論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨の公表

学位規則第 8 条に基づき、論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

<table>
<tr><td>フリガナ
氏名（姓、名）</td><td colspan="2">シオハラ タカヒロ
塩原 孝弘</td><td>授与番号 甲 1580 号</td></tr>
<tr><td>学 位 の 種 類</td><td>博士（工学）</td><td>授与年月日</td><td>2022 年 3 月 31 日</td></tr>
<tr><td>学位授与の要件</td><td colspan="3">本学学位規程第 18 条第 1 項該当者 [学位規則第 4 条第 1 項]</td></tr>
<tr><td>博士論文の題名</td><td colspan="3">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</td></tr>
<tr><td rowspan="2">審 査 委 員</td><td colspan="2">(主査) 福井 正博
（立命館大学理工学部教授）</td><td>鷹羽 浄嗣
（立命館大学理工学部教授）</td></tr>
<tr><td colspan="2">中山 良平
（立命館大学理工学部教授）</td><td></td></tr>
</table>

論文内容の要旨

温暖化対策の再生可能エネルギーなどにおいてリチウムイオン蓄電池の安全かつ有効な活用が期待される。本研究で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を目的とする。

本論文では、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最適化し、SEM 画像から空隙情報を自動抽出する方法を提案した。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す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。また、従来手法の標準 FCN モデル 30。3%、FCN 改モデル 52。7%に比べ 67。5%であり IoU 精度を大幅に向上させた。

つぎに、リカレントニューラルネットワークの 1 つである LSTM モデルを最適化し蓄電池の充電状態の推定を行う方法を提案した。従来の 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、提案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した。

提案した各手法を統合し活用することで、蓄電池の製造時から使用時を含めた広範囲でのリチウムイオン蓄電池の状態把握が可能になる。これらの結果は革新性と有効性の高さを示すものである。

<table>
<tr><td>論文審査の結果の要旨</td><td>本論文の審査に先立ち、公聴会を開催した。公聴会では学位申請者による論文要旨の説明の後、審査委員による口頭試問を行った。
本論文の特徴は、昨今注目を浴びているリチウムイオン蓄電池の高安全かつ最適活用のための、製造時の自動評価と使用時のバッテリーマネージメントという複合的な問題を捉え、深層学習を用いた実用手法を解明した点である。今後、この分野は大きく発展することが見込まれ、蓄電池劣化モデルの高精度化や知識化といった将来課題はあるが、本研究は電池状態推定に関する提案として有効かつ当該分野研究をリードするものである。本論文は以下の点について評価できる。
１．　蓄電池の製造時における構造の最適化における問題をよく理解し、畳み込みニューラルネットワークの中のU-Netモデルのネットワーク構造を進化させたモデルを提案し、その有効性を多くの実験によって行った。従来手法との比較や熟練者との比較により推定精度の優位性を証明し、製造最適化における評価の時間短縮と高精度化に大きく貢献できることを示した。実用面でも優位性の高い技術の解明につながった。
２．　蓄電池の使用時における充電状態推定に関して、従来技術のカルマンフィルタや逐次最小二乗法などの最適化技術をよく理解し、さらに、時間変化を取り扱う深層学習手法のリカレントニューラルネットワークの技術の活用方法の提案につなげた。新技術は従来技術に比べて解の安定性において顕著な優位性を確認することができ、今後の蓄電池状態推定における有効技術を解明した。これらの有効性は多くの実験によって実証されており、信頼性も高い。さらに、深層学習は教師データの準備と学習時間が大きいという問題に対して、転移学習の適用手段を提案し、それらの時間短縮においても有効手段を解明した。
以上、多くの実験により、提案手法の有用性を客観的に示していることから、明解で革新性と実用性の高い手法を確立したと言える。現在および将来にわたる電池状態推定の課題を的確に捉え、有効な解決手段を提供したことは、学術的、産業的に高く評価できる。
以上の通り、公聴会での口頭試問結果および論文審査を踏まえ、審査委員会は本論文が本研究科の博士学位論文審査基準を満たしており、博士学位を授与するに相応しい水準に達しているという判断で一致した。</td></tr>
<tr><td>試験または学力確認の結果の要旨</td><td>本論文の公聴会は、2022 年 1 月 28 日（金）15 時 00 分～16 時 30 分オンライン会議において行われた。公聴会では、学位申請者による論文要旨の説明の後、審査委員は学位申請者に対する口頭試問を行った。各審査委員および公聴会参加者より、空隙率の最適性の判断、教師データの準備方法、教師データの追加方法や解の良し悪しの判断基準、転移学習の方法など多くの角度からの質問がなされたが、いずれの質問に対しても学位申請者の回答は適切なものであった。審査委員会は、論文内容および公聴会での質疑応答を通して、学位申請者が十分な学識を有し、博士学位に相応しい学力を有していると確認した。
以上の諸点を総合し、審査委員会は、学位申請者に対し、本学学位規程第 18 条第 1 項に基づいて、「博士（工学 立命館大学)」の学位を授与することが適当であると判断する。</td></tr>
</table>