

深層学習による 2 波長の光超音波画像の高解像度化

藤井康仁[†] 安村禎明[†]

芝浦工業大学大学院 電気電子情報工学専攻[†]

1 はじめに

現在、MRI や CT、超音波画像などの医療用画像は臨床診断や研究に幅広く使用されている[1]。これらの画像は人体の内部構造を明らかにし定量的な測定を可能にする。このような医療画像の撮影方法の 1 つに光超音波 3D イメージング技術がある。これは、超音波と光を用いることで四肢や体の血管網と血液中の酸素飽和度を 3 次元画像として撮影するものである。光超音波を利用することで造影剤を必要とせず無被ばくで血管を撮影できる。しかし、光超音波画像を撮影することは、撮影時間やコストがかかるという問題がある。取得する画像の解像度は撮影時間とのトレードオフとなっており、長時間の撮影時間は患者の負担や検査コスト等を増加させる。この問題を解決する一つの方法として超解像技術が挙げられる。超解像技術はこれまでに様々な手法が提案されており、CT や MRI の画像に対して適用したものもある[2,3]。従来の研究では 1 つの画像から 1 つの高解像度画像を生成するものであるが、本研究で扱う酸素飽和度画像は異なる波長で撮影した 2 枚の画像を統合するため、その 2 枚の画像の情報を利用してより高精度な高解像画像が得られると推察される。

そこで本稿では異なる波長で撮影された 2 つの画像から 1 つの高解像度画像を生成し、更にそれらを統合することで 1 つの高解像な酸素飽和度画像を生成できる超解像手法を提案する。

2 2 波長の光超音波画像の高解像度化

ここでは 2 波長の光超音波画像の超解像手法について述べる。光超音波 3D イメージング技術では、酸化・還元ヘモグロビン各々に対応している異なる 2 つの波長の光を用いることで血中の酸素飽和度に対応している指標を算出することが可能であり、これを S-factor[3]という。

S-factor は総ヘモグロビンと酸化ヘモグロビンの比であり、以下の式(1)で導かれる。ここで λ_1 および λ_2 はそれぞれの画像を撮影した際の波長を表し、 γ は計算する位置、 ϵ_{Hb} は還元ヘモグロビンのモル吸光係数、 $\epsilon_{\Delta\text{Hb}}$ は還元ヘモグロビンと酸化ヘモグロビンのモル吸光係数の差である。

$$\text{SO}_2 = \frac{[\text{HbO}_2]}{[\text{HbO}_2] + [\text{Hb}]} = \frac{\frac{\mu_a^{\lambda_2}(\gamma)}{\mu_a^{\lambda_1}(\gamma)} \cdot \epsilon_{\text{Hb}}^{\lambda_1} - \epsilon_{\Delta\text{Hb}}^{\lambda_2}}{\epsilon_{\Delta\text{Hb}}^{\lambda_2} - \frac{\mu_a^{\lambda_2}(\gamma)}{\mu_a^{\lambda_1}(\gamma)} \cdot \epsilon_{\Delta\text{Hb}}^{\lambda_1}} \quad (1)$$

光超音波 3D イメージング技術によって取得した 2 波長の画像とそこから導出される S-factor の 3 種類のデータを用いて超解像を行う。その概要図を図 1 に示す。

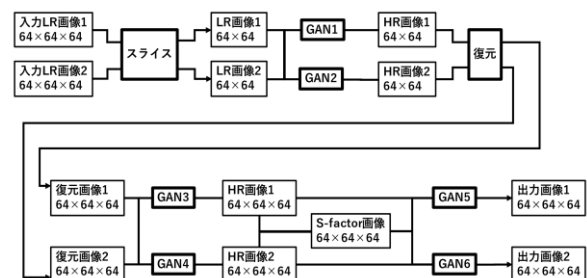


図 1 S-factor を用いた超解像手法の概要図

GAN1 及び GAN2 は 2 次元の画像にスライスされたものを高解像度化するための GAN である。本研究では異なる波長をもつ 2 種類の画像を入力とするため、それぞれに対応した GAN1、GAN2 を用いる必要がある。また、1 度 2 次元画像へとスライスしてから超解像を行うことで、計算の負荷を減らしつつ高解像度化の精度を向上させることが可能である。

GAN3 及び GAN4 は 3 次元復元された画像を高解像度化するためのものである。GAN1 及び GAN2 で出力された画像を重ね合わせるだけでは、血管の 3 次元的な接続が再現されづらいという問題を解決するためのものである。GAN5 及び GAN6 は異なる波長をもつ 2 種類の画像と S-factor を入力とする GAN である。

