

## 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25年 6月 3日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22680043

研究課題名（和文） MRI 環境下高精度画像診断・治療支援プラットフォームの開発

研究課題名（英文） Platform system and devices for high precision image diagnosis and therapy under MRI environment

研究代表者

正宗 賢（MASAMUNE KEN）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：00280933

研究成果の概要（和文）：

本研究では、次世代医療のモデルとなる、医用画像撮影・観察下において高精度な治療を行うためのインタラクティブな治療支援機器の基盤技術開発を行った。具体的には、MRI 下の悪性脳腫瘍摘出を目的とした高精度診断用像取得技術および画像重畳表示技術開発を行った。さらに、術者の治療作業の円滑化を目指した手術のインテリジェント化について研究し、手術プロトコルと手術デバイスとが連動したインテリジェント・アシスト手術の基盤技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, base technologies of interactive therapeutic devices and systems that serves as a new model of the next healthcare are developed to carry out the high precise surgical treatment under the guidance of intra-operative medical imaging and observation. Specifically as a clinical target, we studied the high precise diagnostic image acquisition system and image overlay display technology for MRI guided tissue removal of malignant brain tumor. We also developed and evaluated the fundamental software system for intelligent assist surgery with combining the surgical protocols and tasks and devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	16,400,000	4,920,000	21,320,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：コンピュータ外科学，MRI，低侵襲治療，拡張現実感，手術モデリング

### 1. 研究開始当初の背景

一般的に MRI は、優れた腫瘍の描出性、血管像・機能画像の取得、被曝がない等の優位点がある。そこで MRI 画像の有する豊富な情報を参照しながらの治療の実現により、従来にはない手術法の開拓が可能となる。一例として、脳外科領域における悪性脳腫瘍の治療がある。悪性腫瘍に対して従来は徒手的な腫瘍組織切除を行うことが求められるが、腫瘍

が正常組織に浸潤して存在しているため境界が不明瞭である問題があり、一般的な手術では腫瘍の切除範囲を拡大して摘出していた。しかし、正常部位の過摘出による麻痺等の合併症が発生しやすく、逆に摘出範囲を縮小すると残存腫瘍による再発危険性が生じる問題があった。そこで、MRI 画像を手術に導入することで、境界線のある程度精度良く求めることができる。村垣らによるオープン

MRI 下による脳腫瘍摘出術の報告など、腫瘍全摘出可能症例が全国平均と比較して著しく向上したという成果も報告されてきている。

しかしながら、このような MRI を用いた先端治療であっても、グレード IV の悪性脳腫瘍に対しては依然として予後が悪いことが明らかとなっている。これは、腫瘍細胞が摘出出来ずに残存していることも一因であり、ここに通常の MRI を用いる治療法の限界点があるといえる。すなわち、精度の高い診断が出来たとしても、現状の手術ツールではより高度な手技が求められ、それら手技を支援する新たなデバイス・ツールの開発が強く求められている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、MRI 撮影環境下において高精度な治療を行うための基盤技術群の確立を目指す。具体的には強磁場環境下で高精度位置決めを行うためのロボット基盤技術、直感的な画像観察を実現する画像重畳による拡張現実感技術の研究を行った。また、MRI の使用という限られた条件の中で安全・迅速に手術を行うための手術プロトコルと手術デバイスの連動によるインテリジェント・アシスト手術の基盤モデルを確立することで、次世代治療システムの基盤技術開発を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

現状行われている MRI 下における治療は、常時 0.2~数テスラの強磁場環境下で行われる。また狭所ゆえに、術者が直接自らの目で確認し、自らの手を入れて作業することは困難である。そのため現状では、MRI という情報を断片的にしか活用していない。そこで我々はこれまでに、内部情報を確認しながら穿刺針を患部へと刺入する新しい治療環境構築の研究を進めて来た。本研究では、それらの成果をさらに発展させ、具体的な臨床対象を絞った診断治療環境モデルを提案・構築し、次世代治療に寄与することを目標とする。

