

中心線探索に基づく血管径可視化手法のハードウェア化に関する基礎検討

A hardware architecture for visualization of blood vessel diameter using centerline extraction

小倉 凌芽[†] 岡本 大空[†] 近藤 真史[†]
Ryoga OGURA Sora OKAMOTO Masafumi KONDO

1 まえがき

血管等の生体における管状組織の管径は、病変の良悪性を評価する上で重要な指標となる。画像処理に基づいた管径の計測・可視化手法として、管状組織上の画素を網羅的に探索する手法 [1]、管の中心線に沿って探索する手法 [2] 等が提案されているが (以降、それぞれ網羅的手法および中心探索法という)、いずれも画素探索や中心線の導出に多大な時間を要する。これに対して筆者らは、再構成型集積回路 (FPGA) に格子状のネットワークを構築した上で、画素単位でパケットルーティングを展開することにより、網羅的手法を電氣的に実現するデバイスの開発に着手している [3]。これに続く本研究では、中心探索法のハードウェア化を目的として、中心線とそれに対応する管径を高速に導出するためのパケットルーティング手法を提案する。そして、パケットシミュレータの開発を通じてその実現可能性を明らかにする。

2 Network on Chip に基づいた血管径計測手法

管状組織上の任意の位置における管径は、その位置の画素を通して管壁に至るまでの線分 (探索線) 長を計測し、これを任意の角度 θ 単位で網羅的に繰り返すことで得られた最短の探索線として求めることができる。これには網羅的な画素探索を伴うことから多大な解析時間を要するため、筆者らは次世代の回路コア接続技術である Network on Chip (NoC) に基づいた血管径計測手法を提案しており、その概要を図 1 に示す。この手法では、格子状に配置されたコアとルータに管状組織上の画素を対応付けた上で、パケットルーティングにより管壁 (上のコア) までの長さを算出する形態を採る。ここで、一般的な NoC では、パケットに内包されている転送元/転送先コアのアドレスを基に転送経路上のルータがルーティングを行うが、提案手法では転送先コア、すなわち管壁の位置が未知であるためルーティングの方向を一意に決めることができない。そこで文献 [3] では、パケットに探索角度 θ を内包し、ルータは θ の方向へ動的にルーティングする方針を採っている。以上の NoC に基づく血管径計測手法の動作手順は以下の通りである。

- 手順 1. 転送元コアは、 θ と $\theta + \pi$ の双方向にパケットを生成・送出する。
- 手順 2. パケットを授受した経路上のルータは、パケットに内包されている θ に基づいてその方向に隣接するルータへパケットを伝搬する。
- 手順 3. 管壁上のルータは、授受したパケットに自身が管理する (転送先) コアのアドレスを登録し、転送元コアへ向けてパケットを返送する。
- 手順 4. 双方向から返送されたパケットを授受した転

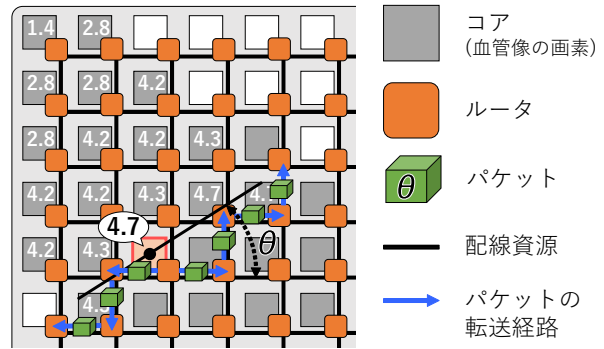


図 1 NoC に基づいた血管径計測手法

送元コアは、両端の転送先コアのアドレスを基に探索線の長さを算出する。

手順 5. 手順 1~4 を θ 単位で繰り返し、最短の探索線を血管径として算出する。

以上の手順を経て管状組織上の全ての画素における管径を算出し終えた後は、その長短に応じた RGB 疑似カラーを割り当てることにより可視化画像を生成できる。

3 パケットルーティングに基づく中心探索法

網羅的手法では、「管状組織像の全画素」についてその位置における管径を探索・計測するため、構造的に膨大な演算量が必要となる。これに対して中心探索法は、探索範囲を「管の中心線上の画素」に限定し、それに直交する法線を管径と見なすことにより、 θ 単位の網羅的な画素探索を伴うことなく管径を効率的に計測できる [2]。中心探索法は (1) 中心線の探索処理、(2) 法線方向の管径算出処理に大別され、各処理の内容を以下に記す。

