

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：33111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K17738

研究課題名（和文）心臓カテーテル撮影における動画倍速駆動処理技術の開発

研究課題名（英文）Development of Double-Speed Movie Drive Processing Technology for Cardiac Catheterography

研究代表者

長谷川 晃（Hasegawa, Akira）

新潟医療福祉大学・医療技術学部・講師

研究者番号：20749999

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果として、動きによる不鋭の除去処理をディープニューラルネットワーク（U-Net）で行った。最初にメトロノームの振動を静止した動画を教師画像、フレームレート7.5fps、メトロノームの振動数160bpmの動画をトレーニング画像としてU-Netの学習を行った。続いて右冠動脈を撮影した動画50症例から、冠動脈の動きが小さい心位相での画像を教師画像、不鋭が確認できる画像をトレーニング画像として、U-Netの追加学習を実施した。この結果、冠動脈の不鋭は大幅に除去された。処理後の画像をフレーム画像としてつなぎ合わせ、疑似動画として再生した結果、冠動脈を明瞭に観察できる動画となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は心血管撮影の画像処理に応用でき、これにより被ばくを増やすことや患者負担を増やすことなく、心血管撮影において冠動脈がより明瞭に描出されることが期待される。冠動脈の描出の向上は冠動脈病変の診断や経皮的冠動脈インターベンションにおけるデバイスの位置確認精度の向上が期待される。更にデバイスの位置確認精度の向上は安全なインターベンションに寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The result of this study is a deep neural network (U-Net) for removing unsharpness due to motion. First, the U-Net was trained using still movies of metronome oscillations as the teacher images and movies with a frame rate of 7.5 fps and a metronome frequency of 160 bpm as the training images. Then, from the 50 cases of movies of the right coronary artery, additional U-Net training was conducted using the image from the cardiac phase with small coronary artery motion as the teacher image and the training image as the image in which insensitivity could be confirmed. As a result, sharpness of coronary arteries was significantly eliminated. The processed images were stitched together as frame images and played back as a pseudo-movie, resulting in a video in which the coronary arteries can be clearly observed.

研究分野：放射線技術学

キーワード：人工知能 ディープラーニング U-Net 不鋭除去 心臓カテーテル撮影 冠動脈 動画

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

循環器専用血管撮影装置は、主に心臓を対象とした X 線透視による動画撮影用装置である。心臓の冠動脈で動脈硬化や脂肪の沈着により血管が狭窄した場合、血管内超音波 (IVUS) や血管拡張用のバルーン、ステントなどの血管内治療器具 (デバイス) を冠動脈に挿入し、冠動脈を拡張する手術を行う (心臓カテーテル治療)。循環器専用血管撮影装置は、そのデバイスの位置を確認するために用いられている。

循環器専用血管撮影装置の動画撮影におけるフレームレートは、最大 30 frame/seconds (fps)、小児等の高心拍でも 60fps で行われている。しかし近年、患者被ばく低減の観点から、フレームレートを低く抑え、被ばく線量を減らすことが推奨されている 1)。この弊害として、冠動脈の中に置かれたデバイスが明瞭に観察できず、診断および治療は医師の主観的経験に頼らざるを得ない。このデバイスが明瞭に観察できない原因は主に、装置のシステム上における画像処理の限界からくる残像 (ボケ) と、フレームレートより速い心臓の拍動 (ブレ) が挙げられる。その結果、特に大きな心拍動や心拍数が高い患者の場合、医師はデバイスの位置を正確に把握するため X 線透視の時間が長くなり、結局、被ばく線量が多くなってしまふ。また、位置確認のために治療全体にかかる時間が長くなり、治療を受ける患者の負担にもなる。

ここで、残像のボケを取り除く画像処理、各フレーム画像でのブレの補正、および動画のフレーム補間処理による画質向上システムが消化器領域の X 線透視装置向けに開発された 2)。この残像やブレの具合を正確に把握し、さらに動きの激しい循環器診療での動画にも応用すれば、被ばく線量を増やすことなく、残像からのボケや心拍動によるブレを改善し、医師にとって観察しやすい動画になることが期待できる。この残像やブレの具合を正確に把握するためには、それらを定量的に評価する必要がある。しかし、現在は一般透視装置における残像の評価は行われているものの、循環器専用血管撮影装置の動画について、残像やブレを定量的に検討した研究はない。また、定量評価の結果から効率的に残像やブレの改善する、循環器専用血管撮影装置専用の画像処理技術の開発に関する研究も見られない。

