

廃製品リサイクルのための透過 X 線及び深層学習による電池検出・選別システム



上田 高生

Ueda Takao

1 はじめに

全国のリサイクル施設において、廃製品や廃棄物（廃製品等）に混入した電池の破砕機への誤投入が原因で火災が発生し、大きな問題となっている¹⁾。このような火災を防止するため、廃製品等が破砕機に投入される前に、内蔵又は混入した電池を見つけ出す必要がある。現在のリサイクル施設では、廃製品等を作業員が手作業で確認して、電池の有無を経験的に判断している。しかし、電池の有無を外観から判断できないものも多く、手作業では時間と手間がかかると共に、精度が高くない問題点もある。これらの問題を解決するため、透過 X 線撮影により廃製品等の内部構造を可視化し、深層学習（人工知能の一種）により自動で電池を検出して選別するシステムを開発した²⁾。

2 電池検出プログラムの開発

今回の研究開発では、電池を検出するプログラムにおいて、高精度と網羅性を両立することが課題であった。一般的に深層学習による検出では、画像内の様々な領域について対象物（本研究では電池）が含まれる予測確率（信頼度スコア）を計算する。そして、ユーザーがあらかじめ設定した閾値より信頼度スコアが高い領域を検出する。したがって、閾値により検出結果が変わる。すなわち、高い閾値を設定すれば、信頼度スコアの高い領域のみ選択される

ため、検出結果が正しく電池である可能性が高い（精度が高い）一方で、電池が検出漏れとなる可能性も上がる（網羅性が低い）。反対に低い閾値を設定すると、信頼度スコアが低い領域まで検出されるため、検出結果に電池でないものも含まれてしまう（精度が低い）一方で、電池の検出漏れは減る（網羅性が高い）。このように、高精度と網羅性はトレードオフの関係にあり、両立は困難である。しかし、リサイクル施設では、大量の廃製品等を迅速かつ安全に処理する必要があるため、高精度と網羅性を両立させた検出プログラムが求められる。

今回開発した電池検出プログラムは、独自に考案した3段階の処理プロセスに特徴がある（図1）。透過 X 線画像が入力されると（図1(b)(i)）、第1段階で深層学習プログラムが画像を分析し、第2段階の処理に適した領域を抽出する（図1(b)(ii)）の青・緑枠。第2段階は、得意とする画像タイプがそれぞれ異なる10種類以上の深層学習プログラムから構成されており、第1段階で抽出された領域ごとに、最適な専用プログラムを用いて電池を検出する（図1(b)(iii)）。第3段階は、第2段階よりも精度は低いが高い網羅性を有する深層学習プログラムにより、第2段階で見落とされた電池を検出する（図1(b)(iv)）。開発したプログラムの処理速度は、1画像当たり約1秒である。