- (1) 中心線の探索処理：既探索の管径における中点座標の履歴から平均移動ベクトルを算出し、その方向に位置する画素を次の注目画素とする。
- (2) 法線方向に対する管径算出処理：中心線を局所的な曲線の集合とみなし、最小二乗法で得られた二次の近似曲線に対する法線方向に管径を探索・算出する。

中心探索法では、(1) と (2) を交互かつ逐次的に繰り返し処理することにより、中心線に沿った効率的な管径計測を期待できるが、既存の計算機環境では構造的に並列化が困難であり、その解析時間の短縮には限界がある。

そこで本研究では、上述の中心探索法に NoC を応用、つまりパケットルーティングにより (1) および (2) を実現することを考える。まず、(2) の管径算出に係る処理は、2. で述べた通り θ を単位とした網羅的なパケットルーティングによる管径算出手法が確立されていることから、法線方向が求めれば単にその方向に対する探索のみを以て管径を算出、確定すればよい。また、法線方向は中心線に対する近似曲線により求められるため、(1) の中心線の探索過程において副次的に導出できる。

[†] 岡山理科大学 工学部 情報工学科

Department of Information and Computer Engineering,
Okayama University of Science

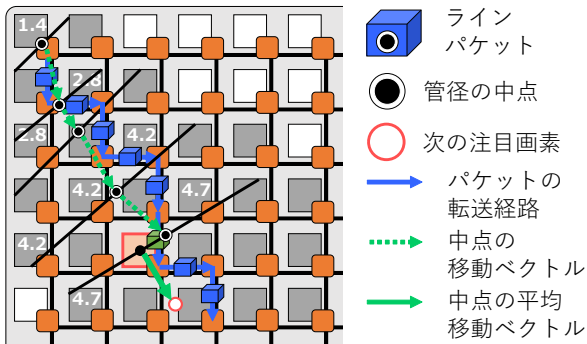


図2 中心線の探索に係るパケットルーティング

そこで本研究では、(1)の処理をパケットルーティングで実現するため、「管径の中心座標」と「中心線(注目画素の集合)」の履歴をそれぞれ k 点分だけ内包可能なパケット(以降、ラインパケットという)を導入する。そして、(2)に係る既存のパケットルーティングによりその履歴を適宜更新し、動的に中心線上の画素に沿ってラインパケットを伝搬、すなわち(1)の処理を実現する。ラインパケットの伝搬に係る概要を図2に示し、中心探索法に対する具体的なルーティング手順を以下に記す。

手順1. 管径の初期探索 任意のコア(画素)を始点に、その位置における管径を探索する。ただし、この時点のラインパケットには履歴が十分蓄積されていないため、ここでは2.の網羅的手法に基づいて管径を探索する。

手順2. 管径の割当て 手順1.で得られた管径の値を内包したパケットを再度同じ管径の方向に伝搬し、その経路上のコア全てに管径の値を割当てる。

手順3. 履歴の蓄積 管径の中心座標、現在の注目画素をそれぞれラインパケットに履歴として蓄積する。

手順4. ラインパケットの初期伝搬 管径の法線方向に隣接するルータへラインパケットを伝搬する。なお、始点の管径に直交する法線は2方向存在するため、それぞれの方向にラインパケットを伝搬する点に注意する。

手順1.~手順4.を繰り返し、ラインパケットに k 点以上の履歴が蓄積された場合は手順5.へ進む。

手順5. 管径の探索 ラインパケットに内包されている中心線の履歴に対して最小二乗法を適用し、二次の近似曲線 $f(x) = ax^2 + bx + c$ ($a \sim c$ は近似係数)を算出する。次に、現在の注目画素の座標 (i, j) について、 $f(x)$ に対する接線の傾き $m = f'(i)$ を求め、これに対する法線の角度 $\theta' = \tan^{-1}(-1/m)$ を算出する。そして、2.の手順1.~4.に基づいたパケットルーティングにより管径を探索する。