予備実験として循環器専用血管撮影装置の動画に含まれる残像を画像ノイズから定量的に調べたところ、30fps で約 7% の残像成分が含まれていることが示唆された。したがって、画像ノイズのみならず、空間分解能についても定量的に詳しく調べることで、循環器専用血管撮影装置で撮影された動画に含まれる残像からのボケや心拍動によるブレを正確に把握できるようになる。また、この定量評価により、残像によるボケや心拍動によるブレを適正に補正する画像処理が可能となり、画質改善が期待できる。さらにフレーム補間による画像処理でフレームレートを増やせば、心拍動が滑らかに観察できる動画となり、医師がデバイスの位置を観察しやすくなる。その結果、心臓カテーテル治療における医師の負担軽減、および被ばく線量の低減や治療時間の低減による患者の負担軽減、などが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、循環器専用血管撮影装置で撮影された動画の残像や心拍動によるブレを定量的に評価し、その結果に基づいた効率的な画質改善を画像処理で行うことにより、被ばく線量を増やすことなく、鮮明な動画を取得することである。

3. 研究の方法

透視画像は CsI (TI) / 薄膜トランジスタ (TFT) イメージングアレイ (Artis zee BC; Siemens, Erlangen, Germany) からなる間接変換型 FPD で取得した。間接変換型 FPD は、シンチレーター、フォトダイオード、コンデンサー、電荷輸送回路で構成される。入射した X 線は、シンチレーターで可視光に変換され、フォトダイオードで電荷に変換される。電荷はコンデンサーに蓄積され、電荷輸送回路によって定期的に転送される 3)。今回使用した FPD のマトリックスサイズは 960 × 960 ピクセル、ピクセルサイズは 184 × 184 μm、画像グレースケール範囲は 14 ビットであった。曝射条件は管電圧 74 kV、線量 0.170 μGy/frame とし、固有フィルタ 2.5 mm Al、付加フィルタ 0.3 mm Cu を使用した。また、フレームレートは 7.5、10、15、30 fps とした。撮影した動画データは、圧縮及び動画変換が行われる前の 1 フレームごとのデータとして装置本体から取得した。

(1) 残像の評価

残像による解像特性への影響の計測

解像特性評価のためにエッジ法による modulation transfer function (MTF) の測定を行った 4)。透視画像を 20 秒間、3 回撮影し、7.5 fps では 450 枚、10 fps では 600 枚、15 fps では 900 枚、30 fps では 1800 枚の画像を取得した。MTF の測定手順の概要は、約 3 ° 傾けた 2 mm 厚の銅板のエッジに対して X 線束中心が垂直になるように照射した。得られた画像から合成エッジプロファイルを作成した後、有効露光量変換を行い edge spread function (ESF) を得た。ESF を微分することで line spread function (LSF) を得た後、フーリエ変換、および正規化をして MTF を取得した。

