

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300186

研究課題名（和文） センシング機能付加による腹腔内組立式ハンドの高機能化

研究課題名（英文） High functionality assemblable hand for laparoscopic surgery with sensor integration

研究代表者

小俣 透（OMATA TORU）

東京工業大学 大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号 10262312

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、腹腔内で組立可能な手の形状をしたハンドにセンシング機能を付加し、その機能の向上させることである。本研究では、超音波により臓器や膜の内部観察が可能なハンドを開発した。さらに対向して把持する指の位置姿勢が同定可能であることを示した。また、簡単で安価な接触力センシングを目指し、空気流と水圧を利用した接触力センシングの二つの方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：We had proposed mechanical hand that can be assembled inside the abdominal cavity. The purpose of this project is to enhance the functionality of the hand with sensor integration. We have developed an assemblable hand with an ultrasound probe that enables observation of the inside of an internal organ while grasping it. The ultrasound sensing also enables the measurement of the position and orientation of the opposite finger. We have also proposed sensing methods using air flow and water pressure for simple and inexpensive contact force sensing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学，医用システム

キーワード：医用ロボット，ロボットハンド

## 1. 研究開始当初の背景

腹腔鏡下手術は患者の負担が小さいという点で開腹手術より優れているが、術者は小さな切開孔から入る細長い棒状の手術機器を使い手術を行うため、高度な技能が求められる。鉗子を多自由度化して操作性を向上する研究は内外で多く行われているが、米国 Intuitive Surgical 社の多自由度鉗子ロボット da Vinci が市場を独占している状況である。一方、小さな切開孔から機器を入れるた

めに、その形状は限定される。挿入時に折りたたまれ腹腔内で展開する手術機器もあるが、その形状変化には限界がある。

これに対して、当研究グループでは腹腔内で機器を組み立てることを提案し、T型形状の組立式縫合器を開発した。さらに手の形状をした組立式ハンドを提案し、豚腹腔内での容易な組立分解と大型臓器の圧排が可能であることを確認した。このような手術機器・手術ロボットは世界的に見てもない。これに

センシング機能を付加するとさらに機能の向上が期待できる。

人の手は触覚が高度に発達しており、それを超える工学的な触覚センサを開発することは難しい。しかし機械のハンドならば、人の手にはない感覚を付与することが考えられる。この着想から超音波センシングにより臓器や膜の透視が可能なハンドを開発できると考えた。

一方、組立式ハンドに限らず一般に鉗子等の腹腔鏡下手術機器では、接触力が得られないことが問題としてあり、これまでに多くの研究が行われてきた。電気的な装置を腹腔内で使用することは好ましくなく、滅菌可能であること、安価であることも要求される。これまでに光の反射や周波数変化を利用した光ファイバセンサが多く検討されていたが、決定的な方式は確立されていない。さらに簡単に安価な接触力センシングを目指す必要性がある。

## 2. 研究の目的

### (1) 超音波センシング機能を持つ組立式ハンドの開発

組立式ハンドに超音波センシング機能を付与することにより、臓器や膜を把持し力学的に安定な状態で内部を計測可能になることが期待できる。また対象物を動かす、押し広げるなど、アクティブに操作しながらの計測も可能になる。そこで本研究の目的は、(i)超音波センシング機能を組み込んだ組立式ハンドを開発し、メカニズムとして実現可能であることを示すこと、(ii)開発した実機を用いて効果を検証することである。

### (2) 接触力センシング方法の開発

一方、触覚については前述のように人の手の触覚を超えることは難しいが、接触力の計測は組立式ハンドに有用である。超音波探触子は一般に高価であり、それを搭載するとは限らないからである。そこで、接触力センシングの方法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 超音波センシング機能を持つ組立式ハンドの開発

単一トロカール組立方式とトロカール貫通型組立方式と呼ぶ二つの組立方式を提案していた。このうちトロカール貫通型組立方式とは、図1のように対向して配置された二つのトロカールを使って、つぎのようにして組み立てる方式である。(STEP1)先端に指を備えたシャフト(指ユニットと呼ぶ)をトロカール1から腹腔に挿入する。(STEP2)2本目の指ユニットを対向するトロカール2からシャフト側から腹腔内に挿入し、シャフト部を腹腔内から外に向かってトロカール1を貫通させる。(STEP3)腹腔外で二つのシャ

