

論文の要旨

氏名 小田川 真之

論文題目 Implementation of Real-Time Computer-Aided Diagnosis System with Quantitative Staging and Navigation on Customizable Embedded Digital Signal Processor

(定量的ステージングとナビゲーションを有するリアルタイム診断支援システムのカスタマイザブルデジタルシグナルプロセッサへの実装)

近年、国内外で大腸がんの罹患数は年々増加傾向にある。大腸がんは早期ステージで発見し、治療を実施することでほぼ完治可能である。その診断方法として、Narrow Band Imaging (NBI) システムを用いた大腸拡大内視鏡による画像診断が行われている。大腸 NBI 拡大内視鏡診断では、所見分類に基づいて医師が大腸内壁の血管等の微細模様構造から腫瘍の有無やがんの進行度を診断する。この診断を行う医師には専門知識と経験が必要であり、診断できる医師が限られており、医師による診断のばらつきも問題となっている。そこで、コンピュータ画像解析を用いた定量的な指標に基づいた、客観的な判断による診断の正確度の向上や、経験の浅い医師への診察時の診断の支援を目指したコンピュータ診断支援 (Computer-Aided Diagnosis : CAD) システムが必要とされている。我々の研究グループでは、従来の研究ではがんの検出や分類が診断支援の主流であるのに対して、日本内視鏡学会で統一された所見分類である Japan NBI Expert Team (JNET) 分類を基に、病変ががんであるかどうかの識別に加え、がんの進行度 (ステージング) を定量的かつ客観的指標として、医師に提示するリアルタイム診断支援技術の確立を目指している。

本研究では、NBI 内視鏡診断におけるリアルタイム CAD システムによる定量的な指標を提示するステージング分類手法 (Staging Classification) を提案する。NBI 内視鏡による医師の診察では、臨床現場において内視鏡のリアルタイムビデオ (フレームレート : 30fps) を見ながら診断する必要がある。がんの進行度の分類は大腸の表面、血管のピットパターンに基づいて行われ、経験のある専門医でなければ精度の高い所見分類に基づいた診断を行うことは難しい。従来の CAD システムはポリープの検出や、静止画像での分類が主流であり、医師に対しリアルタイムでの客観的指標を提示する定量的ステージング分類が必要となってきた。リアルタイムの内視鏡ビデオでは、大腸の連続的な微動やポリープの不定形状のため病変に不明瞭な領域が存在し、定量的ステージング分類の結果に影響を与える。そこでステージングを判断する領域を明瞭な領域に移動することにより、定量的ステージング分類の結果や精度が改善される可能性がある。そのため、

病変の画像が明瞭な領域へのナビゲーション機能が不可欠である。従来研究における CAD システムでは、このようなナビゲーション機能を有した定量的ステージングは研究されておらず、また、リアルタイムビデオ (30 fps) に対する CAD システムは報告されていない。リアルタイム CAD システムは、診察室などの臨床現場で使用することが必要であり、既存の内視鏡システム内に実装したり、スマートグラス等の医師が簡単に身につけることができる小型の組込システム上にハードウェアとして実装することが望まれる。そこで、本研究では、診察室の臨床現場において使用可能な、1) リアルタイムビデオに対応し、30 fps 以上のスループット、30 ms 以下の遅延、1 W 以下の消費電力、2) 90%以上の精度での定量的ステージング、および、3) リアルタイムナビゲーションを有した CAD システムを、カスタマイザブルデジタルシグナルプロセッサ (DSP) 上での実現を目指す。

提案システムのカスタマイザブル DSP への実装に対しては、Convolutional Neural Network (CNN) の一種である AlexNet を特徴抽出器として、また、機械学習として Support Vector Machine (SVM) を用い、これらの実装を 8 ビット量子化することで、処理サイクルとメモリサイズの大幅な削減を行った。また、AlexNet の中間レイヤーの特徴量を使用することでシステムバスの競合を回避し、リアルタイム処理に必要な高速化を実施した。その結果、実行周波数 200 MHz において、44.6 fps、22 ms の遅延、66.6 mW の消費電力を備えたリアルタイム CAD システムを実現した。また、トレーニングデータセットのマルチサイジングとバラランシングを新たに導入することにより、従来の Dense Scale-Invariant Feature Transform (D-SIFT) を基にした特徴量抽出の代わりに、事前学習された AlexNet を特徴量抽出器として使用することにより、90%の精度で定量的ステージング分類を実現した。更に、効果的な定量的ステージングの実現のために、従来の診断支援システムではなかったリアルタイムナビゲーション手法を新たに 2 つ提案した。1 つ目の不明瞭な領域検出によるナビゲーションは、実行周波数 525 MHz で 30 fps、2 つ目の複数のステージング領域によるナビゲーションは、実行周波数 525 MHz で 39 fps を実現可能であることを示した。

