

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300035

研究課題名(和文) 3次元医療画像に対する時空間的な操作系の確立とがん自動診断への応用

研究課題名(英文) Construction of Spatio-Temporal Operations for 3D Medical Images and applications to Automatic Cancer Detections

研究代表者

有澤 博 (ARISAWA, HIROSHI)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号：10092636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円、(間接経費) 4,680,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はCT、PET、MRI等の医療画像機器が作成する3次元画像を用いた医師の画像診断を支援するシステムを構築し、特にその操作系を確立することである。その際PETとCT等複数種類の画像間で重畳や差分、あるいは時間変化など、医師の直感と同様に自由に組み合わせられるようにし、さらにがん診断特有の画像関数(臓器の輪郭抽出、陽性判定など)によりがん診断の全過程を実現した。本研究では自動診断アルゴリズムを記述する操作言語MDPLを開発し、実際の症例による診断をデータベース化した。その結果ほぼ全身からがんを疑う異常領域を抽出でき、有効性を検証出来た。今後がん診断支援システムを実用化してゆきたい。

研究成果の概要(英文)：This research aims to construct a Computer Assisted Diagnosing System using 3D Medical Images provided by modality devices like CT, PET or MRI, and to establish the image processing operations. In the system, users can make arbitrary combinations of various operators like "Overlapping", "Difference" or "Change over Time" which are useful for Medical Doctors (Radiologists). Furthermore the system provides special functions for cancer diagnosis like "Extraction of 3D outline of Organs" or "Judgment of abnormality" on each organ. As a result, whole process of cancer detection from whole body is realized. In the research we proposed an Algorithm Description Language MDPL and the Interpreter on a computer. Using this system we store a number of real samples of diagnosis. The effectiveness have been shown because almost all abnormalities from whole body can be detected using CAD. We consider to apply this method widely to real medical application field in the next step.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：PET-CT画像診断 医療診断DB データベース マルチメディア

## 1. 研究開始当初の背景

現在の日本でがんは成人の3大死因のひとつと言われ、高齢化社会を迎えてその対策は必須である。最近、PET(Positron Emission Tomography、陽電子放射断層撮影)ががんを数ミリオーダーの早期の段階から発見できることや、がん腫瘍の悪性・良性の判別が可能なることから、非常に有効な診断法として注目されているが、一方で見落としがなく異常箇所を拾うには高度な読影技術が必要と言われている。医療画像にはPETのほか、CT(Computed Tomography)、MRI(Magnetic Resonance Imaging)、超音波画像診断(エコー)などが知られており、さらに造影剤の投与による時間軸方向の変化を加えると、爆発的に大きい多種多様な情報が得られることになる。これらを総合的に用いれば診断精度は格段に上がるが、巨大な情報の中からの確に異常箇所を探索・指摘するためには、高度の画像処理技術に加え、医師側にもこれを読み解く高い熟達度が求められている。

このような状況下、医療画像診断におけるコンピュータ支援(CAD: Computer Aided Diagnosis)はいまや必須の技術となっており、様々なビューワ(医療画像の3次元可視化ソフト)が開発・提供されている。しかし、コンピュータ・アルゴリズムによるがん発見、いわゆる**自動診断システムの研究開発**はいまだ未成熟な段階にある。医療における自動診断は古くはMUMPSに始まり種々試みられて来たが、人体という対象の複雑さ、判断する側(医者)のロジックの手順の不確定さ、および検証の困難さから、難渋してきた。最近の医療診断の現場は多種多様な検査データに加え、レントゲン、CT、PET、MRI、エコーなど多くのモダリティー(医学情報の提供源)があり、医師は検査手法の選択、画像データの解釈を通して病巣の発見・特定や重度の判断を行わなければならない。そのため特定の異常を画像処理技術によって抽出する研究が毎年北米放射線医学会(RSNA)の特別セッションで発表・討論されたり、医療機器メーカーからも医療画像ビューワの一機能として提供されたりしている。日本においても毎年PET診断に関わる読影医が集う『PETサマーセミナー』ではモダリティーの選択や読影基準の共通化について盛んに議論が行われている。しかし今までのところCADを有効に使った診断手法の確立はなされておらず、医師の負担増や読影技術の普及(専門医の不足)が大きな問題となっている。

