

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K02762

研究課題名(和文) 触る感覚と症例を関連付けて学ぶことができるVR医療触診教育訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of a VR palpation education system to learn by associating with the sense of palpation and medical cases

研究代表者

利光 和彦 (Toshimitsu, Kazuhiko)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：10180150

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)：独自に開発した触診インターフェースシステム，粒子法に基づく大変形計算プログラムおよびPCで構成されるVR触診システムの構築を行った．このシステムは，埋め込んだしこりの硬さを流体制御により任意に可変することができる．さらに，実触診指の触診感覚を損なうことなく触診圧を検出でき，かつ触診指の位置は画面内VR患部モデルに表示できる．
数値計算では，2つの症例(リンパ節腫瘍，乳がん)に対応して，弾性係数の線形変化効果を組み込んだ粒子法解析コードを作成した．リンパ節腫瘍を模擬する直方体モデルと乳がんを模擬する半楕円体モデルの大変形において，計算精度は大幅に向上し，実験値とはほぼ一致する計算が可能となった．

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国の医学教育では，患者リスク回避や実習時間の制約で，医学生が体験的に触診技術を学ぶ機会が少なくなっている．これは，学生の実習経験を低下させるため，誤診などの危険が増すことが問題となる．この一助となるのがVR触診教育訓練システムである．本研究では，触圧インターフェースおよび症例対応型VRモデルを用いるVR触診教育システムを開発する．特徴は，大変形粒子法解析プログラムを開発・援用し，実際の触診指の触診感覚と症例を関連づけながら疑似体験的に学習できることである．この技術は，遠隔診療にも転用可能で，医師の負担軽減や医師不足の解決に役立つことが期待される．

研究成果の概要(英文)：A VR palpation system is improved with an original developed palpation interface system and a large deformation calculation program that is based on the particle method. This system can control the hardness of the embedded lump by a fluid control system. Furthermore, the palpation pressure can be detected without impairing the palpation sensation of the actual palpation finger, and the position of the palpation finger can be displayed on a VR model. For numerical calculations, particle method analysis codes with linear variation effect of elastic modulus are created for two medical cases - lymph node tumor and breast cancer. In large deformations of a cuboid model and a semi-ellipsoid model suppose that palpate a lymph node tumor and breast cancer, respectively. As the results, the numerical deformations agree with experimental ones. Hence, the calculation accuracies are improved.

研究分野：教育工学

キーワード：VR触診 計算医療工学 教育工学 生体大変形 非線形弾性 粒子法 医療シミュレータ MPS

1. 研究開始当初の背景

近年、病気の診断や手術のための訓練において、コンピュータを援用する技術が急速に進展している。特に、VR、AR、シミュレーションなどを医療に応用する研究（コンピュータ医療工学）が発展している。研究者らは、この分野に関係する図1(a)に示すVR触診教育訓練システムを構築した（略して「VR触診システム」と呼ぶ）。このシステムは、独自に開発した力覚提示インターフェース、粒子法に基づく大変形計算プログラムおよびPCで構成される。画面にVR患部モデルを表示し、力覚インターフェースの実際の指の動きに対応して画面内の仮想指が動き、VR患部モデルに対応する反力を得ることができる。開発したVR触診システムおよび生体変形解析プログラムは、触診をおこなう基本性能を満たすことを確認した。

しかし、このVR触診システムは、触診教育のための学習訓練システムとして、以下の点が課題としてあげられる。

- (1) 指の感覚を生かした実用機能が付与できていないこと
- (2) 粒子法による大変形計算プログラムの変形計算精度が十分でなく、生体材料に特有の非線形性を考慮した計算プログラムにより計算精度を向上させる必要があること
- (3) 手術を想定した患部（生体）切除の大変形切断シミュレーションを可能にすること