フトを結合する。

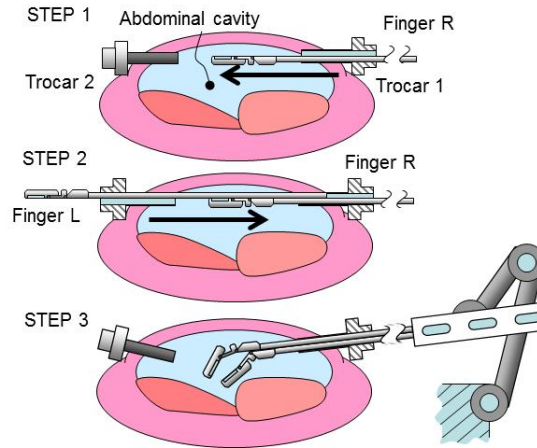


図1 トロカール貫通型組立方式

この組立方法は組立時に二つのトロカールを使用するものの、指部とシャフトを一体化して設計できる利点があり、指への動力伝達系および電気系を腹腔内で結合する必要がない。そのためセンサ組み込みハンドに適した方式と言える。そこで、これを組立方式の候補として、超音波プローブを搭載した組立式ハンドを開発する。

### (2) 接触力センシング方法の開発

簡単に安価な接触力センシングを目指し、流体を利用することを考える。その一つは、水圧駆動する関節に対して、水圧をセンシングして接触力を推定する方法である。もう一つは、空気流により音を発生させ、力が加わった場合に周波数変化を検出して接触力をセンシングする方法である。

## 4. 研究成果

### (1) 超音波センシング機能を持つ組立式ハンドの開発(学会発表)

#### ・ハンドの自由度と機構

図2に開発したハンドを示す。ハンドは2本の指ユニットRとLからなる。シャフトの直径は6mmであり、指部の直径は12mmである。トロカール貫通型組立方式により、12mmの二つのトロカールからこのハンドを組立可能である。各指は先端関節と根元関節の2関節からなる。また指RとLは相対的に並進運動することができる。よって合計5自由度を有する。

このハンドの各関節はスライダクランク機構により駆動される。手元側から回転により送りねじを駆動し、スライダクランク機構の直動部を駆動する。回転角度は、先端関節45度、根元関節90度である。指先に5Nの力が加わることを想定して強度設計した。実際には、指全体に分散して加重されるため、多くの場合それより大きな加重にも強度は保たれる。

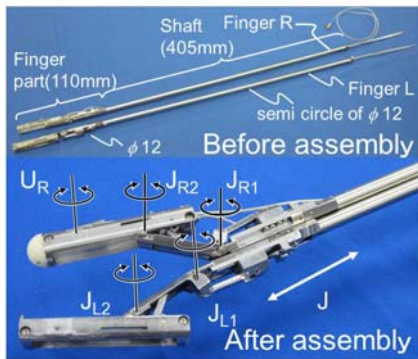


図2 2指5自由度ハンド

・超音波プローブを搭載した指

最近では電子スキャンが主流である。しかし、組立式ハンドに搭載できるサイズの電子スキャンプローブを特注することは、膨大な費用がかかるため、当初は機械式スキャンを考えていた。しかし既製の超音波診断装置ならば購入可能であったので、つぎの2通りの方策を取ることにした。(i)市販の超音波診断装置に付随する電子スキャンプローブを指に搭載する。ただし、12mmのトロカールからは挿入できない。これについては本節の最後で考察する。(ii)単一の超音波探触子を用いて機械式スキャン機構を開発し指に搭載する。その指は12mmのトロカールから挿入可能とし、In Vivo 実験に用いることにする。

(i) 電子スキャン指：超音波診断装置 (nemioXG 東芝メディカルシステムズ)の電子スキャンプローブ (PVF738F) を Finger R に搭載した。その写真を図3に示す。