申請者のグループは2003年以来8年にわたって横浜市立大学医学部附属病院放射線科および厚地記念クリニックPET画像診断センター(鹿児島)ほかのご協力を得て「PET-CT

画像によるがん自動診断システム」の研究開発を進めてきた。この間、科学研究費補助金(基盤研究(A)「全身PET-CT画像を用いた詳細人体モデル及びデータベース構築と自動診断への応用」2004~2006年度、研究代表者:有澤博)およびその準備段階として科学研究費補助金(基盤研究(B)展開「精密人体モデルに基づく人体形状/動作データベースの形成と医学応用」2000~2002年度、研究代表者:有澤博)の支援を得て、PETとCTを用いた個別人体内部(臓器等)の認識・モデル化の理論的手法と、がん等異常部位の発見のアルゴリズムを研究してきた。

その結果、全身PET画像を用い、CTを補助情報として、画像解析によって主要な臓器位置の把握と、がんの可能性のあるFDG集積を指摘できるアルゴリズムが完成し、200症例ほどの臨床データにおける検定で99.6%の再現率で異常箇所を指摘できたが、過剰指摘も多く適合率は15%ほどに留まった。しかし研究の過程で医師がふだん無意識に行っている輪郭認識や陽性判定において、3次元画像処理アルゴリズムとしてはどんな手法によって実現できるのかが明らかになり、その成果はRSNA、BIOSTEC(Biomedical Eng. System)等に発表されて一定の評価を得ている。

以上の研究成果を踏まえ、今回の申請においては「PET-CT画像による自動診断」に特化するのではなく、MRIの各種画像(T1,T2,Difusion等)に加え、造影剤による時間的な変化も合わせて、さまざまの3次元画像を任意に組み合わせ、的確に設計された各種の画像演算を自由(ad hoc)に組み合わせ適用して可視化できるシステムの作成に思い至った。この操作を情報技術者のアシストの下に医師自身が行うことによって医師の直観をより詳細にアルゴリズム化できるのではないかと考えた。たとえば最近、ある種の造影剤が腫瘍など特定領域に一定時間だけ集積し拡散する現象が知られてきたが、この個々の時間的な変化を1つの空間に集約(射影)することができれば診断に有効な情報が得られると思われるが、このようなある意味「思いつき」の3次元+時間軸の空間における画像操作を自由に行うことは既成品の画像ビューワなどでは到底できない。本研究では演算系の設計とともに診断のアルゴリズム化のための言語を含む枠組みを提案作成する。

## 2. 研究の目的

CT、PET、MRI等の医療画像機器が生成する3次元画像による医師の画像診断を支援する操作系を構築する。その際PETとCT等複数種の画像(モダリティー)間で重ね合わせや

差分、あるいは造影剤投与時の時間変化（微分）画像などを医師の直観により自由に組み合わせ、最終的な可視化ができるようにする。さらに申請者グループが開発したがん診断に用いる画像関数（個別臓器の輪郭抽出、陽性判定など）を提供し、経験豊かな読影専門医と協力してがん自動診断の全過程を一連の画像操作として実現させる。さらに診断アルゴリズムを制御構造や中間結果の記憶等を伴って記述できるような言語にまとめ、実際の臨床データ（症例）に基づくさまざまな診断事例をデータベース化する。最後に臨床機関の協力のもとに多くの治験データとつぎあわせ、自動診断アルゴリズムの改良により実用域のシステムに近づける。

本研究の期間内に何をどこまで明らかにしようとするかを整理すると次の7点に要約される。

PET、CT、MRI、超音波エコーなどから得られる医療画像（DICOM形式とよばれるデータ）から、専門医師（読影医）が行っている3次元領域（臓器、患部）認識、およびがんなど異常部位を判断する**ロジックの習得**（レクチャーおよび実地指導による）。造影剤による効果も含む。

医師が診断で行っている**3次元画像演算の設計**。重畳、差分、射影、画像フィルタなど。コンピュータ上で行わせる**診断アルゴリズムとしての記述**（次項の記述言語により作成）

**演算・診断基盤の作成** - - 読影医が行う認識や判断をアルゴリズムとして記述するためのアルゴリズム記述言語の設計、およびその記述言語を解釈して走る診断エンジンの完成。

**複数モダリティー対応のDICOM画像ビューワの作成** - - 医師が自由に演算やフィルタを組み合わせた結果を表示できるビューワの作成。複数モダリティーの画像に対し元画像および演算結果（例えば造影前後の差分）の表示。診断領域へのアノテーション（注釈）の付与。