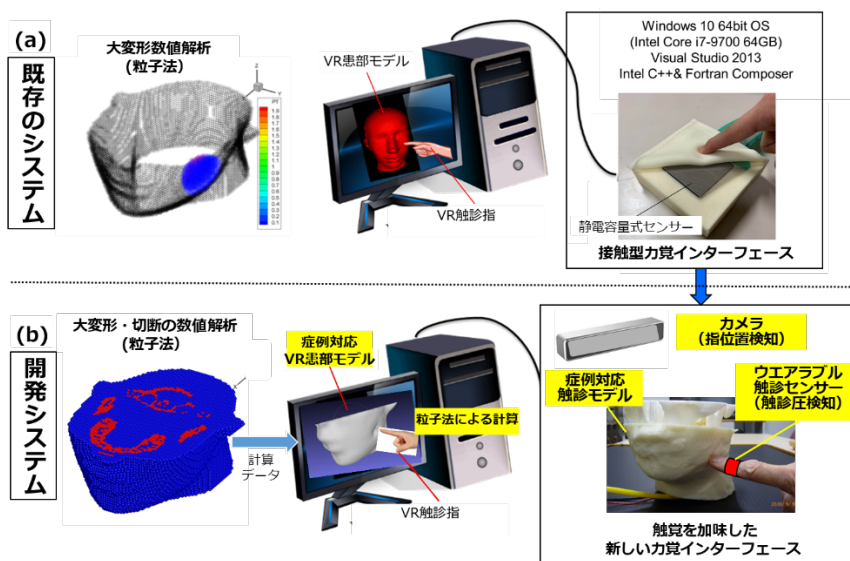


図1 VR触診教育訓練システムの概要 (a) 既存のシステム, (b) 開発システム

2. 研究の目的

- (1) 開発済みの力覚インターフェースは、薄型の静電容量式センサー組込方式であるが（図1(a)右で触診位置と触診圧を同時に検出できるもの）、実触診指と生体モデル間に薄膜のセンサーを挟む方式のため、力覚は得られるが指で感じる触診感覚に影響がでる。この点を改善するため、触った感触を触診指で直接感じることができる新しい触診（触覚）インターフェースシステムを構築すること
- (2) 粒子法に基づく生体モデルの弾性係数線形変化（応力-ひずみ2次近似）を考慮できる大変形計算プログラムを開発し、リンパ節腫瘍に対応する触診条件での変形精度の向上を図ること。さらに、乳がん触診に対応するため、乳房を単純モデル化した計算モデルでの大変形計算精度の検討を行うこと
- (3) 大変形計算精度の検証後、術前シミュレーションを想定した、モデルの切断を考慮できる大変形計算プログラムを開発すること

3. 研究の方法

具体的な実施計画として、「新力覚（触圧）インターフェース」、「粒子法ベースの大変形計算プログラムの開発」「開発プログラムの精度等検討」について以下の研究を行った。

(1) 新力覚（触圧）インターフェースシステム

ウェアラブル触圧センサー（HapLog）およびwebカメラを用いて、OpenGLプログラミングによる新触圧インターフェースシステムを構築する。対象となる人工生体モデルは、2症例「耳下リンパ節腫瘍」、「乳がん」に対応するもので、前者症例に対しては、直方体人工生体モデルに空気圧で硬さが可変できる負圧可変剛性しこりが内在するものとする。

(2) 粒子法ベースの大変形計算プログラム

耳下リンパ節腫瘍の触診を対象として、直方体人工生体モデルに硬さや大きさが異なるしこりを埋め込み、指で押すシミュレーションを行う。これまでの結果の一例を図2に示す。実験と計算では0~5Nの押込に対して、最大2mmの差が生じていた。この点を改善するため、生体モデルの弾性係数線形変化（応力-ひずみ2次近似）を組み込んだプログラム開発を行う。

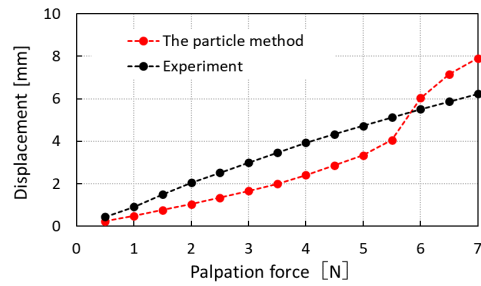


図2 過去の粒子法ベース解析プログラムによる大変形計算例^[1]