目的達成のための具体的な研究項目として、以下の3項目の研究を行う。

- (1) MRI 撮影用局所アンテナを搭載可能な精密位置決めロボットおよびロボット駆動のためのアクチュエータ開発
- (2) MRI 情報を術者に重畳表示するナビゲーションシステムの開発
- (3) 手術シナリオモデルに基づく、最適な情報を適宜提供するインテリジェント・アシスト機能の開発

以下、それぞれについて方法を述べる。

### (1) MRI 撮影用局所アンテナを搭載可能な精密位置決めロボット

脳腫瘍摘出を行う際に問題となる腫瘍の取り残しを防ぐためには、摘出後の脳腔内で脳の表層より深い組織を観察する必要がある。そのため、人の手が入らない狭所において局所部位の MRI を観察する小型 RF コイル搭載精密ロボットが必要となる。本研究ではいかなる強さの磁場環境の中でも精密に駆動する完全非磁性ロボットの開発を行った。

まず、ロボットのアクチュエータとして、図1に示す駆動原理による回転型アクチュエータおよび直動型アクチュエータの開発を行った。動作に必要なギアは、1つの Rotation Gear と3つの Direct Acting (DA) Gear から構成される。

DA Gear はそれぞれがギアピッチの3分の1ずれた状態で配置される。これらの Rotation Gear が順番に空圧により押し上げられ DA Gear と噛み合うことで Rotation Gear が回転する。また、同時に噛み合っていた DA Gear は押し下げられる。押し上げる順番を変えることで右回り (CW)、左回り (CCW) を実現する(図1)。

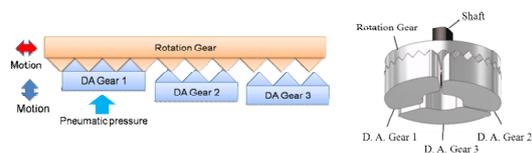


図1 非磁性モータの駆動原理

また、直動型については、以下の原理を考案した。径の異なる二つの円のうち、径の小さな円(小径円)を径の大きな円(大径円)に対して内接させながら転がすことで、接触位置が円周の長さの差の分だけずれることになる(図2)。この大径円と小径円を円筒形状で構成し、それぞれの表面に、らせん状の歯を設けることで、そのずれの分だけ直動方向に動作することが可能となる。この減速比は大径円の半径を  $R$ 、小径円の半径を  $r$  とすると、 $(R-r)/r$  となる。



図2 非磁性直動・回転モータの駆動原理

以上の原理を用いて、マイクロ RF コイルを MRI ガントリー内にて位置決めする脳外科手術支

援を目的としたロボットを開発する。

## (2) 画像重畳表示ナビゲーションシステムの開発

実際の腫瘍摘出時においては、術者は顕微鏡下手術を行うために、MRI 画像を直接的に十分には活用していない。そのため、前節で得られるような局所部位情報を含めたナビゲーション情報を重畳表示する拡張現実感システムを開発する。研究開始当初は立体顕微鏡の使用を検討したが、顕微鏡画像の取得インタフェースおよび光学パラメータの観測・制御性に問題があり、脳外科手術に限らず MRI 撮影室内にて用いることが可能な画像重畳表示システムの開発を行うこととした。

具体的には、術前 MRI 画像から生成される病変部の三次元 CG モデルの重畳画像を、色分けされた 3 個の Fiducial マーカの情報のみを用いて生成し、タブレット PC に搭載されている背面カメラ画像上に重畳表示するビデオスルー式画像重畳表示システムを提案した。本画像重畳表示システムの概要を図 3 に示す。背面カメラ搭載型タブレット PC (Apple 社製、第二世代 iPad、背面カメラ画素数: 1024×768) のみにより構成される。また、患者には色分けされた 3 個の円形 Fiducial マーカを貼付する。術前 MRI 画像から三次元 CG モデルを構築し、タブレット PC の背面カメラに映る 3 個の Fiducial マーカから患者に対するタブレット PC の相対的な位置・姿勢関係を推定し、タブレット PC の背面カメラ画像への重畳画像の生成および表示を行う。

