

## 学位論文審査の結果の要旨

氏名	佐伯 昌造
審査委員	主査 川原 稔 副査 高橋 寛 副査 二宮 崇 副査 阿萬 裕久

論文名 Deep Metric Learning の高精度化および深層強化学習による視野検査エージェント

### 審査結果の要旨

佐伯昌造氏は、本学位論文において、視野等の眼科検査データベースの構築とそれらの情報検索システムを作成する方法として、Deep Metric Learning (DML) の手法の高精度化と視野検査システムの効率化に関する研究を行った。

DML はデータの類似性をニューラルネットワークで学習し、データを特徴ベクトルに変換する手法である。DML の損失関数には Proxy-based 損失と Pair-based 損失がある。既存の Proxy-based 損失は学習時の勾配特性や特徴ベクトルの分布を表す中心の数に欠点がある。

視野検査は眼科の検査の一種であり、被検者に光刺激を呈示して、光刺激への反応から網膜感度を定量化する。既存の視野検査は検査時間が片目 6~9 分ほどである。視野検査における自覚的検査の性質上、長い検査時間は検査精度の低下に繋がる可能性がある。検査時間を短縮するためには、網膜の刺激位置と刺激の強度を決定する計測ストラテジーの改善が必要である。

本学位論文では DML の高精度化と視野検査の効率化を行うため、主に 3 つのアプローチの研究を行った。それぞれのアプローチの概要と研究成果は以下のように纏められる。

#### (1) L1 正則化による Deep Metric Learning の特徴選択

既存の DML では、特徴ベクトルに L2 正則化を行い、特徴ベクトルの大きさが一定の範囲となるように正則化されている。本研究では、L2 正則化された特徴ベクトルに対して、DML の損失関数に L1 正則化項を加えた損失関数を提案し、評価実験を行った。L1 正則化の影響を適切な値に定めることにより DML の精度が向上した。L2 正則化と L1 正則化を組み合わせることにより、DML で重要な特徴が強調され、重要でない特徴が抑制されるよう作用したことにより、精度の向上に寄与したものと考えられる。L1 正則化は損失関数の種類によらず適用可能であり、様々な DML の損失関数の精度向上に寄与するものと考えられる。

#### (2) Multi Proxy Anchor 損失と Deep Metric Learning の評価手法

本研究では損失関数及び評価メトリックの提案を行い、DML の高精度化及び、適正な評価手法の検討を行った。

代表的な Proxy-based 損失には Soft Triple 損失と Proxy Anchor 損失がある。Soft Triple 損失は特徴ベクトルの各クラスに対して、複数の中心を考慮するが、損失関数の勾配特性に問題

があり、効率的に学習が行えない問題が指摘されている。一方で、Proxy Anchor 損失は、Soft Triple 損失等にある勾配特性の問題を解決しているが、各クラスに対して一つのみしか考慮できない。本研究では、各クラスに対して複数の中心を考慮でき、損失関数の勾配特性を改善した Multi Proxy Anchor (MPA) 損失を提案し、評価実験を行った。MPA 損失は特徴ベクトルの分布に局所中心が存在すると考えられるデータセットにおいて、既存の損失関数と比べ高精度な結果となった。この結果は MPA 損失による勾配特性の改善による学習効率の向上と複数の中心によりデータセットの局所中心が表現できたことが示唆されている。

DML の精度の評価は各データをクエリとした検索結果を評価する。既存の DML の精度評価には Recall@k メトリックや Mean Average Precision (MAP@R) が用いられている。Recall@k メトリックは検索長内の検索結果の変化を反映できず、MAP@R メトリックは検索長 R が各クラスのデータの大きさに依存し、DML の精度を十分に反映した評価が困難である。本研究では、検索長 k の normalized Discounted Cumulative Gain (nDCG@k) メトリックを DML の評価手法として利用することを提案した。nDCG@k メトリックは検索長によらず、ダイナミックレンジが一定であり、検索長内の検索結果の変化を反映することが可能であり、既存の評価メトリックと比べ、DML の性能を適正に評価することが可能であることが示唆されている。

### (3) Visual Field Transformer と深層強化学習による視野検査エージェント

従来の視野検査の計測戦略は、網膜の位置ごとに感度推論を行う計測戦略や、特定の眼病を仮定し網膜感度を推論する計測戦略がある。網膜の位置ごとにおける推論は検査時間が長く、特定の眼病に特化した推論は異なる眼病の際に性能の低下が考えられる。本研究では計測戦略として、ニューラルネットワークで構成される Visual Field Transformer (ViFT) を深層強化学習によって学習する方法を提案した。ViFT は被験者の光刺激への反応の履歴から計測場所と計測感度を決定する。既存の計測戦略と ViFT による視野検査の性能の比較を行なった。ViFT による視野検査は既存の計測戦略と比較して、半分以下の検査時間で小さい計測誤差であった。ViFT は被験者の光刺激への反応と網膜の位置関係を考慮して次の計測場所と計測感度の決定が行えたことにより、短時間の検査で高精度な検査が可能となったことが示唆されている。

提出された学位論文の研究成果は、査読付きの国際会議に 2 編受理されている。また、研究成果の一部を 2022 年 1 月に特許申請している。本学位論文の公聴会は令和 4 年 2 月 7 日に開催し、約 60 分の論文発表と約 40 分の質疑応答が行われた。引き続き、学位論文審査委員会を開き、本論文の内容を厳正に審議した結果、審査委員が全員一致で、博士 (工学) の学位を授与するのに値するものと判定した。