

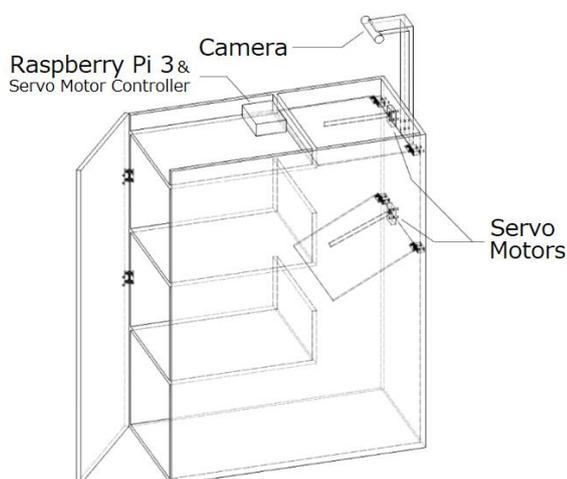


図3 自動選別機のハードウェア構成

本試作機はカメラで撮影した画像を無線LANを介して画像認識サーバーに送り，その予測結果を受け取ることで資源ゴミの種類を決定する。前述したゴミ箱に対して自動選別機能を持たせる研究では，資源ゴミごとに異なるセンサを使って予測しており，ハードウェア構成が複雑化していた。また，ゴミ箱のスペースの大部分を予測のために使っており，資源ゴミを保管しておくスペースが少なかった。機械学習を用いた画像認識の研究ではカメラ一つで複数の資源ゴミを予測することが出来るためハードウェア構成の複雑化を防ぐことができる。しかし，効率性における資源ゴミの投入時間を考慮すると高速な画像認識のために高い処理能力を持った大型なコンピュータが必要になるため資源ゴミの保管スペースを大きく確保することが出来ない。そこで本試作機では画像認識部分を外部に設け，画像の撮影部のみをゴミ箱に組み込むことで効率性を考慮しつつ省スペース化を図った。また，これによりセンサやコンピュータに掛かる費用を抑え経済性に考慮した低コストで

の開発運用を図った。画像認識の精度は機能性における選別率に関わってくるが，学習アルゴリズムによって大きく精度が異なる[8][9]ため今回CNN，KNN，SVM，Random forestの4つの代表的な学習アルゴリズムを用いて検証することとした。なお学習に必要な教師用データは選別時と同じ撮影環境で資源ゴミごとに約160枚用意し，前処理として白黒画像に変換した後，いわゆる水増し手法により輝度の変更やノイズの付加，反転処理などを施し，最終的に資源ゴミごとに3000枚の教師用データを用意した。また，CNN以外の学習アルゴリズムでは特徴量抽出のアルゴリズムが必要になることから，画像認識において代表的かつ古典的なアルゴリズムであるSIFTやSURFの欠点を解決しロバスト性の向上と高速化を図ったAKAZEを使用することとした。これにより撮影される資源ゴミのスケールや回転，輝度，ぼかしなどの変化にも対応可能な特徴量の抽出が可能となる。



図4 前処理後の教師用データ例（ペットボトル）

選別部分は2つのサーボモータがそれぞれ板の角度を調整することで資源ゴミを適切な保管スペースへ落とす仕組みとなっている。明瞭性を考慮し，一番上の板は画像撮影のための資源ゴミ投入部としても役割を担っており，消費者は複雑な操作などせずに資源ゴミを投入部に置くだけで選別が可能になる。また，選別時以外はゴミの投入を待ち受けるため板を水平に保っており，ゴミ箱の蓋として環境性を考慮した役割も果たす事ができる。安全性については本試作機における唯一のアクチュエーターがサーボモータであることから，サーボモータにより上下する板が手などを巻き込んでしまうことを最大のリスクとして考え，投入部を撮影しているカメラに資源ゴミ以外のもの（手など）が映っている間は選別処理を行わないように実装している。また，重力を利用した選別によりサーボモータが故障しても板が垂直の状態になり手などを挟む恐れがないよう実装している。

5. 検証結果と評価

定義した実用性における評価軸を元に検証結果を報告する。

- ・機能性について

機能性の検証結果は、CNN が 92.0%、KNN が 98.3%、SVM が 82.0%、Random forest が 91.2%となり KNN が一番認識精度が良いという結果になった。今回、画像認識を実現するにあたりライブラリとして CNN では Keras を使用しネットワーク構成は Keras 作者の CNN サンプルを参照している。その他、KNN、SVM、Random forest では scikit-learn を使用しており、パラメータは変更せずデフォルトの状態での学習している。以上のことからネットワーク構成やパラメータを調整することでより精度を向上させることのできる可能性がある。しかし、KNN の 98.3%という精度は現在消費者が行っている分別排出と同等以上の精度であるため、機能性においては現状で実用性に足ると評価できる。また、この結果は関連研究の中で一番選別率が高かった Andres Torres-García et al と全く同じ値であり、選別対象は異なるが選別対象としていた資源の数が同じ 3 種類であったことから、種類の少ない分類においては KNN が有効であると考えられる。

