

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04478

研究課題名（和文）X線透視画像上での物体特定により飛躍的な被ばく量低減を実現する新型IVRシステム

研究課題名（英文）Novel concept of IVR system based on object identification in X-ray fluoroscopic images for drastic dose reduction

研究代表者

菊池 洋平（Kikuchi, Yohei）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50359535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：現在、X線透視下でカテーテル手術等を行うインターベンショナル・ラジオロジー（IVR：放射線画像支援治療）では、被ばくによる患者・医師の健康被害の回避が喫緊の課題となっている。本研究では、現行のX線透視ではトレードオフとなっている「低被ばく化」と「良好な画質」の両立を可能とするための革新的なIVRシステムの構築を提案し、これを実現するために必要とされるハード・ソフトウェア両面に関する複数の要素技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題において開発された技術群は低被ばくIVRシステムの構想のみならず、他の応用においても有用なものであると考える。ハードウェア面の開発成果であるGaAsを材料とする多素子型の半導体検出器はIVRのみならず、近年開発研究が行われているコンプトンイメージング装置などの散乱検出器としても有望であると推測される。また、ソフトウェア技術に関してX線画像上での部位特定を行う深層学習ベースの領域抽出技術を開発したが、これらの技術においても、X線透視中における医師へのデバイス位置の補助的情報の提示システムといった、比較的早い段階において実用が可能な応用分野などを想定することが可能である。

研究成果の概要（英文）：In interventional radiology (IR: radiation image-assisted therapy), in which catheterization and other procedures are performed under guidance of X-ray fluoroscopic images, the avoidance of health hazards to patients and physicians due to radiation exposure is an urgent issue. In this study, we proposed the construction of an innovative IR system that achieves both "low exposure" and "good image quality," which are trade-offs in the general X-ray fluoroscopy system, and developed hardware and software technologies to be required for realization of the system.

研究分野：人間医工学

キーワード：インターベンショナルラジオロジー 半導体検出器 医用画像処理技術 低被ばく化技術 X線エネルギー分解画像

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

患者体内の X 線透視画像を見ながらガイドワイヤーでカテーテルなどを病巣に導いて治療を行うインターベンショナル・ラジオロジー (IVR) は、現在の医療では欠かせない技術となっている。全身を巡る血管を様々な医療デバイスの通り道とすることで体を切り開くことなく体中の治療が可能であり、さらに不整脈・がんの治療を始めとして適応症例も広範なことから実施件数が大幅に増大しているが、その普及の陰で被ばくによる健康被害が深刻な問題として顕在化している。X 線透視画像は 1 秒間 10~30 フレームで連続的に撮影した X 線画像の動画であり、長時間の X 線ばく射による被ばく線量は高く、患者の皮膚障害が報告されているほか、日常的に治療にあたる医師の水晶体混濁 (白内障) などの発症率が一般人の数倍となる可能性も指摘されている。

2. 研究の目的

上記の背景にあるような広範な規模の健康被害を回避するうえで最も有効で根本的な解決手段は、「X 線の使用を大幅に制限」するという極めて単純ながら達成しがたいものである。透視撮影に使用する X 線照射量の大幅な削減は透視画像の画質低下を引き起こす。そして、この画質低下は医師がこれまで通りの円滑な治療を行うことを阻み、延いては治療結果・成績の悪化を招くことも想定される。本研究はこの問題を解決することを目指すものであり、普段の治療環境・手法・効果を一切変えることなく、少ない X 線照射量で通常通りの画質の X 線透視画像を医師に提供する技術の要素開発を行うことである。

3. 研究の方法

本研究構想の最終目標は、少ない X 線照射量で撮影した低画質な画像から通常画質の X 線透視画像を再構成する IVR システムの構築のための新しい画質改善技術の確立である。被写体となる物体の特徴は多様なために最適な画質改善の方法論はそれぞれ異なるが、画像上で「写っている物体は何か?」を「特定」し、各物体の像を「物体ごとの画像に分解」することによって、「物体ごとに最適化した画像処理法」の使用を可能となり、全ての被写体像に対して最大限の画質改善効果を発揮できるようになる。そして、画像群を再び「合成」して表示することで、現行のシステムでは一方が犠牲となっていた「低被ばく化」と「通常画質の透視画像」の両立が可能となる。このような手法を実現するため、以下の要素技術開発を行った。

(1) 上記で最も重要となるのが高精度の物体特定の技術である。本研究では、X 線フォトンカウンティングによって得られるエネルギー情報から物体情報を可視化する X 線エネルギー分解型 IVR システムの基礎開発として、この実現に必要なハード/ソフトの要素技術を開発した。