残像特性の測定

IEC62220-1-3 に従い、残像特性を計測した 5)。残像補正係数を表す r は以下の式で求められる。

$$r = \frac{1}{2f_N \cdot NPS_t(0)} \int_{-f_N}^{f_N} NPS_{t,lag}(f) df$$

ここで f と f_N はそれぞれ時間的な周波数とナイキスト周波数を表し、 $NPS_{t,lag}(f)$ と $NPS_t(f)$ はそれぞれ残像がある場合とない場合の時間軸の noise power spectrum (NPS) を表す。 $NPS_{t,lag}(f)$ は画素 (i, j) 毎に時間軸方向の画素値列を抜き出してフーリエ変換することで計算できる。各フレームレートでの 1 回あたりの撮影時間は 20 秒とし、7.5 fps では時間軸方向に 150 フレーム、10 fps では時間軸方向に 200 フレーム、15 fps では時間軸方向に 300 フレーム、30 fps では時間軸方向に 600 フレーム画像を取得した。均一なマンモグラフィ精度評価用アクリルファントム (GAMMEX 159A 型, 140 × 140 × 19 mm) に対し一様に X 線曝射し、均一画像データを収集した。撮影中のフレームから 128 枚取得し、2 次元フーリエ変換後、全周囲方向にパワースペクトルを平均化し、 $NPS_{t,lag}(f)$ を得た。一方、残像がない場合の $NPS_t(0)$ は 1 ショットの撮影を 128 回繰り返し、時間軸上につなげた後 NPS を計測することで、 $NPS_t(0)$ とした。

(2) 心拍動によるブレの影響の定量的計測

動体の動きの速さとフレームレートの変化による画質の関係を、MTF を指標として測定した。撮影時は C アームを 90 ° 倒し、寝台による測定への影響がないようにした。メトロノームの移動速度は 60、80、100、120、160、200 beats/minute (bpm)、フレームレートは 7.5、10、15、30 fps とした。撮影はフレームレートごとにそれぞれ 20 秒間、28 回ずつ撮影した。そこから圧縮及び動画変換が行われる前のフレームデータを装置本体から取得することで、7.5 fps では合計 3000 枚、10 fps では合計 3000 枚、15 fps では合計 4500 枚、30 fps では合計 8000 枚の画像を取得した。静止状態および動いているメトロノームに対して X 線束中心が垂直になるように照射を行った。そして、取得した取得した動画像からメトロノームの棒部分が約 2 ° 傾いている画像を選択し、150 × 80 pixel の ROI を設定した。その画素値データから ESF を求め、ESF を微分することで LSF を得た。LSF をフーリエ変換し正規化して MTF を求めた。

(3) Deep convolutional neural network (DCNN; U-Net) による残像および不鋭の補正

U-Net による不鋭除去

U-Net の学習用データには 200 bpm、30 fps の画像を 267 枚使用した。テスト用データには 200 bpm、7.5 fps の画像を 79 枚、200 bpm、15 fps の画像を 161 枚、100 bpm、30 fps の画像を 308 枚使用した。撮影したメトロノームの X 線動画像からフレームごとに画像を読み込み、不鋭の大きいメトロノームの針の先端部を 128 × 128 pixels で切り出して入力画像とした。また、教師画像として静止状態のメトロノームを撮影した画像から針の部分を入力画像と同じ角度になるように回転させてから切り出した。

残像および不鋭の補正に U-Net を用いた。U-Net は通常、入力された画像に対して領域抽出を目的として使用されている。U-Net はコンテキスト (プログラムの実行に必要な各種情報) を取得するための縮小パス (畳み込み層 + プーリング層) と正確な局所情報を可能にする拡張パス (畳み込み層 + アップサンプリング層) が含まれた U 字型の構造となっている 6)。縮小パスでは畳み込み層が物体の局所的な特徴を抽出する役割を担い、プーリング層が物体の全体的な位置情報をばかす (位置ずれの許容) 役割を担っている。より深い層ほど抽出される特徴は局所的になり位置情報は曖昧になる。これによって物体の位置ずれや大きさの違いの影響を受けにくくしている。拡張パスでは、画像サイズが同じものを深い層から段階的に統合することによって、局所的な特徴を保持したまま全体的な位置情報の復元を行うことができる。つまり、縮小パスのプーリング層で圧縮された画像を拡張パスのアップサンプリング層で元の画像サイズに戻している。本研究では、U-Net の領域抽出の能力を応用して、メトロノームの針と同じ濃度値の部分と同じ形状で抽出することによって不鋭の除去を試みた。濃度値は画像のヒストグラムから求め、U-Net でのラベル値とした。ラベル値は 39 であった。使用環境は Python3.6、Tensorflow、学習を繰り返す回数である epoch 数は 100 で実験を行った。