図3 電子スキャンプローブを搭載した指

(ii)機械式スキャン指：図4にその指先の機構を示す。スキャン方式にはセクタスキャンを採用し、その駆動には関節と同様にスライダクランク機構を用いた。スライダクランク機構と送りねじの組合せにより、スキャン角度を正確に設定することができる。スキャン角度は電動モータにより駆動される。モータにはエンコーダが取り付けられ、スキャン角度での分解能は0.1度~0.3度である。十分に高い分解能である。

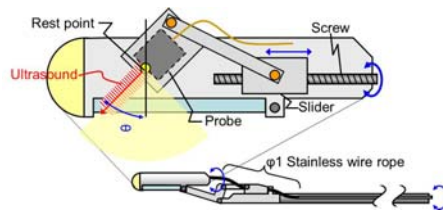


図4 スキャン機構

・対向指の相対位置姿勢

超音波が臓器を透過する場合、一般に超音波は臓器を超えて対向して把持する指まで到達する。そのエコーを観測すれば、対向指の接触状態を観測することができる。対向する指が臓器とどのように接触しているのを知ることは安全上重要であり、このことは超音波センシングの大きな利点である。

さらに、Finger Lの腹部には、マーカが埋め込まれており、後述のように、これにより二つの指 Finger R と L との相対的な位置姿勢も計測することができる。

本ハンドは指関節の駆動に送りねじを用いているため、比較的精度良く送りねじの回転量から指の姿勢精度を得ることができる。各指に二つの回転関節自由度しかないので、ワイヤ駆動を用いず実現することができた。しかし、一般に手術ロボット da Vinci など手術ロボットにはワイヤ駆動が多く用いられる。ワイヤ駆動の場合、ワイヤの伸びにより関節角度を正確に知ることが難しい。特に多関節の指の場合、関節毎にその誤差が累積され、2本の指間の相対位置姿勢を正確に得ることが難しい。関節部に角度センサを導入することはスペース的に難しく、また滅菌の観点からも好ましくない。超音波により対向指を観測できることの利点は大きい。

対向する Finger L の模式図を図5に示す。底部にアルミ板を配置し、その中点に3mmのマーカを配置する。アルミ板は強いエコーを発生し、Bモード画像上では直線として現れる。他に長い直線状の反射物体はないと仮定できるので、これが最も長い直線になる。そこで、Bモード画像にハフ変換を施し、最も長い直線要素を検出する。これにより対向指との相対角度と垂直距離がわかる。

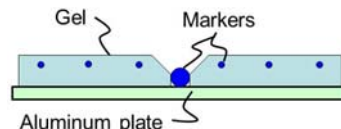


図5 対向指 Finger L の指部

3mmのマーカは対向指の相対位置を決めるために使われる。低部の直線から距離5mm以内の領域に最も大きい輝度積分値を持つ領域を算出する。他にそのような反射体はないと仮定できるので、これが3mmのマーカ



からのエコーとなる．このマーカの位置により，対向指の位置が検出できる．

また，ゲルを 3mm のマーカの左右に分割して取り付け，さらにその上部に 7mm 間隔に 0.4mm のマーカを配置する．この上部のマーカは対向指と臓器の境界を明確にする．

・電子スキャンプローブによる観察

まず，人間の肝臓と同様の B モード画像が得られる肝臓のファントム（京都科学製 IOUSFAN）を指の中間に挟んで対向指を観察した（図 3 参照）．図 6 に示すように，ファントムを把持しつつ精細な内部画像を得るとともに，対向指の位置姿勢を同定することができた．

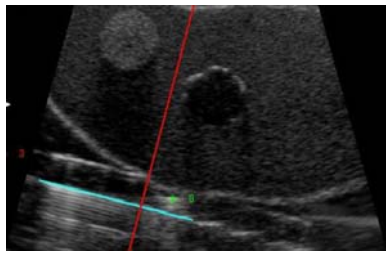


図 6 肝臓ファントムと対向指の B モード画像

・相対位置姿勢評価実験

指を固定する治具を製作し，相対位置姿勢計測の精度評価を行った．Finger R と L の垂直距離 20mm と 30mm において，角度誤差はそれぞれ最大で約 1 度，2 度，平均でそれぞれ約 0.5 度であった．位置誤差は最大で 1.2mm，平均では 1mm 以下であった．良好な計測精度が得られた．