医師によるがん診断結果および自動診断プログラムによる**診断アルゴリズムと診断結果を共有化するためのデータベースの構築** - - モダリティーごとの原画像（DICOM画像）、画像間の位置あわせ情報（PET、CT、MRI各検査の画像間の位置あわせなど）、3次元領域につけられたアノテーション、造影剤などによる時間をまたいだ画像間の対応付け情報などを蓄積

上記の診断アルゴリズムの蓄積により**がん自動診断システムの作成**（異常領域の発見とアノテーション付け）を行い、協力いただける大学病院、がんセンター、検診センタ

ーなどで検定を行う。さらに医師の意見を取り入れて改良を行って実用レベルの試作システムを完成する。

以上のように研究期間内に医師が自由に演算を組み合わせ、診断時の着想を生かせるシステムを作ると同時に自動診断（診断支援）システムを構築し、検証・改良を行って実用領域に達する。

本研究の特色は、最近の医療機器から生成される膨大な3次元画像データに対し医師に演算操作が自由にできるビューワを与え、情報技術者と協力して診断ロジックを試行錯誤的にルール化していくことにより、**診断エキスパートシステムの構築**を行う点にある。そのバックグラウンドとして自由な画像処理の中間結果の可視化器であるビューワ、および診断アルゴリズム（演算やフィルタの逐次/並列実行）の記述・実行・データベース化を担当するプラットフォームを創る。これにより、医師から見ても「もう一人の医師」あるいは「セカンドオピニオン」として信用の得られる自動診断システムが最終的に供給できることに大きな意義がある。この成果をすでに実績のある国内および海外の協力研究機関を通じて新しい医療と情報の連携手法として発信したい。

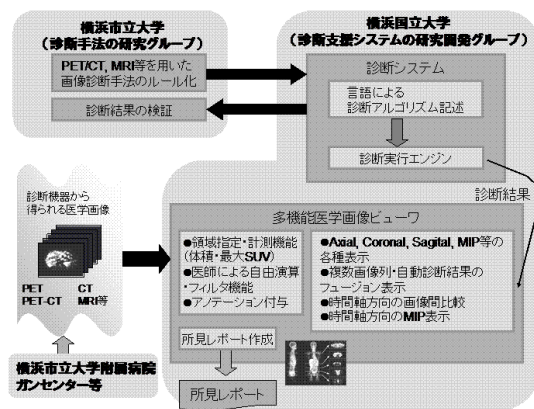
### 3. 研究の方法

研究の全体像として、研究パートナーである横浜市立大学医学部放射線医学教室との役割分担のもと、診断手法の確立とプラットフォーム構築を二つのグループに分けて行う。この中でまず

- 医師による異常部位（がん）発見手法を3次元画像操作として明確にアルゴリズム化する。
- 医師による臓器領域認識、異常集積認識の基準となる画像関数（造影前後の差分を取る、領域抽出時に周囲状況によって動的に基準を変える等）を症例に基づく検証により精度高く作る。

を行い、次いで上記の「操作」や「関数」を自由に組み合わせ実行・表示できるプラットフォームを作成する。これら演算の実行順序を記述できる MDPL と呼ばれる言語の実行器を作り、診断アルゴリズムの実行結果をビューワで表示する。これを基にさまざまながん症例に対して有効な自動診断システムを作り、協力していただける病院等で検定とアルゴリズムの改良を行う。

本研究は横浜国立大学の**診断支援プラットフォーム研究班**と、横浜市立大学の放射線医学及び医療情報処理研究者による**診断手法研究班**の緊密な連携によって実施される。



(1)初年度においては、研究の基盤を整備するため、次の研究と開発を行う。

全身PET、CT、およびMRIによって得られる人体画像群は、人体主要部の1mほどの部分を300枚程度（3mm間隔）に分けた横断面画像群であり、モダリティーごとに次のような特徴を持つ。