不鋭補正の効果の定量評価

不鋭除去処理前後の画像に対して、不鋭によるブレの指標として MTF を求めた。MTF の測定は、アーチファクト除去処理前後の画像及び教師画像に使用した画像の中からメトロノームの針の部分が 2 ~ 3 ° 傾いている画像を選択し、その画素値のデータから ESF を求めた。この ESF を微分することで LSF を取得し、フーリエ変換することで MTF を求めた。

4. 研究成果

(1) 残像の評価

残像による解像特性への影響

動画のフレームレートを変更することで残像による解像特性への影響を調べたが、MTF では変

化は観察されなかった。このことから、残像による解像特性への影響はないと考える。動画で撮影する目的は動いている物体を観察することであるため、対象が動くと残像によって解像度が下がる可能性がある。

残像特性の測定結果

Fig. 1 にそれぞれ 7.5 fps、10 fps、15 fps、30 fps で撮影された画像に含まれる残像補正係数 r の結果を示す。フレームレートが上がるごとに残像補正係数 r は低下した。最も r が低い値となったのは 30 fps の時で、残像がないとき ($r=1$) より 7.2% 低下した。各フレームにおける NPS も計測したが、フレームレートが上がると NPS は低下した。そこで r 値で補正したところ、各フレームレートの NPS は全て一致した。したがって、動画は残像によりノイズが低下することがわかった。これはフレームレートが大きくなることで過去のフレームの信号の一部が現フレームに加算され、連続するフレーム間で強く相関したことによる。

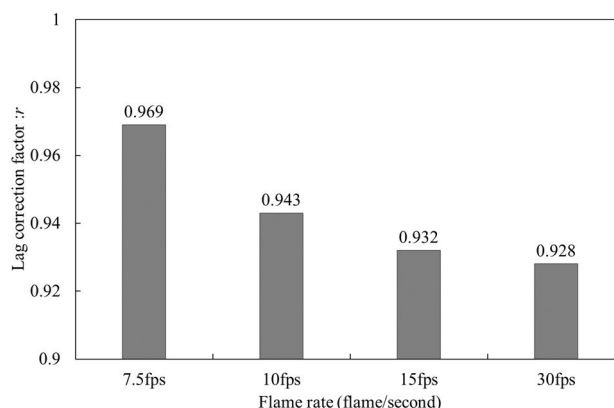


Fig. 1 フレームレートを変更した場合の残像補正係数 r 。

(2) 心拍動によるブレの影響の定量的計測

Fig. 2 にメトロノームの移動速度を 200 bpm とした場合における、透視画像の MTF 結果を示す。(1) の結果はメトロノームが静止していた場合であり、MTF に変化はなかったが、メトロノームが動いている状態では MTF が著しく低下した。特にメトロノームの移動速度が速くなるほど MTF の低下は顕著だった。また、透視画像のフレームレートが低くなるほど MTF が低下する傾向であった。このことから、心拍動における収縮末期の最も大きく動く心位相においても安定して冠動脈を観察するためには、フレームレートを上げる (15 fps もしくは 30 fps を選択する) 必要があることがわかった。また、(1) では残像によってブレの影響を受けることが示唆されたが、今回の計測によって同じメトロノーム移動速度ではフレームレートが高いほうが MTF が高かったことから、残像によるブレの影響はないことが示唆された。