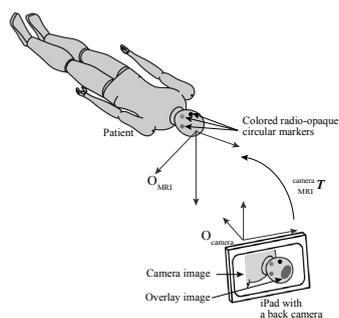


図3 システム構成

マーカ検出後、タブレット PC に搭載された背面カメラの画像への重畳画像を生成するためには、タブレット PC に搭載された背面カメラの座標系 ( $O_{\text{camera}}$ ) から術前 MRI 画像から生成される三次元 CG モデルの座標系 ( $O_{\text{MRI}}$ ) への相対的な同次座標変換行列 および、三次元空間上に存在する点  $P$  の に対する座標値とタブレット PC に搭載された背面

カメラの画像に映る点  $P$  の座標値との対応関係を把握する必要がある。ここでは、それらの対応関係を 3 個のマーカの位置およびその大きさによって算出し、システム全体の座標系統合を行った。評価実験として、ファントムによる重畳表示を行い、本画像重畳表示システムのすべての誤差要因を含んだ画像重畳表示位置精度を評価した。

## (3) 手術プロトコル管理によるインテリジェント・アシスト手術の基盤技術構築

MRI 手術室という様々な情報下での手術を効率よく行うため、作業工程や状況が周囲スタッフも含め一目で把握・確認できるシステムが必要である。我々はこれまでに Timed Automata によるハイブリッドな手術シナリオモデルの研究を行ってきたが、モデルの検証まででリアルタイムにモデルを活用する技術は得られていなかった。そこで本研究では、様々な手術工程および入出力機器との連携を考慮した手術モデル作成基盤の開発を行った。

本研究では、情報共有を図る目的で設定する粒度を、工程が戻ることがない中で最大限細かい作業を一つの工程として設定した。一方、医療用デバイスとの連携を図るための作業モデルの粒度を「メスで切開」といった手術器具及び作業部位により一つの作業をとって設定した。また、手術は執刀医、助手、器械出し看護師等、各々役割を担ったスタッフにより遂行されるため、各々の行動を記述する必要があり、前述の三者の行動のモデル化を行った。



図4 左) 術中のシステム使用の概観  
右) 手術工程モデリング例

術中に情報の提示を行うシステムのプロトタイプを作成を行った。手術室外には情報処理用のコンピュータがあり、手術室内のタブレット PC 及びモニターと有線ケーブルでつながれている。図 4 左にシステム使用時の概観を示す。

作成した情報提示システムは以下の機能を持つ。

- ・モデルの作成及び編集
- ・手技に関する注意事項及び動画像のデータベースへの蓄積

・工程に要した時間の記録

手術室内に設置したビデオカメラの映像をもとに脳腫瘍摘出手術における開頭術四例の手術工程のモデルを作成した。四例のモデルの共通の工程及び作業を抽出して標準モデルの作成を行い、粒度及び状態遷移が不適切である際には適宜追加・修正を行いモデルを作成した。図4右にモデルの例を示す。

作成したモデルの有効性を検証するために、テストデータとして新たに作成した工程モデル一例と比較を行い、適合率を算出した。適合率とは、術中に行われた手術工程のうち、モデルで表現可能な工程の割合とする。ここでは、粒度の粗さに応じてモデルの適合率をそれぞれ定義した。また、作成した情報提示システムを臨床現場で使用し、医師及び看護師の意見による定性評価を行った。

#### 4. 研究成果

前章で示した項目についてそれぞれ得られた成果と考察・まとめを述べる。

##### (1) MRI 撮影用局所アンテナを搭載可能な精密位置決めロボット

開発したロボットを図5に示す。下側がジンバルにより支持されており、上側で平面2自由度に動作する。さらに、送り方向およびその軸周りの2自由度を有した、合計4自由度のロボットである。

平面2自由度の機構に関しては、直動機構を3節リンクの2辺に配し、さらにリニアガイドにて動作を拘束することで、高い位置決め分解能と動作範囲の拘束を同時に実現する設計とした。