・In Vivo 実験

開発した機械式スキャン指を搭載したハンドを用いて，in vivo 実験を行った．

図 7 に示すように，人の腹腔とほぼ同規模の豚の腹腔内で組み立てることができた．トロカールの構造が想定したものとは異なり，機密を保つ逆流防止弁の構造が逆方向から物を挿入しにくい形状であり，一旦トロカール上部の蓋を外したため 267 秒と時間がかかった．それに要した時間を除外すると 137 秒で組み立てることができた．

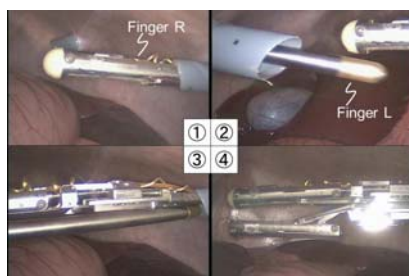


図 7 組立実験

腹腔鏡下手術用の超音波探触子を用いる際には食塩水を腹腔内に満たした状態で施術することが一般的であるが，この実験では生理食塩水を注水しながら腹腔内でスキャンを行えた．

図 8 に in vivo 実験中に開発したハンドで肝臓を把持し，得られた B モード画像に対して作成した画像解析プログラムを施したものを示す．三角形で示された領域がスキャンした領域である．これはパルスレーバで探触子に与えるエネルギーを Low に設定して取得したデータであり，指部ゲルの内部のマーカからの強いエコーがよく映っている．開発ハンドを用いて豚肝臓を把持し，対向指の位置姿勢が同定可能であることが検証された．

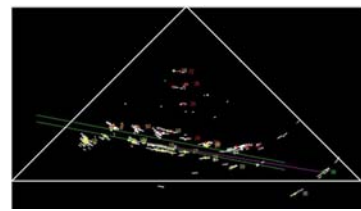


図 8 肝臓の B モード画像

・考察

使用した電子スキャンプローブの断面は 14.8mm × 19.7mm であり，これを腹腔に挿入するためには 25mm の切開孔が必要である．しかし，12mm のトロカールを通過できる腹腔鏡下用の超音波プローブが市販されている．

一方，ケーブルの断面は 7mm である．前述のようにトロカール 1 には 6mm の二つのシャフトが通されている．これらを並べて通すためには，14mm の切開孔が必要である．しかし，図 9 に示すようにトロカール 1 の断面の空きスペースの面積は

$S = \pi 6^2 - 2 \times \pi 3^2 = 18\pi$  であり，ケーブルの断面積は  $S_c = \pi 3.5^2 = 12.25\pi$  である．したがって，空きスペースを通すようなケーブルを特注すれば，十分に 12mm のトロカールを通過させることができる．

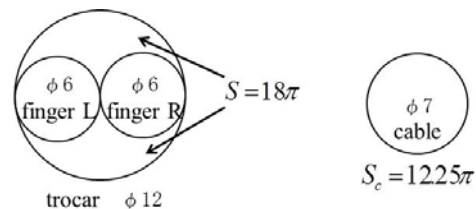


図 9 トロカール 1 の断面

(2) 接触力センシング法の開発

水圧センシング（雑誌，学会発表）

・水圧駆動ハンドの概要

3 指の屈曲関節を水圧により駆動するハンドを開発していた．本研究では，水圧のセンシングと In Vivo 実験での検証を行った．

図10に示すように、3指が並ぶ配置をしており、本ハンドは臓器圧排を目的としたハンドである。ハンドの自由度は、3指が連動して動く屈曲関節と根元関節、および手首関節の合計3自由度である。自由度は少ないが、単一トコカル組立方式により、一つのトコカルから組み立てることができる。