PET：FDG と呼ばれる放射性物質の集積像。がんなど糖代謝の激しい場所が強く写る。

CT： X線透過データとTomography理論に基づいた固体組織の横断面画像。

MRI： 核磁気共鳴データとTomography理論に基づいた水分を多く含む組織の横断面画像。

上記で造影剤またはDelayed Scan を使う場合の効果：

MRI 画像においては、ある種の造影剤を使うと腫瘍など特定の部位に一時的に集積し、その後拡散することが知られ、また PET における FDG 集積も、がんではない領域に一時的に集積することがあるが十数分後に Delayed Scan と呼ばれる画像をとれば消滅している（がんの領域では集積はむしろ強くなる）ことが知られている。これらの画像が常時有効に使われていないのは、画像が2倍になることからくる医師の負担増、Delayed Scan の場合、1 回目の撮影後に医師がすかさず読影して2 回目を行うかどうかの判断が必要等、運用上の困難を伴うからである。

上記から各種のモダリティー画像や時間をずらした画像などを自由に組みあわせ、差分や重畳（フュージョン）などの演算を行うことにより先進的な読影医にとって多くの新しい知見が得られる可能性があることがわかる。もちろんそのためにはゆがみ補正、正確な位置合わせ、3次元ボリュームポリゴン変換表示、各種画像フィルタなど多くの補助手段や機能を提供しなければならない。そこでこれらを含む画像処理プラットフォームを設計し、システムとして完成させるのが初年度の目標である。（現在このような自由な演算ができるシステムは存在しない。）予定されている演算及び関数としては次のもの

が挙げられる。

3次元空間間の重畳（フュージョン）、差分（造影前と後の差、FDG集積始めとDelayed の差）射影（Maximum Intension Projection, MIP）、時間軸方向MIP（時間変化有の箇所を集約）、3次元画像フィルタ（一般的なもの）、個別臓器領域抽出フィルタ（3次元マスク生成）

横浜国立大学附属病院、市内の大手がん検診センター（医療法人ゆうあい会「ゆうあいクリニック」を予定）および国内でトップクラスのがん診療拠点（横浜国立大学附属病院、鹿児島厚地記念クリニックPET画像診断センターを予定）でヒアリングを重ね、複数のモダリティーを統合して診断する手法について、インタビューし確認する。（モダリティー統合診断については医師の間でも確定していない部分もあるため、議論もしてもらう。）

上記ヒアリングの結果を踏まえ、かつ提供した演算・関数も駆使して診断アルゴリズムを記述する。アルゴリズム記述言語としては、全探索型推論言語 MDPL の仕様を確定済みである。

診断データベース構築について準備を進める。一般に画像診断にまつわる情報として、

患者 (patient) -> 検査 (study) -> シリーズ画像 (series)

【-> は集合間の1:n 対応】

の形の階層型で繰り返し値を含む構造を持っていることが知られている。本研究における「診断」とは、個々の「検査」の実例 (instance) に対し、シリーズ画像を参照しつつ演算・関数を適用して「診断結果」(着目領域に対するアノテーション) を生成することである。またそれらを統一的形式で表現・蓄積し、診断結果データベースを作成する。

(2)初年度にFDG-PET画像とMRIの拡散強調画像等を中心に異常部位を抽出する道具（演算・関数の品ぞろえ）が整うので、これを受けて2年目においては、トータルな診断アルゴリズムの作成と診断精度の向上に努める。初年度において複数の異常発見手法が全探索型言語 MDPL (Medical Diagnosis Programming Language) により作成されているので、これらを個々の症例に対して有効性、問題点を検証する。MDPLはECAルールに基づく3次元画像操作が可能で、各操作においてNEOと呼ばれる木構造のどこかのノード以下（ランクと呼ぶ）のデータを引数として別のノード下に新しいデータを付け加えることが可能である。基本的には次の形式のステートメントから成る。neo->(実行条件) update(基準ランク, 新規作成ランク, 関数名(関数が参照するランク...));(「関数が参照するランク」は基準ラン

クからの相対位置で書かれる)

MDPL の実行結果は元データとすべての異常箇所を指摘した大きな木になるが、一方、木の生成の途中段階の全てで操作と結果がトレースできることが特徴である。従って診断ロジックの局所的な検証や修正が容易に行える。