(3) 乳がん(乳房のしこりの触診)を対象として、まず基本形状モデル(半球と半楕円体)に対して、申請者が作成の粒子法プログラムに切断ができる改造を行う。さらに実際の非一様硬さ乳房モデル(乳腺組織を考慮)での「大変形」と「切断」の複合シミュレーションを行う。

4. 研究成果

(1) 新触圧インターフェースシステム

研究システムの全体構成を図3に示す。新触圧インターフェースシステムは、ユーザが任意のタイミングで内部しこり硬さを可変できるものとし、力触覚が感じられるVR触診システムの構築を行った。本システムは、①VR患部モデル、VR触診指を表示し、システムを制御するPC(図3中央)、②直方体生体モデル(内部に負圧可変剛性しこりを内在するArtificial bio tissue model, 図3右, 図4)、③ウェアラブル力触覚センサー(HapLog, (株) テック技販)、④負圧可変剛性しこりを制御する空気圧制御システム(図5)で構成される。主な成果について構成要素ごとに以下で説明する。

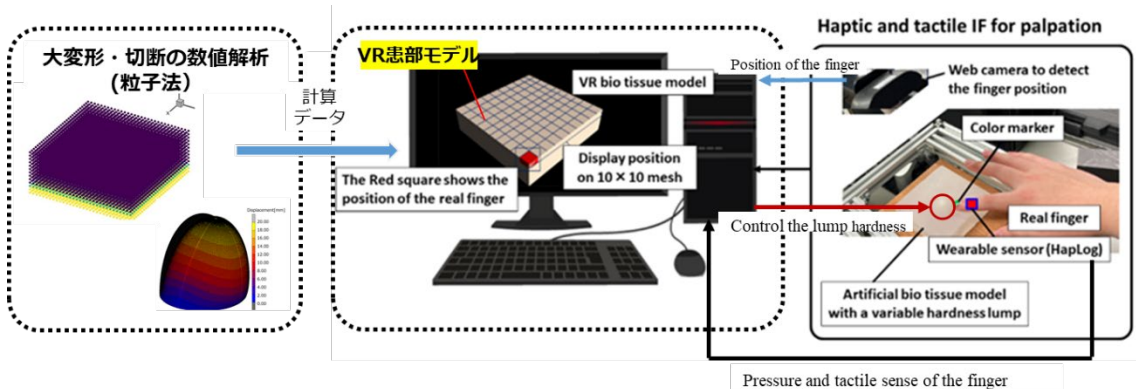


図3 VR触診システムの全体図

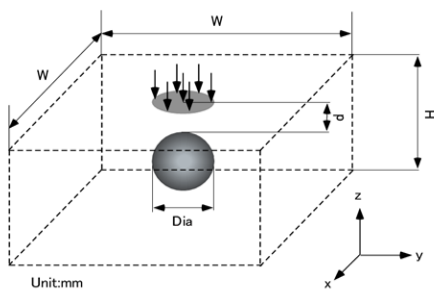


図4 直方体人工生体モデルの模式図

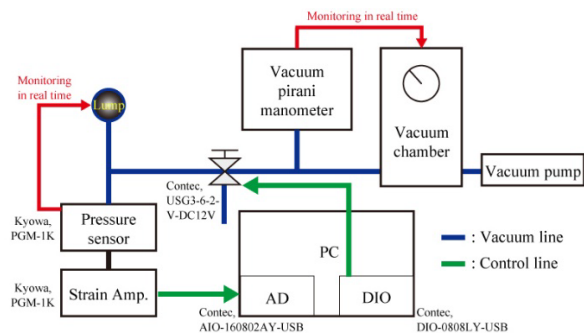


図5 負圧可変剛性しこりを制御する空気圧制御システム

前述①のVR表示システムは、図3右の触診指(カラーマーカ)をwebカメラで撮影し、OpenGLパターン認識プログラムで位置認識し、図3中央のモデル上の赤色で位置表示する(詳細は省略)。

前述②の患部しこりを人工生体モデルで実現するためには、負圧可変剛性しこりの硬さが触診に対応することが必要となる。表1に示す3種類の負圧可変剛性しこりを試作した(直径Diaは約14mm)。その結果、Cが触診に適するものとなり、製作に成功した。なお、負圧可変剛性しこりとはゴム状の袋に微小粒子(クッションのビーズ)を詰め、負圧することで、粒子間の摩擦が大