(2) 医用システムに求められる高い信頼性・正確性を保証するためには、上記の X 線エネルギー情報に基づいた物体特定とは別手法によって同様の情報を二重に取得し、これを参照することが有効と考えられる。このため、上記のハード的なアプローチと対を成す、ソフト的な画像処理技術をベースとした物体特定手法を構築した。

4. 研究成果

(1) X 線エネルギー分解型 IVR システムの実現に向けて必要となるハードウェア的な要素として、エネルギー分解型フラットパネル検出器システム (FPD システム) のセンサ部分となるフォトンカウンティング型の試作デュアル・ストリップ型半導体検出器 (Dual Strip Semiconductor Detector, 以下、DSSD, 図 1) を開発した。この DSSD は半絶縁性の GaAs (ガリウムヒ素) ウエハを材料として作製されたもので、 $\approx 20 \times 20 \text{mm}^2$ の有感面積を持つ。検出器の両面にはそれぞれが単体の検出素子として動作するストリップ (短冊状) 電極群が設けられている。ストリップ群の長軸方向は表面・裏面で直交しており、表裏それぞれにおいて放射線入射によって検出信号を同時発生したストリップ対の交差点を求めることで、画像化に必要な X 線入射位置を特定することが可能である。各面のストリップ間のピッチ幅は $200 \mu\text{m}$ であり、FPD としてはこの幅に相当する画像解像度を期待することができる。

X 線に対する良好なエネルギー分解には検出器の低ノイズ化が不可欠で、このためには暗電流 (漏れ電流) を低減することが効果的である。開発した検出器においては表/裏に異なった積層金属電極を用いることでオーミック/ショットキー面を形成して、整流作用を持たせることに成功した。この作用によって検出器に動作電圧を印加した際の漏れ電流を低減することが可能である。また、半導体検出器において共通する特徴である低温での漏れ電流低減がこの DSSD においても確認された。この結果は、ペルチェ素子を用いた冷却時において確認されており、小型のシンプルな冷却機構の追加により一層の低ノイズ化が期待できることが示唆されるものである。

この検出器を用いた実施した放射線検出実験においては、IVR で想定される X 線の平均エネルギーに近い 60keV 光子 (Am-241 線源) に対する検出信号を確認できたほか、この放射線に対するエネルギースペクトルの取得に成功した。得られたスペクトルでは、60keV 光子の光電ピークが Am-241 線源から放出される他の低エネルギー光子群の検出成分と分離されており、IVR に有用なエネルギー分解性能が期待できると考える。

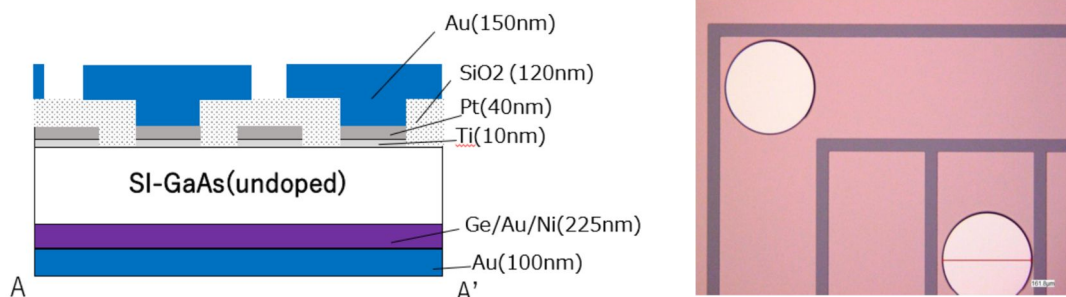


図1 開発した DSSD の積層電極構造 (左) と表面写真 (右)

(2) エネルギー分解型 FPD システムで得られる X 線エネルギー情報を含んだ X 線透視画像から部位特定を行う技術を開発した。この開発はモンテカルロシミュレーションに基づいて得た疑似的な胸部 X 線透視画像を分析対象として行ったもので、その画像視野に含まれる軟組織 (心臓等)・骨・医療デバイス (ガイドワイヤ等) などの被写体をエネルギー情報に基づいて領域抽出する手法を構築することができた (図2)。また、画像へのビンニング処理 (隣接する画素間で画素値の加算処理) によって低 X 線量においての領域抽出の可能性も示唆された。