図10 水圧駆動3指3自由度ハンド

水圧駆動を動力伝達に用いることの利点は、(i)力の伝達率が高いこと、(ii)水圧駆動用流路に柔軟なチューブを用いることにより、手首および指根元関節の屈曲部においても先端側の関節への動力伝達を簡単に行うことができることである。これに加えて水圧計を取り付けることにより、さらに次の利点も生じる。(iii)水圧により負荷トルクが推定可能である。(iv)圧排時には指先関節を曲げきった状態にすることを想定している。指先関節に加わる負荷トルクが大きくなると、指先部が伸び始める。ピストンに与える予圧の大きさを調整することにより、指先部が伸び始めるときの負荷トルクを調節できる。

なお、接触力の加重中心位置はほぼ一定と仮定すると、負荷トルクは接触力に比例すると仮定できる。

・実験

負荷トルクを与えて、水圧を測定した結果を図11に示す。与圧 $p_p$ が高くなるほど、負荷トルクを与えてもすぐには水圧が増加しないが、この点に注意すれば、水圧から負荷トルクが測定できることがわかる。

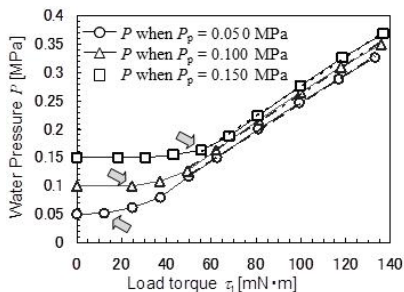


図11 負荷トルクに対する水圧の変化

つぎに与圧 $p_p$ を与えた状態で負荷トルクを増加させた場合の関節角度の変化を測定した。実験結果を図12に示す。

グラフでは、 $p = p_p$ である負荷までは指先は曲がりきった状態のままであるが、そこからは指先が直線的な変化で伸び始めている。また、伸び始めの負荷トルクは予圧を高く設定すると大きくなることが確認できる。圧排において与圧により伸び始める負荷トルクを調整できることになる。

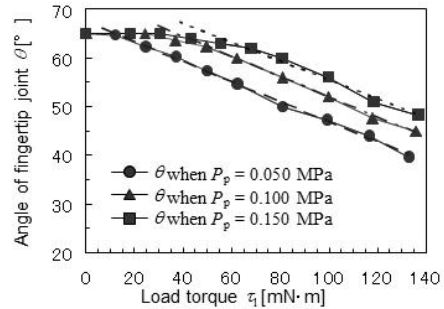


図12 負荷トルクに対する関節角度の変化

・In vivo 実験

豚を用いた in vivo 実験を実施し、肝臓を圧排対象として検証を行った。図13に示すように圧排により腹腔鏡の視野の確保、作業空間の確保ができていたことを確認した。予圧を変更し、肝臓の圧排を行った。腹腔鏡の画像から、0.020 MPaの予圧において指先部が伸び始めていることを確認した。圧排に適した予圧を定量的に設定できることが確認できた。

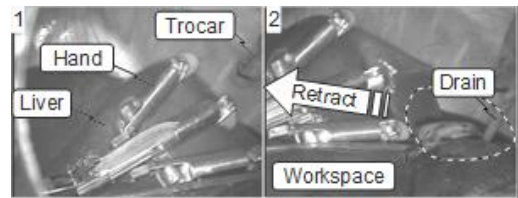


図13 水圧駆動ハンドによる In vivo 実験

音を用いた力センサ (学会発表)

・センサの基本原則

笛の発音原理を応用したセンサを開発した。図14に原理図を示す

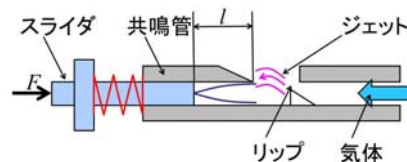


図14 音を用いた力センサ

発生する音の周波数は共鳴管長さ  $l$  に依存し、 $f = c/4l$  である。ここで  $c$  は音速である。力  $F$  により管長さ  $l$  が変化し、ばね定数