廃製品のほか、廃棄物に電池を混入させた物、及び単体の電池から構成される150個のサンプルにより、開発したプログラムの性能を検証した。

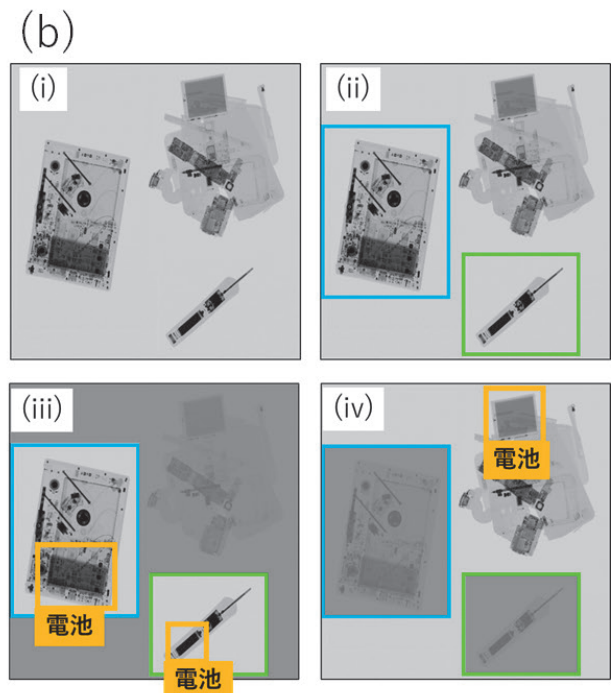
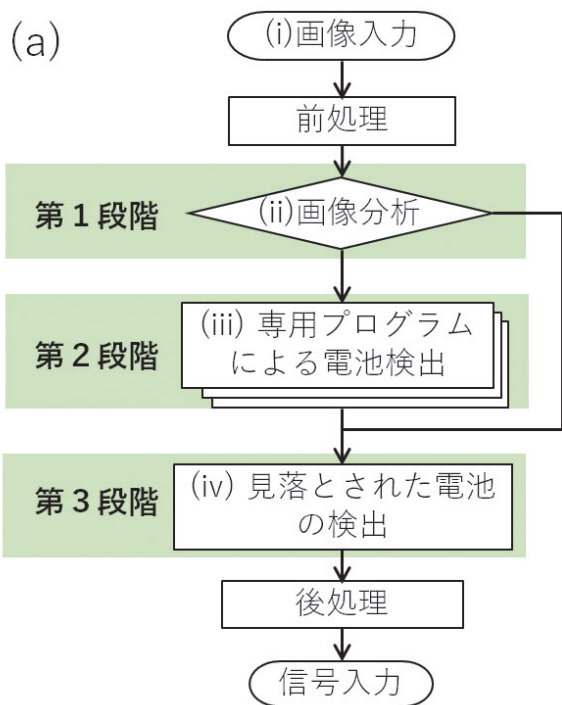


図1 開発した電池検出プログラムの (a) フローチャート, 及び (b) 処理工程の概念図 (文献 2, 3) から改変)

電池を自動検出する従来製品は存在しないため、開発したプログラムの性能の評価用に1種類の深層学習プログラム(比較プログラム)を作成して、比較対象とした。開発プログラムと比較プログラムは、全く同じ数・種類の透過X線画像から作成した教師データにより学習させた。

検出結果の評価には、精度に相当する“Precision”と網羅性に相当する“Recall”という指標を用いた。どちらの指標も0~1の値を取り、値が大きいほど高い性能を示す。

具体的には、以下のとおりである。Precisionは適合率とも呼ばれ、検出結果に正しく検出対象物が含まれている程度を表す指標である。真陽性(TP:正しい検出)及び偽陽性(FP:誤検出)の数から、 $Precision = TP / (TP + FP)$ で計算される。また、Recallは再現率とも呼ばれ、検出漏れの少なさを表す指標である。TP及び偽陰性(FN:検出漏れ)の数から、 $Recall = TP / (TP + FN)$ で計算される。

図2に検証結果を示す。まず開発したプログラムと高い閾値の比較プログラムを比べる(図2①②)。精度は同程度だが、網羅性は比較プログラムがやや劣っている。リサイクル施設における電池の検出漏れを防ぐには高い網羅性が求められる。そこで今度

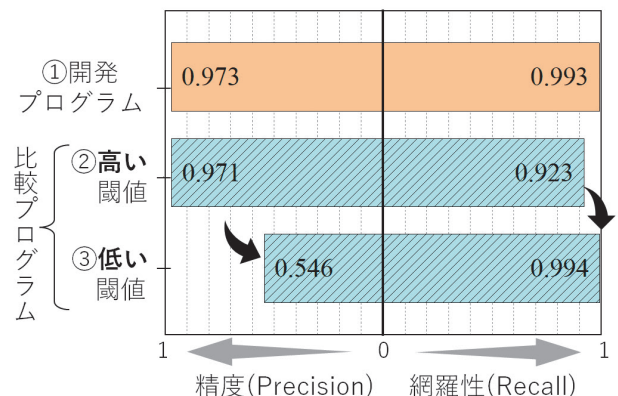
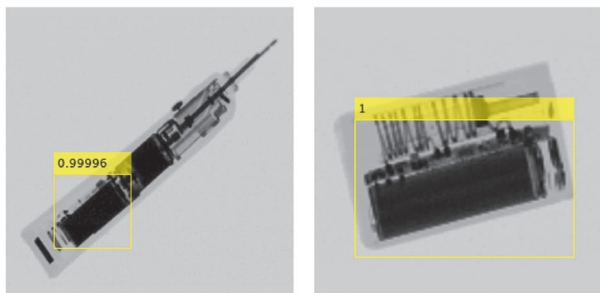