きくなり硬化するもので、メリットとしては、圧力を加える方式に比べて破裂の危険が無く安全に任意の形で硬化させることができる。その硬化のイメージを図6に示す。

図7に、負圧しこりA, Cの押込力と変形量の結果を示す(しこりBの図は紙面の都合で未掲載)。しこりCはしこりA, Bに比べて、負圧なしと5kPa負圧時において、人肌しこりに対して大きな変形量の差がある、このことは、無負圧ではしこりが無く、5kPaでは人肌しこり(Biological Tissue lump)と同じ変位量でしこりを感じさせることができる。負圧しこりAとBは非負圧時と負圧時の変形量の差が小さく、全てしこりありの感触となる。また、しこりの硬度を再現することについては、5kPaの負圧が適する。したがって、負圧しこりCは、3種類の中で触診に適したしこりであると言える。なお、4~5Nの範囲で、人肌しこりと若干変形量が異なる。これは、負圧しこりCが伸縮性の高いゴム袋を使用しているため、指で押した際に横方向へ内部粒子が広がったことが原因である。実際は、しこりが生体モデルに内在し、しこりの周囲には正常組織があるため広がりや抑制され、変形量は人肌しこりと同じ程度になり、特に問題とはならないと考えられる。

表1 試作した負圧可変剛性しこりモデル

	人肌しこり	負圧しこりA	負圧しこりB	負圧しこりC
素材	超軟質ウレタン樹脂	表面:天然ゴム 裏面:綿パイル		天然ゴム
直径	14 mm			
伸縮性		低		高
ゴム袋の厚さ		0.8 mm		0.03 mm
粒子詰込み度合		80 %	100 %	

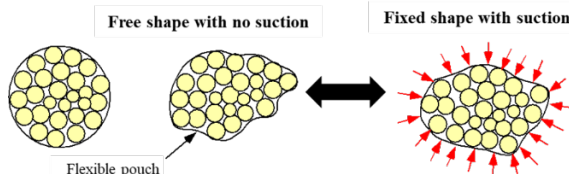


図6 負圧可変剛性しこりの硬化イメージ

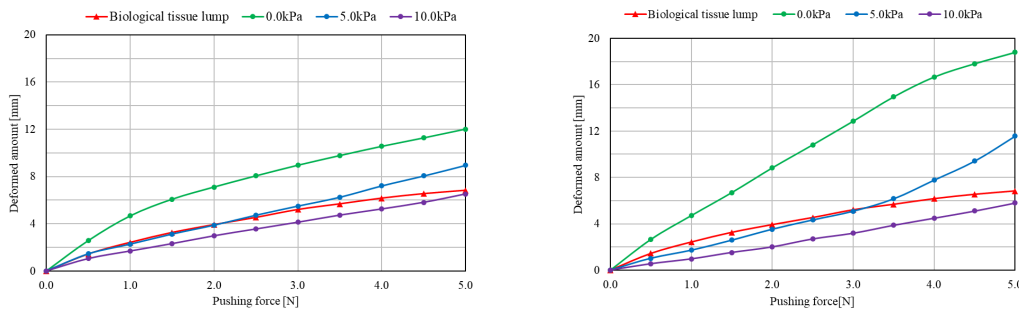


図7 負圧しこりCでの押込力と変形量の関係 (左:しこりA, 右:しこりC)