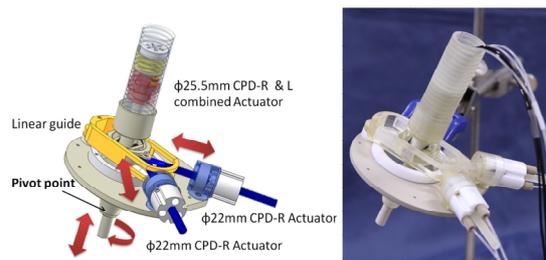


図5 4自由度非磁性位置決めロボット

開発したそれぞれのアクチュエータおよびロボットの評価実験を行った。またMR対応性に関する評価を行なった。回転アクチュエータにおいては、各角度での位置決めヒステリシス、および、理論値からの誤差を評価した結果、それぞれの点でのヒステリシスは $\pm 0.3\text{deg}$ 以下、誤差は $\pm 2.1\text{deg}$ 以下であった。また、空圧駆動により生じる遅延について評価した結果、チューブ1mの時、遅延時間40msec以下であることが分かった。また、ロ

ボットのMR対応性については、0.2TのMRIを用い水溶液ファントムをコントロールとして5回撮像、評価用にロボットをコイルに取り付け、アクチュエータを4つ全て動かした状態で5回撮像し、SN比の低下およびノイズ、歪みの確認を行った。その結果、コントロールで $\text{SNR}52.6\pm 0.1$ 、ロボット駆動で $\text{SNR}51.8\pm 0.7$ で、低下率は1.4%と非常に低い値であった。画像の歪みやノイズも見られなかった。

また、位置決めロボットについて、平面2自由度位置決め駆動部のアクチュエータ繰り返し位置決め精度は0.1mm以下と非常に高く、直動型アクチュエータの送り精度が0.1mmであるため、高精度での位置決めが可能である。

本研究では、非金属空圧式アクチュエータおよび4DOF位置決めマニピュレータを開発した。評価実験により、マニピュレータ駆動に十分なトルクと高精度な位置決めが可能であることを確認した。また、高いMR対応性を有していることを確認した。ここで開発された基盤技術により、将来的にはより強い磁場環境内でも活用できる有力なデバイス開発が可能となり、今後は応用の幅を広げていく。

##### (2) 画像重畳表示ナビゲーションシステムの評価

ファントム評価実験として、図6に示す直径20mmの円形Fiducialマーカを3個貼付した樹脂製容器を用いた。内部には一辺25mm、傾斜角 $\lambda$  [deg] ( $\lambda=0,30,45,60$ )の傾斜構造物が固定されている。樹脂製容器内に水を充填させた状態でMRI撮像を行い、傾斜構造物の三次元CGモデルを生成後、タブレットPCを樹脂製容器内の傾斜構造物の斜面部から距離 $H$  [mm] ( $H=250,300,350$ )の位置に樹脂製容器内の傾斜構造物の斜面部と平行になるように固定した。タブレットPCの背面カメラ画像に映る樹脂製容器内の傾斜構造物に対して、三次元CGモデルの画像を重畳表示することにより、画像重畳表示位置精度評価を行った。具体的には、画像が重畳表示された状態でタブレットPCのディスプレイ画像をキャプチャし、樹脂製容器内の傾斜構造物斜面部の四頂点について、背面カメラ画像と重畳された三次元CGモデルの画像の位置誤差を画素値から計測した。計測はそれぞれ5回ずつ行なった。各位置における画像重畳表示位置誤差(TRE: Target Registration Error)の計測結果をTable1に示す。各位置におけるTREの平均は1.0mm以下、標準偏差は0.5mm以下となった。また、有意水準5%でWelchの検定を行った結果、各位置間および各角度間における誤差に有意差がないことが確認できた。また、画像更新速度は約15Hzであ

った。

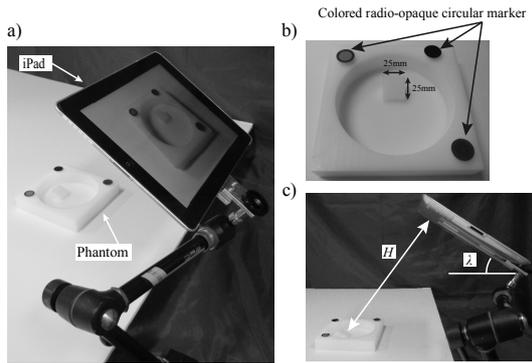


図6 評価実験用ファントムセットアップ

表1 画像重畳精度 (TRE±SD [mm])