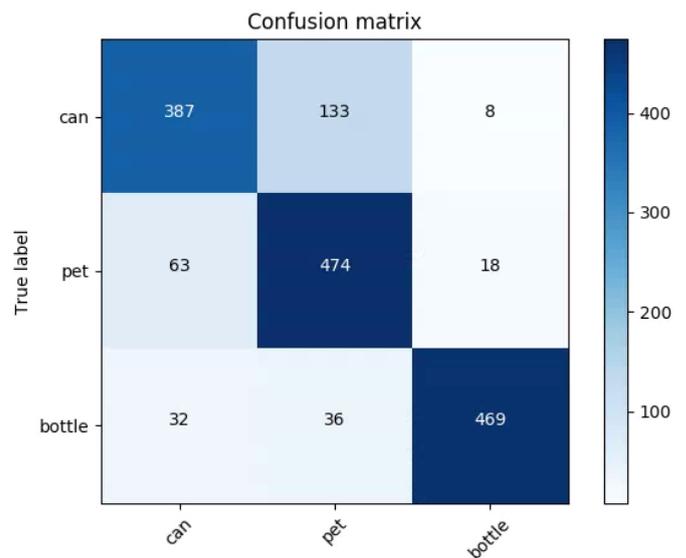


図 7 SVM による画像認識の精度

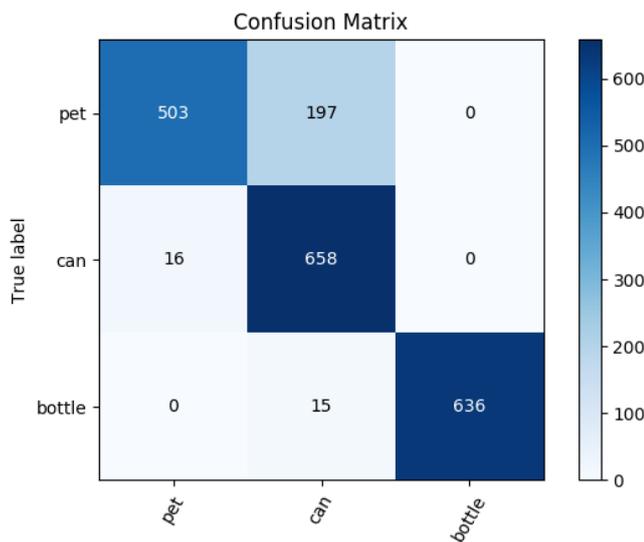


図 5 CNN による画像認識の精度

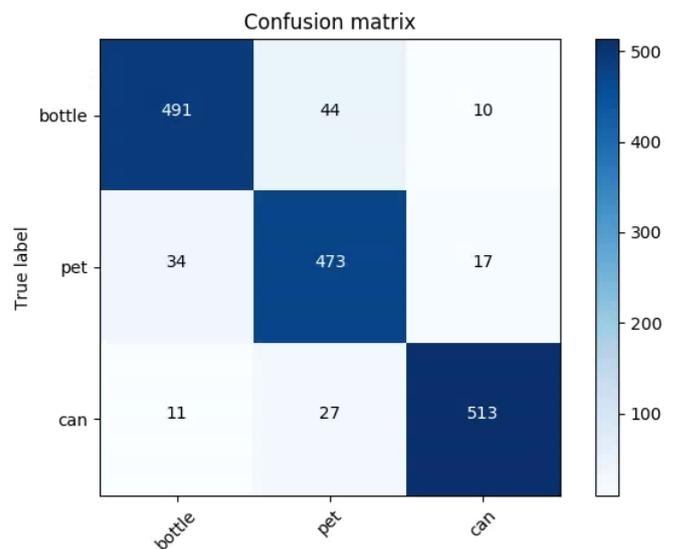


図 8 SVM による画像認識の精度

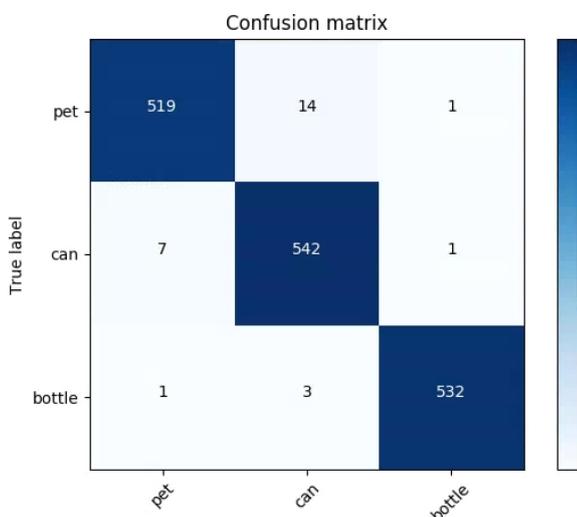


図 6 KNN による画像認識の精度

・効率性について

効率性の検証結果については、資源ゴミ 1 つに対して 0.4 秒から 0.8 秒程度で選別が行えた。スタンドアロンで選別を行った場合では資源ゴミ 1 つに対して 2 秒から 3 秒掛かっていたことから外部のサーバーに画像認識部分を担わせた本設計は速度を早めるアプローチとして妥当であったと考えられる。しかし、従来の分別排出では家庭内で予め資源を別けてからまとめて集積所に排出をしており、集積所での所要時間はほとんどなかった。その点、本試作機は現状 1 つずつしか資源ゴミを処理できないため、まとまった大量の資源ゴミの処理には時間がかかってしまう。このことから本試作機における効率性は現状、少量の選別には効果的であるが大量の資源ゴミが排出される集積所での利用においては実用的ではない。