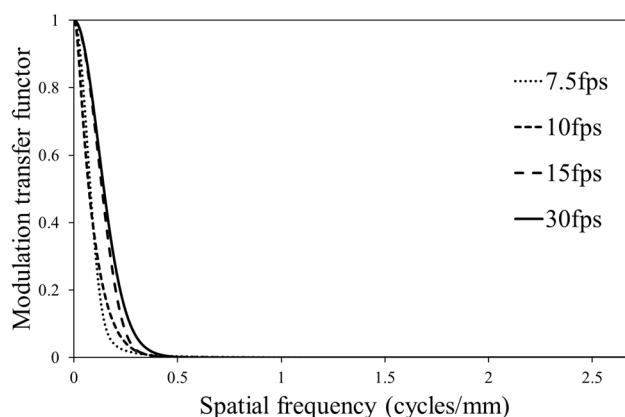


Fig. 2 メトロノームの移動速度 200bpm におけるフレームレートによるブレへの影響。

(3) Deep convolutional neural network (DCNN;U-Net)による残像および不鋭の補正

U-Net による不鋭除去

Fig. 3 に(a)メトロノーム移動速度 200 bpm、フレームレート 7.5 fps におけるメトロノームの針部の画像 (入力画像)、(b)メトロノームを静止し、フレームレート 7.5 fps で撮影したメトロノームの針部の画像、(c) (a)の画像に対し、U-Net による不鋭除去処理を行った画像を示す。本研究では特に不鋭の大きかった 200 bpm を中心に U-Net による不鋭除去を実施したが、学習データが少なかつたものの、不鋭が除去され、教師データに似た状態までメトロノームの針が復元されていた。これは他のメトロノーム移動速度でも同様に不鋭が除去され、教師データと同様のメトロノーム画像となった。また、入力画像では顕著だった画像ノイズが U-Net による処理後はほとんど観察されなかった。画像 SD を計測すると、メトロノーム移動速度 100 bpm、フレームレート 30 fps での入力画像の SD は 3.38 だったのに対し、U-Net 処理後は 0.56、メトロノーム移動速度 200 bpm、フレームレート 15 fps での入力画像の SD は 4.77 だったのに対し、U-Net 処理後は 0.49、メトロノーム移動速度 200 bpm、フレームレート 7.5 fps での入力画像の SD は 4.88 だったのに対し、U-Net 処理後は 0.56 となった。U-Net による不鋭処理後の画像の SD は入力画像の SD に対して 200 bpm、7.5 fps では約 88.5%、200 bpm、15 fps では約 89.8%、100 bpm、30 fps では約 83.3% 低下した。

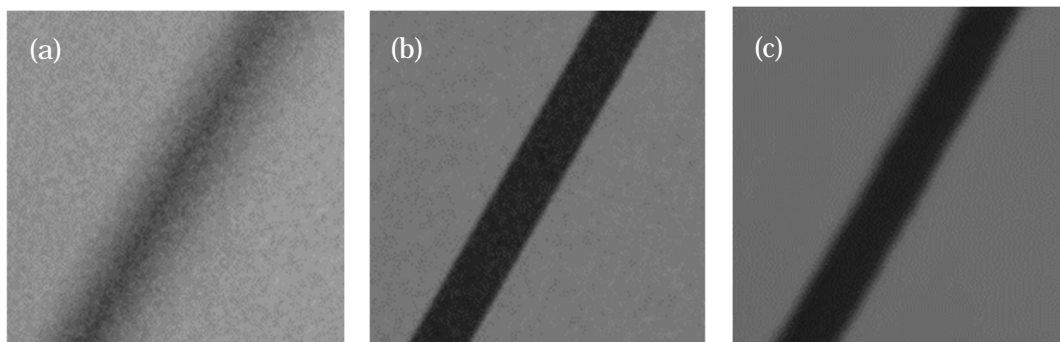


Fig. 3 U-Netによる不鋭処理画像例。

(a)メトロノーム移動速度 200 bpm、フレームレート 7.5 fps におけるメトロノームの針部の画像（入力画像） (b)メトロノームを静止し、フレームレート 7.5 fps で撮影したメトロノームの針部の画像（教師画像） (c) (a)の画像に対し、U-Net による不鋭除去処理を行った画像。

不鋭補正の効果の定量評価

Fig. 4 にメトロノーム移動速度 200 bpm、透視画像のフレームレート 7.5 fps における MTF の測定結果を示す。他のテスト条件でも同様に、入力画像より U-Net 処理後の画像の方が大幅に MTF が向上した。教師画像と比較すると、低周波領域ではグラフがほぼ重なっているが教師画像の方がわずかに良い結果となった。高周波領域ではいずれも処理後の画像の方が良い結果となった。カットオフ周波数による評価では入力画像のカットオフ周波数がメトロノーム移動速度 200 bpm、フレームレート 7.5 fps では 0.34 cycles/mm、200 bpm、15 fps では 0.75 cycles/mm、100 bpm、30 fps では 0.47 cycles/mm であるのに対し、教師画像は 2.99 cycles/mm であり、U-Net による不鋭除去処理後画像はそれぞれ 4.5 cycles/mm、5.3 cycles/mm、3.9 cycles/mm であった。MTF を用いたアーチファクトによるブレの評価では、グラフを比較するとどの撮影条件でも入力画像に対して処理後は MTF が向上した。また、カットオフ周波数も、どの撮影条件でも入力画像に対して処理後は大幅に向上した。以上よりアーチファクトによるブレは大幅に低減したことがわかる。