Super-resolution of two-wavelength photoacoustic images by deep learning

[†] Yasuhito Fujii, Yoshiaki Yasumura, Shibaura Institute of Technology

3 実験

3.1 実験設定

本実験では、光超音波 3D イメージング技術で撮影した画像を用いた。掌の画像 2 種類、上腕の画像 1 種類、前腕の画像 1 種類、ふくらはぎの画像 1 種類、足(甲)の画像 1 種類の 6 部位を撮影した。それぞれの HR 画像と LR 画像を撮影し、さらに異なる 2 波長で撮影した。計 24 種類の画像を用いて実験した。これらの画像はサイズが大きく GAN の学習に適さない。そこで画像の一部を切り出して使用する。本実験では 24 枚の用意した画像を、 $64 \times 64 \times 64$ の画像 9720 枚に分割して学習用のデータとした。最適化アルゴリズムには Adam を使用しエポック数は 1000 とした。

3.2 実験結果

評価手法として MSE と PSNR を用いた数値での評価と、出力された画像とそこから導出される S-factor 画像の目視による評価を行う。表 1 に MSE と PSNR の値を示す。表 1 の 1 列目は、オリジナルの HR 画像とそれを間引くように撮影した LR 画像から導出される MSE と PSNR である。2 列目はオリジナルの HR 画像と GAN3 によって出力された HR 画像から導出される MSE と PSNR である。3 列目はオリジナルの HR 画像と GAN5 によって出力された HR 画像から導出される MSE と PSNR である。

表 1 MSE と PSNR

	LR 画像	GAN3	GAN5
MSE	269719	85549.5	63637.3
PSNR	25.6908	30.6778	31.9629

表 1 から GAN3 によって出力される超解像画像の MSE 値が小さくなっており、PSNR 値が大きくなっている。このことから数値上で高解像度化されているといえる。また、そこから S-factor も用いた GAN5 による最終的な出力画像の MSE 及び PSNR の精度も向上していることがわかる。

次に実際に出力された画像を図 2 に示す。図 2 から光超音波 3D イメージング技術で撮影した LR 画像と比べて GAN3 及び GAN5 によって出力された画像の精度が高いことがわかる。ただし、図 2 だけでは GAN3 と GAN5 のどちらの精度が高いかを目視で確認することは難しいといえる。

次に出力された画像から導出できる S-factor 画像を図 3 に示す。

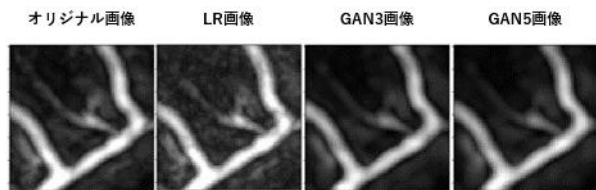


図 2 超解像画像

図 2 同様に光超音波 3D イメージング技術で撮影した LR 画像と比べて GAN3 及び GAN5 によって導出される S-factor の精度が高いことがわかる。LR 画像では同じ血管内で酸素飽和度にムラがあるのに対して、GAN3 及び GAN5 ではそれがほとんどなくなっている。また、GAN3 では画像の境界線付近や深い位置の血管でやや精度が落ちているのに対して、GAN5 は全体を見て精度が高いことが確認できる

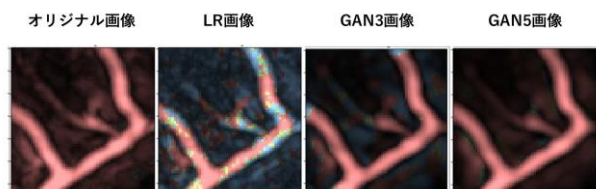


図 3 S-factor 画像

4 終わりに

本稿では深層学習を用いた、光超音波 3D イメージング技術による画像の新たな超解像手法を提案した。入力画像を一度 2 次元にスライスすることで学習の負荷を減らしつつ、異なる 2 つの波長及びそこから導出される S-factor を用いることで超解像の精度を高めることができた。

謝辞

本研究では株式会社 LUXONUS からデータを提供いただき、データの特性をご教示いただいた。深謝致します。

参考文献

- [1] Mahadevappa Mahesh. "The Essential Physics of Medical Imaging, Third Edition." Med. Phys. 2013.
- [2] Can Zhao, Aaron Carass, Blake E. Dewey, and Jerry L. Prince. "Self super-resolution for magnetic resonance images using deep networks." 2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). 2018.
- [3] Yoshiaki Matsumoto. et al. "Visualising peripheral arterioles and venules through high-resolution and large-area photoacoustic imaging." Scientific Reports. 2018.