連携協力者の読影医師(南本亮吾・国立国際医療研究センター)は診断システムが行っている個々のステップにおける画像処理の効果を確認できるので、新しい演算・関数の組み込みや修正を通して診断の精度・信頼性を向上させる。これをもとに、症例ごとの診断精度検定と医師とのインタビュー、それに伴う改良を続ける。同時に、アルゴリズム記述言語において、各段階の診断の根拠情報を出力させるよう拡張することを目論む(たとえば「左肺」という臓器領域の抽出結果を画像ビューワ上に出力し、『全体的に基準以下の集積しか見られないので正常、上辺にやや強い集積があるが肺門によると見られ、異常ではないと判断』というような日本語コメント付与する。)

具体的な研究項目

自動診断実行基盤を完成し、ビューワと連動させ製品を完成させる。

医師は画像全体から臓器を抽出し、各臓器において PET の FDG 異常集積(各臓器ごとに異常値は異なる)CT, MRI による形態(形状)異常を認識している。診断システムもこれと同じ手順で異常を発見しているが、医師の評価は症例によって分類されるためデータベースを構築する。

がん等の異常部位発見のためには、画像上で背景に比べて本来より濃い影(PETで言えばSUV値の増大)を見つけることだが、臓器ごとや、周囲条件によりその判断値は異なる。申請者のグループは既にこの部分に対応できるよう、動的基準値調整法(DTA-Dynamic Threshold Adjustment, 2009 RSNAに採択)を提案し、一定の成果を得ているが、これを全臓器領域の同定にも拡張し、さらに基準値変更のため参照する他の部位(小脳など)の値も多様化することにより、より強固な判断が出来るように改善する。MRIの拡散強調画像にもこの適用を試みる。造影剤投与前、1~2分後、5分後、15分後のそれぞれとの差分を用いて同じくDTA法を用いて異常領域抽出を試みる。

(3)

3年目においては前年度で診断システムのプロトタイプがデータベースへの十分な充足を除き完成するので、実際の臨床現場での試用を中心に、いろいろな環境・機材に対応したアルゴリズムの汎用化、改良と症例別のデータベースの充足化および症例検索システムの

構築も行う。

国内6箇所程度の施設の臨床研究者にお願いして自動診断機能付ビューワの試作システムを使用していただき、精度の検定を行う。PET, CT, MRI は、海外3社(GE, SIEMENS, PHILIPS)国内2社(東芝, 島津)をカバーし、相互比較ができるような補正手段と共通データ基準を作成する。

検定については後ろ向き検定(retrospective: 確定診断つきの所見に対して、自動診断システムがどれくらい正しく言い当てるかの検定)と前向き検定(prospective: 確定診断の出る前に医師の診断と自動診断の結果を出しておき、半年以上の経過観察期間後に診断的中率を検定)

を行う。症例収集は本研究の初年度から継続的にお願いし、1施設でそれぞれ100~200例ずつ、本研究の最後までに1500例(PET-CT1000例、MRI 500例)程度にまで拡大することを目論む。

一応の成果がそろった段階で、放射線医学と情報科学の研究者、及び関連する分野の方に参加いただいて、討論会を開催する。

上記製品の臨床現場での利用を促すには、第三者の臨床研究機関による臨床試験が必須である。本申請者が認められ平成23年度に研究が始まれば、横浜市立大学附属病院の他、厚地記念クリニック、群馬県立がんセンター等のご協力を得て臨床レベルの試験(プロスペクティブスタディー)への道筋をつけたい。プロトコルについては研究分担者である井上教授(横浜市立大学)が厚生労働省科学研究費の「先端医療機器-PET班」として設計することになっており、評価の一部もこのグループ内で行う。

最後に、それまでの成果に応じて国内外医療機関との討論を行う。特に放射線医学においては優れた実績を持つ米国テキサス州立大学MDアンダーソン研究所から講師をお招きし、本研究アクティビティを含めて自動診断システムについての評価、討論を行いたい。

#### 4. 研究成果

本研究の目的はCT, PET, MRI等の医療画像機器が作成する3次元画像を用いた医師の画像診断を支援するシステムを構築し、特にその操作系を確立することである。その際PETとCT等複数種類の画像間で重畳や差分、あるいは時間変化など、医師の直感と同様に自由に組み合わせられるようにし、さらにはがん診断特有の画像関数(臓器の輪郭抽出、陽性判定等)によりがん診断の全過程を実現できた。研究はほぼ計画通りに推移し、特にMRI画像については、群馬県立がんセンターのご