	$\lambda=0$	$\lambda=30$	$\lambda=45$	$\lambda=60$
$H=250$	$0.7\pm0.4$	$0.7\pm0.2$	$0.7\pm0.3$	$0.7\pm0.3$
$H=300$	$0.8\pm0.4$	$0.6\pm0.3$	$0.6\pm0.3$	$0.7\pm0.3$
$H=350$	$1.0\pm0.5$	$0.7\pm0.3$	$0.7\pm0.2$	$0.8\pm0.5$

MRI 室内で用いることが可能な、安全な手術を実現するための奥行き情報も精確な画像重畳表示システムの開発を行った。評価実験において、奥行き位置あるいは観察角度について画像重畳表示位置誤差に有意差がなく、最大誤差平均 1.0 mm 以下という結果が得られた。このことから本画像重畳表示システムは、奥行き位置あるいは観察角度に関わらず、従来開発されてきた画像重畳表示システムと同等の高精度画像重畳表示システムといえる。画像重畳表示位置誤差の原因としては、カメラキャリブレーションの誤差、マーカ抽出における楕円中心および長軸特定における誤差、座標系統合時における累積計算誤差などが考えられる。

また、これまで開発されてきた画像重畳表示システムと比較して小型・軽量・安価化を実現しているだけでなく、画像重畳表示位置誤差が 1.0 mm 以下であり、手術ナビゲーションシステムとして十分な有用性が示された。近年普及が著しく医師にとっても身近な存在となったタブレット PC を用いることにより、臨床への導入も促進されることが考えられる。

### (3) 手術プロトコル管理によるインテリジェント・アシスト手術の基盤技術評価

3(3)で述べた実験の結果を表2に示す。粒度の粗いモデル及び粒度の細かいモデルの適合率はそれぞれ、100%、79.3%となった。モデルに不適合であった作業の内訳として、作業者が異なっていた作業が9例、モデ

ル作成時に調査した際には行われなかった新たな作業が3例あった。

表2 手術工程モデルの適合率

粒度	適合状態数	適合状態遷移数	状態数	状態遷移数
粗い	13	12	13	12
細かい	46	-	58	-

粒度の粗いモデルでは提案した手法は十分有効となりうる。粒度の細かいモデルは、79.3%と低い値であったが、指導の目的等重要でない作業例を除くと93.9%となり、提案したモデル化手法は有効である可能性がある。

術中MRIにおける手術において、複数の医療スタッフのモデル化を図るための手術工程モデル化手法の提案・臨床評価を行いその有効性を確認した。また、術中情報提示システムの設計・構築・臨床評価を行った。まだ開頭までの実装を行った段階であるが、臨床現場で本システムを使用した医師及び看護師からは、本システムは教育、作業効率化、手技評価に有用との意見を得た。

以上の研究開発により、次世代医療のモデルとなる、医用画像撮影・観察下において高精度な治療を行うためのインタラクティブな治療支援機器の基盤技術がそれぞれ示されたと言え、今後はこれらの要素基盤技術成果の他科へのさらなる応用展開へと発展していくことが強く期待できる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- Hiroyuki Sajima, Hiroki Kamiuchi, Kenta Kuwana, Takeyoshi Dohi and Ken Masamune, MR-Safe Pneumatic Rotation Stepping Actuator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.24, No.5, pp.820-827, 2012
- Abbi Hamed, Ken Masamune, Zion Tsz Ho Tse, Michael Lamperth, and Takeyoshi Dohi, Magnetic resonance imaging-compatible tactile sensing device based on a piezoelectric array, Journal of Engineering in Medicine, 226, pp.565-575, 2012
- 上内洋輝, 佐藤生馬, 鈴木孝司, 植松美幸, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 正宗賢, タブレットPCを使用した医用画像重畳表示ナビゲーションシステムの開発, JJSCAS Vol.13,