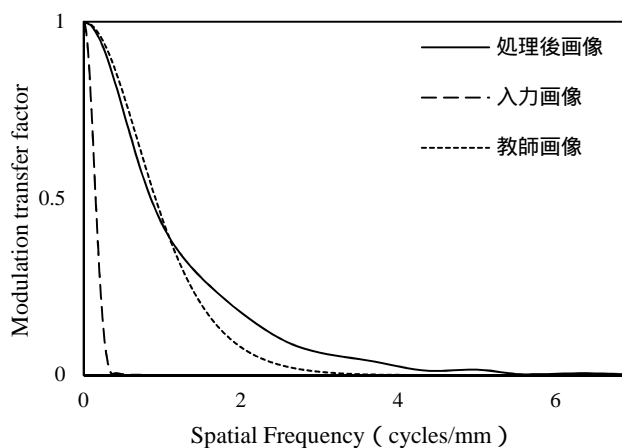


Fig. 4 不鋭処理による解像特性への影響。

これらのことから、本研究で使用した U-Net には領域抽出の能力だけでなく、ノイズ低減効果と不鋭除去効果が期待できる。引き続きデバイスの視認性向上を含め、U-Net をはじめとした DCNN の臨床動画への応用の可能性を検討する。

<引用文献>

- 1) Anthony W A Wassef, Brett Hiebert, Amir Ravandi, John Ducas, Kunal Minhas, Minh Vo, Malek Kass, Gurpreet Parmar, Farrukh Hussain. Radiation dose reduction in the cardiac catheterization laboratory utilizing a novel protocol. JACC Cardiovasc Interv. 2014 May;7(5):550-7. doi: 10.1016/j.jcin.2013.11.022. Epub 2014 Apr 16.
- 2) 中村 正 . FPD 搭載 X 線透視診断装置の高速画像処理エンジン “FAiCE-V NEXT STAGE1” の開発 . https://www.innervision.co.jp/sp/ad/suite/fhc/technical_notes/160436.
- 3) Teramoto A, Kajihara T, Suzuki S, Kinoshita K, Tsuzaka M, Fujita H. Development of quality control system for flat-panel detectors. Radiol Phys Technol. 2011;4(2):164-72.
- 4) IEC 62220-1. Medical electrical equipment-Characteristics of digital X-ray imaging devices Part 1: Determination of the detective quantum efficiency, ed. 1.0, 2003.
- 5) Medical Electrical Equipment Characteristics of Digital X-Ray Imaging Devices-Part1-3: Determination of the Detective Quantum Efficiency Detectors Used in Dynamic Imaging, Geneva, Switzerland, 2007.
- 6) Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox: U-Net: Convolutional Networks for Bio-medical Image Segmentation, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention(MICCAI), 9351, 234-241, LNCS, (2015) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 長谷川晃、野口映花、李鎔範	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 深層学習を用いた心臓血管撮影動画像における冠動脈の動きによる不鋭の除去	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 医用画像情報学会雑誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野口映花、長谷川晃、李鎔範
2. 発表標題 深層学習による心臓血管撮影動画像のモーションアーチファクト除去
3. 学会等名 医用画像情報学会平成30年度春季（第183回）大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷翔人、長谷川晃、李鎔範
2. 発表標題 循環器用血管撮影装置における冠動脈撮影の適正フレームレートの検討
3. 学会等名 医用画像情報学会（MII）平成29年度秋季（第179回）大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

新潟医療福祉大学 医療技術学部 診療放射線学科 教員紹介 長谷川晃
<https://www.nuhw.ac.jp/faculty/medical/rt/teacher/hasegawa.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------