を  $k$  とすると力  $F$  は

$$F = k\Delta l$$

と求まる。音の周波数変化  $\Delta f$  を測定することにより管長さの変化  $\Delta l$  を求めることができる。

・分解能の向上

しかし力が加わらなくても、空気流の流量変化の影響により発生する音の周波数が変動し、このままでは検出できる管長さ変化の分解能が低い。そこで、周波数の安定化を図った。まず、流量レギュレータに高精度な制御が可能なものを用いた。流路に気室を設けるとともに、笛部のリップエッジ間の長さを最適化した。これらの策により、周波数変動を 10Hz 以下に抑制することができた。発音周波数を 30kHz とすると、長さの変化の分解能は約  $1\mu\text{m}$  であり、十分な分解能と言える。

センサの小型化を目指し、内径 0.5mm の共鳴管を製作することができた。図 15 はこれを三つ搭載する 3 軸力センサとして製作した笛部である。

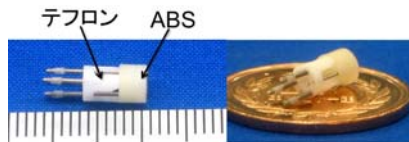


図 15 製作した笛部

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

宮本寛之, 高山俊男, 小俣透, 小嶋一幸, 高瀬浩造, 田中直文: 水圧駆動腹腔内組立式ハンドの開発 (水圧駆動の利点検証), 日本フルードパワー学会論文集, 査読有, Vol. 42, pp. 101-107, 2011

〔学会発表〕(計 10 件)

Mikio Osaki, Toru Omata, Toshio Takayama, Tadashi Sawanobori: Assemblable Hand for Laparoscopic Surgery with Ultrasound Probes, Proc. of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.156-161, Dec. 22, 2011, Kyoto

小俣透: 医歯工学連携研究の取り組み: 組立式手術機器と小線源遠隔操作装置の開発, 日本耳鼻学会第 13 回 耳鼻咽喉科手術支援システム・ナビ研究会 (招待講演) 2011 年 11 月 5 日, 東京

香川裕介, 小俣透, 高山俊男: 音を用いた腹腔鏡下手術用力センサの小型化と分解能向上, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011 年 9 月 9 日, 東京

大崎幹生, 小俣透, 高山俊男, 澤登正: 腹腔内組立式ハンドのための超音波を用いた触覚センシング, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '11, 2011 年 5 月 28 日, 岡山

澤登正, 大崎幹生, 小俣透, 高山俊男: 超音波を用いた接触変形センシング腹腔内組立式ハンドのための指位置姿勢同定, 計測自動制御学会第 11 回システムインテグレーション部門講演会, 2010 年 12 月 25 日, 仙台

友清貴広, 小俣透, 高山俊男: 音を用いた腹腔鏡下手術用鉗子のための 3 軸力センサ, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 2010 年 9 月 24 日, 名古屋

友清貴広, 小俣透, 高山俊男: 腹腔鏡下手術用鉗子のための力センサ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010 年 6 月 16 日, 旭川

小俣透, 山浦康太郎, 高山俊男: 超音波探触子を有する腹腔内組立式ハンド, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010 年 6 月 16 日, 旭川

宮本寛之, 小俣透, 高山俊男, 小嶋一幸, 高瀬浩造, 田中直文: 水圧駆動腹腔内組立式ハンドの開発, 平成 22 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2010 年 5 月 28 日, 東京

大嶋律也, 高山俊男, 小俣透, 小嶋一幸, 高瀬浩造, 田中直文: 腹腔内組立式 3 指 9 自由度ハンド, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 15 日, 横浜

〔図書〕(計 1 件)

小俣透: ロボットテクノロジー (分筆), オーム社, pp.92-95, 2011

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www.olab.pms.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小俣透 (OMATA TORU)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 10262312

(2) 研究分担者

高山俊男 (TAKAYAMA TOSHIO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・講師

研究者番号: 80376954

(3) 連携研究者

小嶋一幸 (KOJIMA KAZUYUKI)

東京医科歯科大学・医学部附属病院・特任教授

研究者番号: 60313243

田中直文 (TANAKA NAOFUMI)

東京医科歯科大学・医学部附属病院・講師

研究者番号: 90280982