次に、ウェアラブル力触覚センサーHapLogのしこりの検出適用性について検討するため、硬さ可変しこりを埋め込んだ人工生体モデルを用いて、指で押込んだときの押込力を測定する。しこりは直径約19mmで、負圧をかけた硬化しこりの縦弾性係数は $E=3.02 \times 10^5 \text{ Pa}$ である。リンパ節腫瘍の縦弾性係数は $10^4 \sim 10^5 \text{ Pa}$ オーダーであることから、試作した硬さ可変しこりは同オーダーであり、腫瘍硬さをほぼ再現できている。図8に、直方体生体モデルに内在させ触圧センサーHapLogを用いて、生体モデルを指で押込んだときの押込力を示す。左が負圧あり(しこりの硬化あり)、右が負圧なし(しこりの硬化なし)である。負圧なしでは、位置にかかわらず約2Nである。一方、負圧ありでは、しこり真上(青)、境界(橙)、しこりなし(緑)の位置で、約5N、3.5N、2Nの違いが検出できる。これに対応して、実際に触診者は、しこり真上(5N)、境界(3.5N)でしこりを感じることができた。したがって、HapLogの測定できる力で「しこりの有無」を判別でき、同時に指で直接的にしこりを感じる触診感覚と一致することが確認できた。以上から、HapLogは本触診システムのセンサーとして十分に使用できることを確認した。

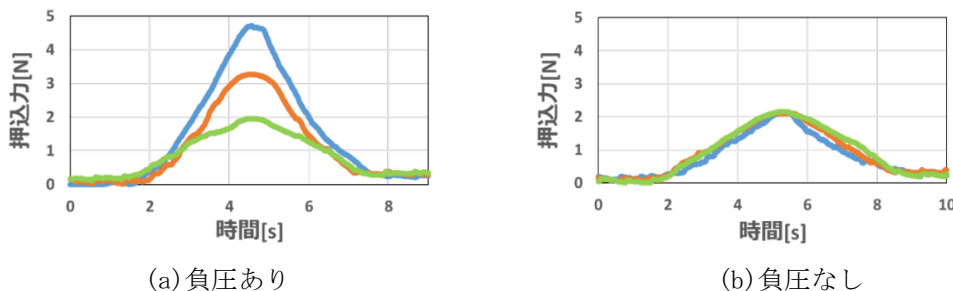


図8 しこりが内在する人工生体モデルを指で押込んだときの押込力と押込位置の関係

(2) 粒子法大変形解析プログラムの開発

数値計算では、2つの症例（リンパ節腫瘍、乳がん）に対応する解析モデルを用いて解析を行った。リンパ節腫瘍に関する解析は、3種の人工生体モデル（ α 、 β 、 γ モデル）を作成し、種々条件を変えて解析を行った。紙面の都合で詳細は省略し、課題であった変形精度の向上についてのみ述べる。実験および解析モデルは形状が図4、特性が表2、図9の直方体モデルで、実験値と計算値を比較した。その結果、図10に示すように、生体の正常組織の弾性係数線形変化（応力一ひずみ2次近似）を考慮した計算は、弾性係数を一定値とする計算に比べて大幅に計算精度が向上し、実験値とほぼ一致する計算が可能となった。

表2 α モデルの組織特性と形状

生体組織密度	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
ポアソン比	$\nu = 0.45$
直方体モデルの大きさ	W = 60mm H = 20mm
触診面の直径	15mm
しこりの縦弾性係数・形状・位置	$E = 2.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ Dia = 10 mm d = 3 mm

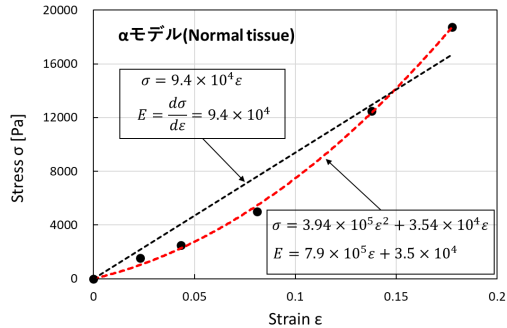


図9 α モデルの正常組織の応力一ひずみ線図（線形近似，2次近似）と縦弾性係数

一方、乳がんに対する計算は、乳房が大きく変形する軟組織生体であるため、重力による大変形に対する精度の検討を行った。超軟質ウレタン樹脂を用いた生体モデル（図11の半楕円体， $D = 10\text{cm}$ ， $H = 10\text{cm}$ ， $D_i = 0\text{cm}$ ）で、実験、非線形FEM解析（Marc），本粒子法解析の結果を図12に示す。片側支持でのy方向重力による半楕円体頂点の変位は、実験値が19.2mm，Marcが18.62mm，本粒子法が20.33mmで、実験値との差はそれぞれMarcが0.58mm，本粒子法が1.13mmである。図12から、実験値，Marc，本粒子法は良く一致し、本粒子法の計算は大変形に対しても十分な精度で計算できることを確認した。