協力のもと、T1 画像と DWI 画像を組み合わせてることによって乳がん領域の精度の高い検出ができると同時に、非浸潤性（良性）、浸潤性（悪性）の判別が可能であることが示され自動診断における大きな可能性が拓けた。本研究では自動診断アルゴリズムを記述する操作言語 MDPL を開発したが、この言語の実行時ルーチンとして、当初予定していた多くの画像オペレータを実現した。特に時間差分を画像化するオペレータは読影医からその有効性が期待されているが、多数症例による実証までには至らなかった。また診断結果については実際の症例による診断を 100 例ほどデータベース化した。その結果ほぼ全身からがんを疑う異常領域を抽出でき、有効性を検証出来た。しかし胸郭周りが他所より成績が良いなど、体全体の中で得意、不得意が残り今後の改良が必要である。

なお、MD アンダーソン研究所から講師をお招きし、自動診断システムについての評価を計画したが先方の都合もあり実現できなかった。しかし、中国核医学会との連携により今後日中共同でがん診断支援システムを検証・実用化してゆくことが確約され、2013 年 12 月に第 1 回日中合同ワークショップを中国上海で開催することができた。

今後に残された課題は多いが、国内外から本研究への期待は高く、研究の継続・発展が重要であると感じられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Rui Zhang, Takako Sato, Hiroshi Arisawa  
“Computer Aided Diagnosis System of Brain Tumors in PET/CT images”  
システム制御情報学会論文誌 28 巻、2014  
<http://www.jstage.jst.go.jp/browse/iscie/-char/ja/> (査読有)

Akemi Nomura, Yasuko Ando, Tomohiro Yano, Yosuke Takami, Shoichiro Ito, Takako Sato, Akinobu Nemoto, Hiroshi Arisawa  
“Development of a Motion Capturing and Load Analyzing System for Caregivers Aiding a Patient to Sit Upright in Bed”  
Signal and Image Analysis for Biomedical and Life Sciences, Springer, 2014, pp.1-15,  
<http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4825014>, (査読有)

Michael Gayhart, Hiroshi Arisawa  
“Automatic Detction of Heathy and Diseased Aorta from Images Obtained by Contrast Enhanced CT Scan”, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 107871.V2 2013 p1-8,  
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/107871>  
(査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

Akemi Nomura, Takako Sato, Tomohiro Yano, Yosuke Takami, Shoichiro Ito, Yasuko Ando, Akinobu Nemoto, Hiroshi Arisawa  
“DEVELOPMENT OF A MOTIONCAPTUR SYSTEM FOR MEASURING HIDDEN POINTS ON A HUMANBODY AND ITS APPLICATION TO THE EVALUATION OF CARE OPERATION”2014 International Symposium on Flexible Automation, Awaji-Island, pp.1-6, Hyogo, Japan, July 14-16, 2014. (to appear)

Akemi Nomura, Takako Sato, Tomohiro Yano, Yosuke Takami, Shoichiro Ito, Yasuko Ando, Akinobu Nemoto, Hiroshi Arisawa  
“Development of a Motion Capture System for Measuring Hidden Points on a Human Model and Its Application to Aiding a Patient to Sit” Proceedings of International Symposium on Computational Models for Life Sciences (CMLS-13), 27-29 November 2013, Sydney, Australia

Rui Zhang, Takako Sato and Hiroshi Arisawa  
“Symmetry Recognition using Mid-Sagittal Plane Extraction and Tilt Correction in 3D Head images” Proceedings of International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration (SICE 2013), 14-17 September, Nagoya, Japan

Michael Gayhart, Hiroshi Arisawa, Keisuke Yoshida, Momoko Okasaki, Tomio Inoue  
“Automated Segmentation of the Aortic Artery: Evaluation of Images Obtained by Contrast Enhanced CT Scan” International Conference of Information Science and Computer Applications (ICISCA2012), 19-20 November 2012, Bali Indonesia,

Michael Gayhart, Hiroshi Arisawa  
“Automated Segmentation of the Aortic Artery: Evaluation of Images Obtained by Triple Rulu-Out Protocol” CISP-BMEI, 15-17 October 2011, Shanghai China

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

有澤 博 (ARISAWA, Hiroshi)  
横浜国立大学・環境情報研究院・教授  
研究者番号：10092636

### (2) 研究分担者

富井 尚志 (TOMII, Takashi)  
横浜国立大学・環境情報研究院・准教授  
研究者番号：40313473