手順6. 管径の割当て 手順2.と同様に、管径の値をその経路上のコアに割当てる。

手順7. 履歴の更新 手順3.と同様に、ラインパケットに履歴を追加するが、同時に最も古い履歴を削除する。

手順8. ラインパケットの伝搬 ラインパケットに内包されている中心線の履歴から移動ベクトルを算出し、その方向へ隣接するルータへラインパケットを伝搬する。

手順5.~手順8.を繰り返すことで、ラインパケットが中心線に沿って伝搬する過程で管径の探索と割当てが行われる。そして、始点から双方向に送出されたラインパケットが管状組織外に伝搬した時点でルーティングは停止し、中心探索法に基づいた管径計測を完了する。

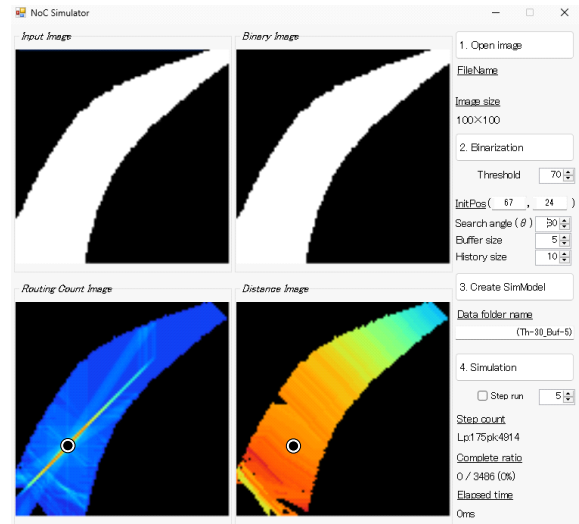


図3 パケットシミュレータによる管径の可視化

4 動作確認

提案のルーティングアルゴリズムに基づいたパケットシミュレータを開発し、血管を模したテスト画像に対して管径の計測・可視化を行った結果を図3に示す。本シミュレータは、対象画像の解像度に応じたNoCを生成し、コアおよびルータ間のパケット伝搬の様子をステップ毎に観測することができる。シミュレータ上部の対象画像(100×100 pixel)に対して、右下は各ルータのパケット伝搬回数、左下は管径の計測結果を表しており、最小値(青)~最大値(赤)に応じた疑似カラーを割当てて可視化している。図中に付した◎は中心探索法の始点(67, 24)であり、履歴のサイズは $k = 10$ とした。この結果より、中心探索法に基づいたルーティングが適切に展開され、管径の長短に応じて可視化が施されていることを確認できる。またこのとき、中心探索法の処理(1)および(2)に要した総パケット伝搬回数はそれぞれ175回および4,914回であり、これをハードウェア実装時のクロック数に換算すると、高々数kHz程度のクロックで高速な管径計測を実現できることが示唆された。

5 あとがき

本研究では、中心探索法をNoC上で実現するためのパケットルーティング手法を提案し、それに基づいたパケットシミュレータの開発を通じて適切にルーティングが行われていることを確認した。今後の課題としては、実際の医用画像を対象とした解析が急務であり、併せて既存手法との精度比較を実施する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 22K11964 の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] 南一司, “ニードル型 CCD 生体顕微鏡による術中ヒト冠細静脈の可視化と NTG 作用の評価,” 岡山医学会雑誌, Vol. 120, No. 3, pp. 291-297 (Dec. 2008)
- [2] M. Ueda, et al., “A Fast and Accurate Tube Diameter Visualization Method for Digestive System Medical Images,” IEEJ Trans. Elec., Info. and Syst., Vol. 141 No. 9 pp. 982-991 (Sept. 2021)
- [3] 江野口裕希, 他, “トラス型 NoC に基づいた血管径計測手法における対称性ルーティングの検討,” 第 22 回情報科学技術フォーラム (FIT2023) G-008 (Sept. 2023)