このほか、乳房脂肪と乳腺硬さの違いを考慮した非一様線形変化弾性係数モデルとして二重半楕円体モデルとし（ $D = 10\text{cm}$ ， $H = 14\text{cm}$ ， $D_i = 2\text{cm}$ ， $H_i = 4\text{cm}$ ，外側線形 $E \approx 1.09 \times 10^4$ ，非線形 $E \approx 1.60 \times 10^5 \epsilon + 5984$ 。内側の乳腺組織を模擬した線形 $E \approx 1.65 \times 10^4$ ，非線形 $E \approx 5.45 \times 10^5 + 5798$ ），変形を前述モデルより大きくしたもの）についても実験と計算で比較し、約20%誤差で変形計算が可能であることを確認した。

最後に、図13に示す切断モデルでy方向重力による変形実験と解析を行った。モデルは $D = 7.2\text{cm}$ ， $H = 10\text{cm}$ （ $D_i = H_i = 0\text{cm}$ ）の一樣硬さの半楕円形モデルに、 $y = 11\text{mm}$ 位置の $x-z$ 平面で、 $z > 5\text{mm}$ に切り込みがあるモデルである。このモデルに対して、粒子法での計算を行うことができなかった。この原因として、重力変形が大きくなりすぎたことが考えられる。これは今後の課題である。

文献

[1] 利光和彦，吉岡好一，徳安達士，岡村和俊，吉浦一紀，頭頸部触診のための粒子法による非一様弾性生体変形解析，日本機械学会論文集 C編，Vol. 87，No. 894，Paper No. 20-00339，2021. DOI: 10.1299/transjsme.20-00339.

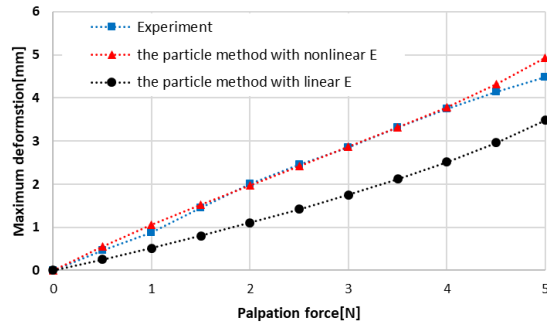


図10 粒子法解析精度の検討： α モデル，しこり真上を押す場合

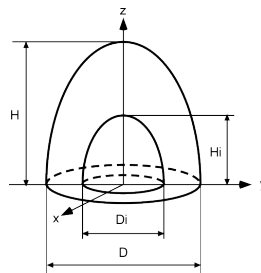


図11 半楕円体モデル

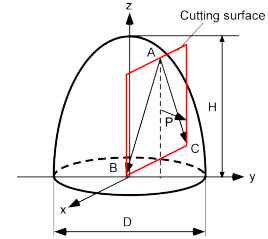


図13 半楕円体切断モデル

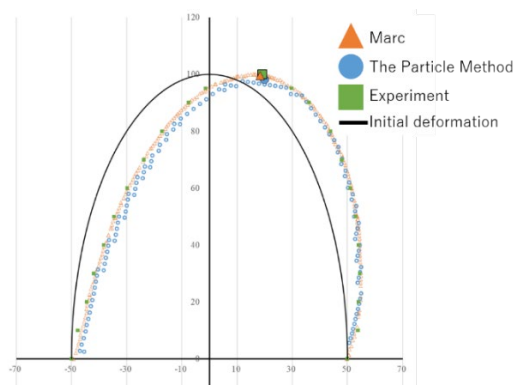


図12 実験，本粒子法，Marcによる変形形状の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 利光和彦, 杉山智美, 鷺海宏樹, 立山和樹
2. 発表標題 しこりが内在する人工軟組織生体モデルの触診を想定した変形実験およびMPS解析
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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