第 1 章では、医療現場で CAD システムの重要性が高まっている背景について述べた後、がんの進行度を定量的かつ客観的な指標で提示する意義やナビゲーション機能の必要性について述べる。また、先行研究との比較を行い、内視鏡ビデオに対応するリアルタイム CAD システムへの必要性能と本研究の目的を述べる。

第 2 章から第 5 章で本研究の成果を述べる。第 2 章では、限られたデータで定量的なステージング指標を提供する CAD システムの実現について述べる。まず、シャローラーニング (Shallow Learning) の手法である D-SIFT による CAD システムの基本動作について述べ、特徴量抽出として学習済み CNN を適用した手法を提案する。大腸がんの定量的ステージング分類に対しての適用可能性を評価した結果、限られたデータで 90%以上の精度での分類を確認し、D-SIFT の代わりに、学習済み CNN の出力を使用できることを示す。(公表論文[1]、[3])

第3章では、内視鏡画像の学習画像データセットの作成方法の改良による内視鏡ビデオに対する定量的ステージング分類の精度向上手法について示す。内視鏡ビデオでは、病変の見え方（大きさや位置等）の変化に対応するため、複数サイズの学習画像データを用いることで、識別精度の改善を実現する。次に、学習画像データの病変のタイプの数の偏りによる偏向学習を避けるため、学習データ数のバランス化を行う。これらの2つの方法を適用した結果、内視鏡ビデオを考慮した学習データセットを作成することで、全ての病理タイプに対して定量的ステージング分類精度が90%以上を実現し、リアルタイムでの内視鏡ビデオの定量的ステージングの指標が改善されることを示す。（公表論文[2]）

第4章では、提案したCADシステムのカスタマイズブルDSPへの実装について述べる。実装においては、AlexNetおよびSVMの8ビット量子化により、処理サイクルおよびメモリサイズの削減を行う。また、AlexNetの中間レイヤーの出力を特徴量として使用することにより、システムバスの競合を回避し、高速化を実現する。更に、CADシステムのDSPへの実装上のボトルネック解析の結果から、画像の前処理の並列処理化による処理サイクル数の削減と、CNNの全畳み込み層の処理終了前の中間層の特徴量の使用により、処理サイクル数を70%削減可能であることを示す。サイクルアキュレートなシミュレーション結果から、処理周波数200 MHzにおいて、44.6 fpsのスループットとレイテンシー22 ms、消費電力66.6mWを確認し、内視鏡ビデオに対して、提案した定量的ステージング分類を有するリアルタイムCADシステムの実現が可能であることを示す。（公表論文[1]）

第5章では、内視鏡ビデオに対して、より信頼性の高い効果的な定量的ステージングのためのナビゲーション手法を提案する。1つ目の実現手法は、CNNを用いたビデオ画像の不明瞭領域の検出と、病変が含まれる明瞭な領域へのナビゲーションを提示する方法である。カスタマイズブルDSPでの実現可能性について評価した結果、2つのDSPコアによる並列処理により、がんの進行度に対する定量的ステージング分類をリアルタイムで処理しながら、ビデオ画像の明瞭な領域へのナビゲーションが実装可能であることを示す（30 fps @ 525 MHz）。2つ目の手法は、複数のステージング領域を設定し、医師がどの領域のステージング領域の定量的指標を見ればよいか、判断するための情報を与えるナビゲーション機能を提案し、2つのDSPコアでのリアルタイム処理が実現可能であることを示す（39 fps @ 525 MHz）。（公表論文[3]）

第6章では、本論文のまとめについて述べ、今後の研究課題について述べる。カスタマイズブルDSPへの実装を行い、AlexNetとSVMの量子化、AlexNetの中間レイヤーを使用することにより、44 fpsのスループット、22 msのレイテンシー、66.6 mWの消費電力で30 fpsの内視鏡ビデオのリアルタイム処理と精度の2つの要求を同時に満足するCADシステムを実現した。一般画像で学習済みのCNNの適用、学習データセットのマルチサイズ化とバランス化を行うことで、少

ない学習データ数でも、精度 90%以上の定量的ステージング指標を提示可能なリアルタイム CAD システムの構築手法を確立した。内視鏡ビデオのリアルタイムでの定量的なステージング指標の質の向上のために、2種類のナビゲーション機能とその実現手法を提案し、30fps のリアルタイム処理が可能であることを示した。

以上の研究成果により、大腸 NBI 拡大内視鏡による診察・診断において、客観的な定量的ステージング分類の指標を医師に診察時にリアルタイムで提示することにより、医師の経験やばらつきに左右されない診断結果が得られるようになると共に、診察時にセカンドオピニオンの役割を担うことが可能なリアルタイム CAD システムの構築を可能にし、より正確な診察と診断のサポートを実現することが可能となった。