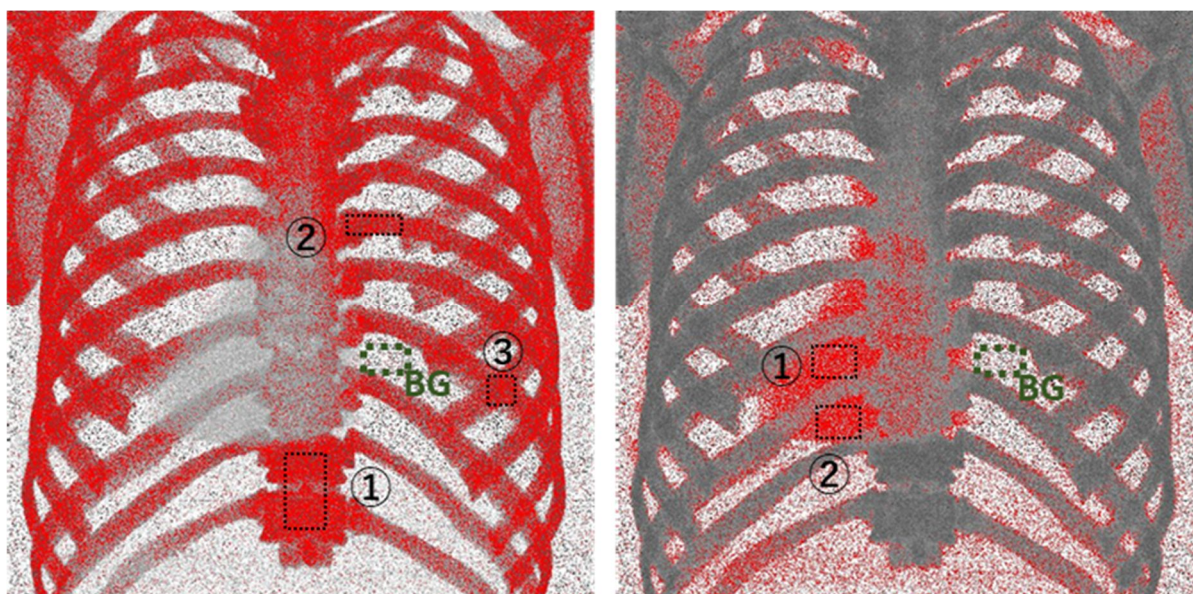


図2 X 線エネルギーに基づく疑似胸部 X 線画像上での領域抽出 (左: 骨、右: 軟組織)

(3) 上記 (2) のハードウェアからの情報に基づく物体特定に加えて、画像処理技術に基づくソフト的な特定技術の開発を行い、特にガイドワイヤ・カテーテル等のワイヤー状の医療デバイスについてのセグメンテーション (領域抽出) 技術の構築に成功した。このセグメンテーションでは深層学習モデルを活用している。医療分野の深層学習技術における共通のボトルネックは学習に必要なデータの入手であるが、これを臨床で得られた X 線 CT 画像 (3次元) と任意に編集可能なデバイスの構造・材質モデル (3次元) から効率的に作成する手法の構築に成功した。臨床 X 線 CT 画像は各種のデータベースで公開されているため入手性に優れている。また、デバイスモデルに関しては、既知である供給品の設計情報から任意の形状・素材のものを作成することができるほか、作成時の形状・位置情報に基づいて教師データ (ここでは、セグメンテーション結果の正解画像) を容易に取得することも可能である。これら 2 種類の 3 次元画像を合成後に 2 次元投影することで、X 線透視用セグメンテーションモデルのための教師付き疑似学習データセットが準備可能となる。

現在最も高性能を実現しているワイヤー状デバイスのセグメンテーションモデル用ネットワーク・PAR-NET を当該の疑似学習データを用いて学習させ、臨床の心臓カテーテル検査時のシネ画像に対してセグメンテーションを実施したところ、良好な結果を得ることができた (図3)。この結果は、様々なデバイスを含む動画像においてもリアルタイムなセグメンテーション結果を提供しことを示唆するものであり、本研究構想に係るシステムのみならず、現行の X 線透視