- No.4, pp.445-452, 2011
4. Ken Masamune, Jaesung Hong, Advanced Imaging and Robotics Technologies for Medical Applications, International Journal of Optomechatronics, 5: 299-321, 2011
  5. 正宗 賢, 手術装置の機構的工夫---MRI環境下ロボットを例にして---, 日本ロボット学会誌, 29(6), pp.16-19, 2011
  6. 長縄明大, 山尾拓, 佐藤生馬, 岡正人, 田中幹也, 正宗賢, MRI対応穿刺治療ナビゲーションロボットの高精度制御, 日本AEM学会誌, Vol.18, No.2, 2010

[学会発表] (計 10 件)

1. Ken MASAMUNE, New Framework for Information Display System based on Surgical Process Modeling, 6th NSF-JST Japan-U.S.A. Joint Workshop on Development of Model-based Assistive Robotic Technologies for Medicine and Rehabilitation, 2013/3/29, New York
2. Ken Masamune, Simple and smart development on medical devices, Asan Medical Center Seminar (招待講演), 2012/12/10, Seoul
3. 小林智裕, 鈴木孝司, 村垣善浩, 正宗賢, 手術工程に基づいた術中情報提示システムの基盤開発, 第22回ライフサポート学会フロンティア講演会, 2013/3/5, 東京
4. 三木康平, 上内洋輝, 正宗 賢, MR対応マイクロRFコイル位置決め用非磁性マニピュレータの開発, 第21回日本コンピュータ外科学会大会, 2012年11月02日, 徳島
5. 佐藤 生馬, 鈴木 孝司, 藤野 雄一, 正宗 賢, 手術ナビゲーションシステムのためのWi-Fi三次元位置計測システムの開発, 第21回日本コンピュータ外科学会大会, 2012年11月02日, 徳島
6. 上内洋輝, 正宗賢, タブレットPCおよび三点マーカを使用した医用画像重畳表示システム, 電子情報通信学会技術研究報告 (医用画像研究会), 2012/9/4, 東京
7. Ken Masamune, Needle Guidance Robot and Augmented Reality System for On-site MRI Guided Surgery, IROS2011 Workshop -- Image-Guided Medical Robotic Interventions, 2011年9月26日, San Francisco, U.S.A.
8. Ken Masamune, New surgical devices for minimally invasive image guided surgery, Daegu International Robot Dealer Marketplace Conference 2011年4月14日, Daegu Korea

9. Ken Masamune, Medical robotics -Advances and trends in Computer Aided Surgery, 1st International Symposium on Medical Robotics in DGIST, 2011年10月27日, Deague, Korea
10. 正宗 賢, 手術支援機器における研究・開発と評価成果の一考察, 第20回日本コンピュータ外科学会大会シンポジウム, 2011年11月22日, 神奈川県

[図書] (計 1 件)

日本ロボット学会 編 分担執筆, ロボットテクノロジー, オーム社, pp.114-118, 2011

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: ステッピング・アクチュエータ  
 発明者: 佐嶋浩之, 正宗賢, 土肥健純  
 権利者: 有限会社ディー・エッチ・エス  
 種類: 特許  
 番号: 特許公開 2011-241970  
 出願年月日: 2010年5月21日  
 国内外の別: 国内

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

正宗 賢 (MASAMUNE KEN)  
 東京大学・大学院情報理工学系研究科  
 ・准教授  
 研究者番号: 00280933

(2) 研究分担者

若手 A につき該当なし

(3) 連携研究者

若手 A につき該当なし

(4) 研究協力者

村垣善浩 (Yoshihiro Muragaki), 東京女子医科大学・先端生命医科学研究所・教授  
 鈴木孝司 (Takashi Suzuki), 東京女子医科大学・先端生命医科学研究所・助教  
 宮田哲郎 (Tetsuro Miyata), 東京大学医学部附属病院血管外科・病院教授  
 保坂晃弘 (Akihiro Hosaka), 東京大学医学部附属病院血管外科・助教  
 佐藤生馬 (Ikuma Sato), はこだて未来大学・助教  
 上内洋輝 (Hiroki Kamiuchi), 東京大学・大学院情報理工学系研究科・博士課程  
 佐嶋弘之 (Hiroyuki Sajima), 東京大学・大学院情報理工学系研究科・修士課程