・経済性について

経済性の検証結果については、システム構成の工夫により試作機 1 台当たり約 5000 円と低コストで開発ができた。横浜市では 10~30 世帯あたりに 1 つ集積所を設けることを設置基準としており、間を取って 15 世帯に 1 つであった場合、横浜市の全世帯数から計算すると 56000 箇所の集積所がある計算となる。これら全てに自動選別機を設置しようとした場合、2 億 8000 万円の費用が発生することとなるが、横浜市の年間の選別保管が約 129 億円であることを鑑みると非常に低コストである。運用費用については運用方法により異なる可能性があるが、運用費用が加わったと考えても自動選別機は低コストであり経済性として実用性が高いと評価できる。

・明瞭性について

明瞭性の検証結果については、実装通り投入口を 1 つにし、消費者の操作を必要とせず選別を行うことができた。従来の集積所では選別対象ごとに投入口が別れており、色分けや標示などにより明瞭性を確保している。本試作機では色や標示を見ずとも選別が可能であるため従来の集積所と比較したときより明瞭性としての実用性が高いと評価できる。

・環境性について

環境性の検証結果については、実装通り投入部の板を選別時以外は水平に保たせることで蓋としての役割を担わせることができた。従来の集積所においても汚臭に対して蓋を使用するなど同様の対策がとられていることから本試作機における環境性は実用性に足ると評価できる。

・安全性について

最後に安全性の検証結果については、実装通りカメラに資源ゴミ以外のもの（手など）が映っている間は選別処理行わないよう動作させることができた。また、サーボモータに給電をせず擬似的に故障を再現した状態では板を垂直の状態にすることができた。安全工学においては、人は間違い機械は壊れるものとして設計をする。本試作機の設計はそれらに対応した安全設計の定石であるフルプルーフとフェールセーフと呼ばれる設計手法を参照しており、安全工学に基づいた動作をさせることができています。このことから本試作機における安全性は実用性に足ると評価できる。

6. まとめ

本稿では選別一体化を目的とした自動選別機における実用性の検討と試作機の評価を行った。実験結果から機能性、経済性、明瞭性、環境性、安全性については実用性に足る設計を行うことができたが、効率性に関しては一度に大量の資源ゴミを処理できないという理由から実用性に足る設

計を行うことができなかった。したがって、資源ゴミの効率的な処理が今後の課題の一つである。

参考文献

- [1] 経済産業省: ippannahk(オンライン), 入手先 <<http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/statistics/pdf/ippannahki.pdf>>(参照 2017-02-25).
- [2] 経済産業省: 容器包装廃棄物の分別収集・選別保管に係る費用に関する調査, 2015.
- [3] 容器包装リサイクル協会:2016 年次レポート, 2016.
- [4] 経済産業省: 第 17 回合同会議, 議事録, 2016.
- [5] A. B. S, A. SJ, A. J, B. Chandran , N. S: ernational Journal of Research in Advent Technology, Vol.4, No.7, An Economic Automatic Waste Segregator using, 2016.
- [6] A. V.J, K. Balakrishnan, R. T.B, S. K. K.J, S. S, T. Subha: Journal of Microcontroller Engineering and Applications, Vol 3, Issue 2, Automatic Waste Segregator and Monitoring System, 2016.
- [7] A. Chandramohan, J. Mendonca, N. R. Shankar, N. U. Baheti, N. K. Krishnan, M. S. Suma: Communication and Electronics Systems (ICCES) International Conference on, pp. 1-5 , Automation of plastic metal and glass waste materials segregation using arduino in scrap industry, 2016.
- [8] M. Yang , G. Thung: CS229: Machine Learning, Classification of Trash for Recyclability Status, 2016.
- [9] A. T. García, O. R. Aragón, O. L. Gandara, F. S. García , L. E. González-Jiménez: Computación y Sistemas, Intelligent Waste Separator, 2015.
- [10] 新宿区: 資源・ごみ集積所とは(オンライン), 入手先 <http://www.city.shinjuku.lg.jp/seikatsu/file09_01_00026.html> (参照 2017-02-25).
- [11] 目黒区: 集合住宅等の廃棄物保管場所等の設置及び管理に関する指導要綱(オンライン), 入手先 <http://www.city.meguro.tokyo.jp/kurashi/shizen/gomi/jizenkyogi/kisoku/shu_sidoyoko.html>(参照 2017-02-25).
- [12] 組込みシステム技術協会: 組込み系技術者のための安全設計入門, 2008