術においても応用性があるものと推測する。

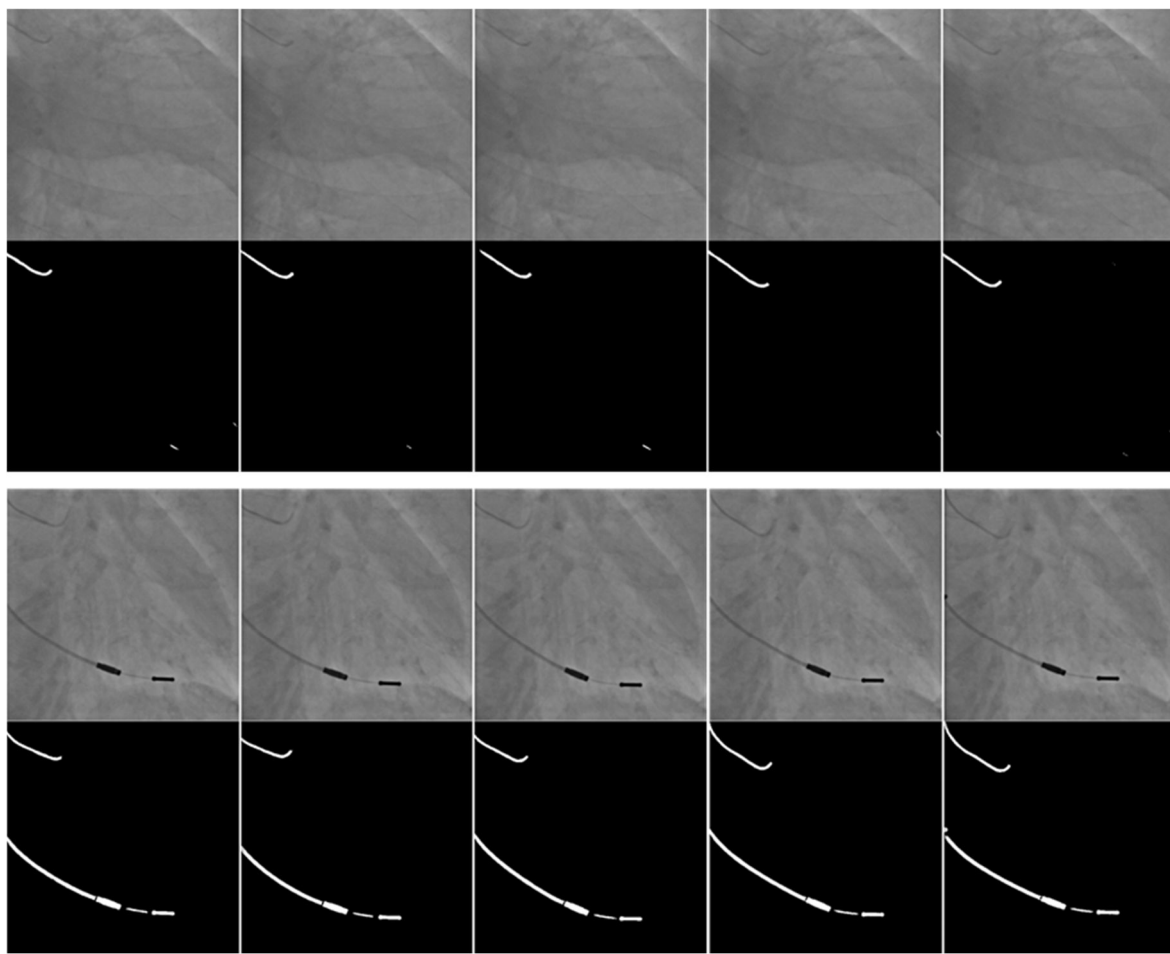


図3 疑似学習データセットで学習したモデルによるカテーテルセグメンテーションの結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 菊池洋平
2. 発表標題 コンプトン効果を利用した画像モダリティのための中性子番号半導体検出器の作製についての基礎検討
3. 学会等名 第61回 日本核医学会学術総会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hiyama, Y. Kikuchi, M. Horiuchi, R. Okabe, H. Watabe, S. Matsuyama
2. 発表標題 Fundamental Research on Object Specification in X-ray Fluoroscopic Images Based on Energy Resolving
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear science symposium/Medical imaging conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kikuchi, M. Horiuchi, R. Okabe, Y. Hiyama, M. Shidahara, S. Matsuyama
2. 発表標題 Rejection of coincidental noise events using multilayered semiconductor detectors
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear science symposium/Medical imaging conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池洋平
2. 発表標題 積層型半導体検出器を用いたイベント毎の散乱・偶発同時計数除去技術の検討
3. 学会等名 第59回日本核医学会学術総会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	小谷 光司 (Kotani Koji) (20250699)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授 (21401)	
研究分担者	千田 浩一 (Chida Koichi) (20323123)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	
研究分担者	志田原 美保 (Shidahara Miho) (20443070)	東北大学・工学研究科・講師 (11301)	
研究分担者	渡部 浩司 (Watabe Hiroshi) (40280820)	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授 (11301)	
研究分担者	狩川 大輔 (Karikawa Daisuke) (40436100)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	松原 佳亮 (Matsubara Keisuke) (40588430)	秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授 (21401)	
研究分担者	松山 成男 (Matsuyama Shigeo) (70219525)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

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
---------	---------