

博士論文要旨

論文題名：深層学習を活用したリチウムイオン蓄電池の 状態推定技術に関する研究

立命館大学大学院理工学研究科
電子システム専攻博士課程後期課程
シオハラ タカヒロ
塩原 孝弘

近年、温暖化対策において再生可能エネルギーの利用などによる電力変動の調整機能として蓄電池が期待される。蓄電池をより普及させるためには安全性の向上や小型化・軽量化などの技術力強化が課題であり、対策としてリチウムイオン蓄電池(LIB)が有効である。アプローチには電池の材料開発の効率化と内部状態の推定技術の高精度化があげられる。情報科学を活用して材料開発を強化するマテリアルズインフォマティクス(MI)の研究が進められている。シミュレーション技術の進化により開発効率化が進む中で、物体の位置形状情報の入力データの準備に多くの時間を費やしており、この自動化が課題として残る。また電池の内部状態の推定技術の高精度化において、電池残量(SOC)推定は最も重要かつ基本的な技術であり高精度化が求められる。

本論文は、深層学習を活用して、LIBの走査型電子顕微鏡(SEM)画像データから空隙箇所を自動抽出する作業の効率化と、蓄電池内部の状態管理に必要なSOC推定の高精度化を目的とする。深層学習の活用には、適切なネットワークモデルの構築、教師データの準備と、学習時間の短縮が大きな課題として認識される。

まず畳み込みニューラルネットワーク(CNN)の中のU-Netモデルのネットワーク構造を進化させ、学習効率に悪影響を及ぼす内部共変量シフトを抑えるため特徴量マップにバッチノーマライゼーションを加え、畳み込み層数やフィルタ数、画像のならし効果やロバスト性向上のためプーリング条件などを最適化した。さらに構成を左右対称にしてアップサンプリングで特徴マップをクロップせずそのまま利用した。これらの特徴を持つ独自のネットワークモデルを構築した。同モデルを使用してSEM画像データから空隙情報を自動抽出する方法を提案する。熟練者が作成した空隙抽出データと予測結果のピクセル単位の重なりからIoU(Intersection over Union)評価指標で精度比較した。被験者は初心者(入社2年)から熟練者(入社25年)までの材料開発者10名で構成する。経験の違いにより被験者間で精度に2~5倍の差が確認され、空隙を見分けるには電池材料の立体的構造をイメージする経験的判断が必要であると考えられる。被験者のIoU精度の平均値(mean)30.1%に対して本手法は約1.5倍の44.4%で抽出した。熟練者の最も高い精度は49.2%で熟練者

のレベルを超えることはできなかったが、他と比較すると良好な精度が実験的に確認できた。抽出作業は1画像当たり人手で1時間程度、本手法は数秒程度で完了した(学習時間除く)。本手法のIoU精度は、標準FCNモデル30.3%、FCN改モデル52.7%に比べ67.5%であり、明らかに精度に優位性が見られた。以上から本手法による空隙抽出の自動化による作業効率向上への有効性が確認され工学的に有用であると考えられる。

次にリカレントニューラルネットワーク(RNN)の1つであるLSTM(Long Short-term Memory)モデルに対してデータ次元数や同時処理データ分割長、隠れ層数の設定、学習率などのパラメータ条件や処理手順を最適化して独自のネットワークモデルを構築した。同モデルを使用してBMSで観測される端子電圧、電流値から電池のSOC推定を行う方法を提案する。一方、教師データの準備方法について、まず実験室で諸条件を設定した等価回路モデルによって得られた測定値を教師データに用いた。次に実際の観測データから統計的推定手法(RLS-EKF)を用いて得られたSOC推定値を教師データに充足することで多様な教師データを準備可能にした。これらの特徴を持つ革新的な独自の教師データ構築方法を提案した。SOCの実測値と推定値の差の平均平方二乗誤差(RMSE)評価指標で精度比較した。EKF法では放電パターンの違いにより約0.5~3.0%で精度にバラツキが生じるが、本手法はすべてのデータで約1.0%前後の安定した精度を実験的に確認した。さらに過去に学習した知識モデルを活用した転移学習(ファインチューニング)により教師データ数が半分でも精度1.0%前後を維持し、学習時間では約2200秒から約1000秒に短縮され55%減の転移学習の効果を確認できた。

実験により得られた成果は、本提案手法におけるネットワークモデルと教師データ準備方法と学習効果によるものであり、革新性と有効性の高さの可能性を示した。

Abstract of Doctoral Dissertation

Title: Research on lithium-ion battery state estimation technology using deep learning

Doctoral Program in Advanced Electrical、 Electronic and Computer Systems
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

シオハラ タカヒロ
SHIOHARA Takahiro

By utilizing deep learning, the purpose of this thesis is to improve work efficiency by automatically extracting pores from SEM image data of Lithium-ion Battery (LIB) and to improve the accuracy of SOC estimation required for BMS. To utilize deep learning, “construction of appropriate network model”, “preparation of training data”, and “taking very long time for learning” are recognized as major issues.

This thesis presents a method to automatically extract the position and shape of pores from SEM data by using a unique network model that is evolved from U-Net model in CNN. The accuracy of extracting the pores was compared between this method and 10 material researchers (from beginners to experts) by using the IoU. This method achieved almost the same accuracy as experts. The accuracy of this method which was customized U-Net was 67.5% over the standard FCN 30.3% and the modified FCN 52.7%, showing a clear advantage in accuracy.

This thesis presents a method to estimate SOC of LIB by using a unique network model using the LSTM model. Regarding the method of preparing training data, first, the measurement data obtained by the equivalent circuit model with various conditions set in the laboratory was used as the training data. Next, this thesis presents an innovative training data construction method that adds the SOC estimation data, calculated by the RLS-EKF, to the training data. The accuracy of the SOC estimation result of the battery was compared by using the RMSE. Experimental results show that the accuracy of the EKF fluctuated from 0.5 to 3% depending on the data, but the accuracy of this method was stable at about 1.0%. By fine-tuning the transfer learning using the knowledge model, it was confirmed that

the learning effect was 1. 0% accuracy and 55% reduction in learning time reduced from about 2200 seconds to about 1000 seconds.