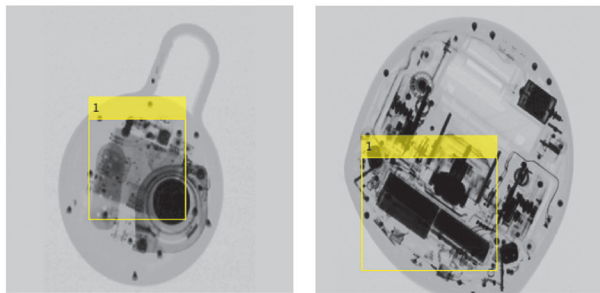
図2 プログラムの検証結果(文献2)から改変)

は、比較プログラムの閾値を低い値に設定すると、網羅性は高くなった一方で、精度は低くなった(図2③)。このように、比較プログラムは高精度と網羅性がトレードオフになるのに対して、開発したプログラムでは精度と網羅性を高いレベルで両立できている。図3に開発したプログラムによる電池検出結果の例を示す。黄色い四角で囲まれた箇所が検出された電池で、数値は信頼度スコアを表す。



電動歯ブラシ

電子タバコ



ポータブルスピーカー

ロボット掃除機

図3 電池検出結果の例(文献2)から改変)

3 自動検出・選別システムの開発

前述の開発プログラムを搭載した自動検出・選別システムを開発した。図4に示すとおり、透過X線装置((株)イシダ製X線検査装置)、開発したプログラムを搭載したパソコン(PC)及び振分装置をベルトコンベヤーで接続した。廃製品等は、投入後に透過X線撮影され、その画像がネットワーク対応ハードディスクドライブ(NAS)に保存される。プログラムが、新たに保存された画像を自動的に解析して、電池の有無を判断する。その情報は振分装置に送られて、ベルトコンベヤーの上下動により、廃製品等が選別される。このように本開発プログラムを、NASに画像保存する機能を持つ既存の透過X線装置と接続することで、自動検出・選別システムとして機能させることができる。

4 おわりに

リサイクル施設での電池に起因する火災を防ぐため、透過X線及び深層学習により、廃製品等に混入した電池を自動検出・選別するシステムを開発した。今後は、本システムを早期にリサイクル施設で

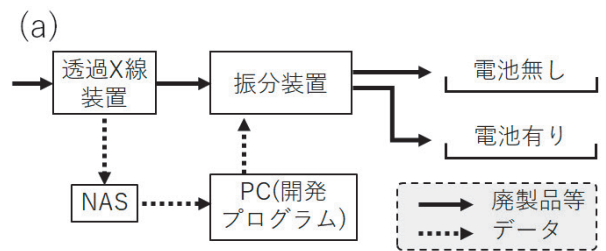


図4 電池自動検出・選別システムの(a)処理フロー、及び(b)外観(写真にPCは含まれない)(文献2,3)から改変)

活用することを目指す。

なお、本原稿は、産総研プレス発表²⁾及び論文³⁾を編集したものである。

謝辞

本研究開発は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業(2017~2023)」の支援を受けた。また、(株)リーテム及び大栄環境(株)から廃製品サンプルのご提供をいただいたことに謝意を表する。

参考文献

- 1) (独法)製品評価技術基盤機構, プレス発表(2023年6月29日)
<https://www.nite.go.jp/data/000149340.pdf>
- 2) (国研)産業技術総合研究所プレス発表(2023年5月22日)
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230522/pr20230522.html
- 3) T.Ueda, et al., *Resour. Conserv. Recycl.*, **201**, 107345 (2024)

((国研)産業技術総合研究所 環境創生研究部門)