

MISS VOiCE

Minimally
Invasive
Spine
Surgery

Vol.12

Voice of Customer Elevating Best Practices Pioneering What matters

MISTとNew Technology2

手術支援ロボットアームシステムCirq®の使用経験と展望

根尾 昌志 先生 (大阪医科薬科大学 整形外科科学教室)

Cirq®を使用した椎弓根螺子設置の実際

藤城 高志 先生 (大阪医科薬科大学 整形外科科学教室)

Digital Spine

～脊椎低侵襲手技 (MIST) を支えるデジタル技術～

竹内 一裕 先生 (岡山医療センター 整形外科)



巻頭言

MISTとNewTechnology2

脊椎脊髄手術のDX。人間の勤に頼った時代からコンピュータ支援の手術に進化している。ナビゲーションシステムが無いと手術ができないわけではないが、あればより早く、より正確に、そして安全に手術できる。2022年は脊椎ロボット元年。全国に脊椎手術支援ロボットが導入し始めた。どう使うかは人次第。まだ多くは期待できないが、技術は進歩する。先進的に使い始めた大阪医大根尾昌志教授グループの報告を熟読したい。百聞は一見にしかず。デジタルスパインは日本では新しい単語だ。岡山医療センターの竹内一裕先生が日本に取り込んだ。コンピュータ支援のハードのみならず、脊椎手術のDXを考える概念である。MIST学会などでシンポジウムが組まれている。今後の発展に期待する。

アドバイザー：

佐藤 公治 先生

日本赤十字社愛知医療センター名古屋第二病院 院長 整形外科・脊椎脊髄外科

MIST学会 理事

MIST学会：<https://s-f-mist.com>

手術支援ロボットアームシステム Cirq® の使用経験と展望：



はじめに

最近日本においても、正確に椎弓根螺子を刺入するための脊椎手術用ロボットがいくつかの施設で導入され始めており、今後のトピックになると思われる。

私が初めて脊椎手術用ロボットを見たのは18年前、2004年シカゴで開かれたNASS annual meetingの展示会場であった。同年FDA（アメリカ食品医薬品局）に認可を受けたばかりの世界初の脊椎用ロボットSpineAssist®（Mazor Robotics Ltd., Caerea, Israel（当時））が展示されていた。ベッドや患者の棘突起などに固定したフレームに取り付けられた缶ビール位の小さなロボットで、最初は何なのか理解できなかった。椎弓根螺子刺入用ロボットとわかり脊椎手術が新しい時代に入って行くのを実感したのを覚えている。

その後すっかり忘れていたが、2013-2014年、ひょんなことから、カダバーを用いてSpineAssist®の後継機種であるRenaissance®による胸腰椎螺子刺入の

精度を研究する機会に恵まれた。不安定なフレームに乗ったちっぽけな機械で本当にきちんと入るのかと半信半疑だったが、オープンでも経皮的にでも極めて正確に椎弓根螺子の下穴作成ができて驚いた。

（Fujishiro T et al., Spine, 2015）しかし、このシステムはナビゲーションとは連動しておらず、ロボットが指し示すドリリングの方向が本当に正しいのかどうかを確認する術がなかったため、実際の臨床で使うのはためらわれた。結局日本には導入されなかった。

このような時代を経て、最近FDAに次々と脊椎手術用ロボットが認可されている。どれもナビゲーションと連動したロボットである。その内の一つであるCirq®（Brainlab AG, Munich, Germany, 2019年FDA認可）を我々は2022年3月に導入した。Cirq®は、他社の据え置き型の大きなロボットとは違って、ベッド取り付け型の比較的コンパクトなロボットアームであり、アームは7軸の自由度を持つ（図1）。



図1 ベッド設置型の脊椎手術支援ロボットCirq®

当院のハイブリッド手術室にはレールの上をスライドする本物の128列CT (Siemens AG, Munich, Germany) が設置されており、ここで手術用ナビゲーションシステムCurve® (Brainlab AG) とともにCirq®を用いる。(図2)



図2 我々の手術風景。奥から術中CT、Curve®、Cirq®

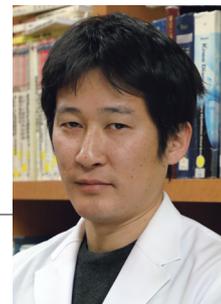
このシステムでは、術野を展開しリファレンスを設置した後CTを撮ることによって、直ちにナビゲート可能となる。ナビゲーション下に螺子経路を決め、その経路をモニタ上に残す。最初は手動で予定経路に近い位置までロボットアームを持ってくると、あとはアーム先端のアラインメントモジュールにより位置が自動的に微調整され、正確な位置でアームが固定される。アームにドリルスリーブを設置し、スリーブ先端を骨の刺入点近くまで持っていきのだが、スリーブが外側から筋肉に押されてスリーブ経路は正中側に寄ってしまうこともある。そんな時でもスリーブに軽く手を添えてスリーブ先端をモニタ上の予定刺入点の位置に持ってくると、スリーブ経路は予定経路とぴたりと合う。その位置でスリーブ先を骨に食い込ませて安定させてからドリリングすることで、予定通りの位置に下穴を作成できるのである。私は骨内の感触を手で感じるができるようハンドドリルを用いている。Cirq®導入前は「どんなにアームそのものが至適位置で強固に固まっても、結局スリーブは筋肉に押されて経路が狂うのではないかと心配しており、確かにその通りであったが、わずかな力で正確な位置にスリーブを復帰させることができるのは予想外であった。刺入点を合わせたのにスリーブ経路と予定経路の傾きが異なるということにはならない。正確に一致する。上記がわかった後は、このロボット使用の最終目的である頸椎の椎弓根螺子にも応用を始めている。ロボットが3次元的な方向を決めてく

れるため、以前よりも随分ストレスが減った。

懸念される点があるとすれば、このシステムの正確性がナビゲーションのみに頼っていることである。ナビゲーションが途中で不正確になったことに気づかなければ、大きなトラブルになる可能性がある。前述した通り、黎明期のロボットSpineAssist®やRenaissance®では、コンピュータが計算したモニタ上の画像が正しいと信じるしかなかった。それが、ナビゲーションと連動することによって、螺子刺入直前でも骨の表面をポインターで触り、ナビゲーションの精度を再確認できるようになった。しかし、経皮的螺子刺入では骨の表面を触れて精度を確認することが難しい。1mmのずれも許されない頸椎への経皮的椎弓根螺子刺入を考える時、さらにもう1枚ロボット自身の持つセーフティネットがあってもよいと思う。骨の中にあるということやロボット自身が感知・確認したり、プローブやドリルが血管や神経に近づくと警告したりというようなシステムは無理だろうか。

C-armがほとんど全ての施設に常備され、多くの施設にナビゲーションが導入されてきた歴史を考えると、ロボットによる脊椎手術がスタンダードになる日も決して遠くはないかもしれない。

Cirq[®]を使用した 椎弓根螺子設置の実際



はじめに

当施設では、2022年3月からブレインラボ製手術支援ロボットアームCirq[®]を導入した。腰椎変性疾患における椎弓根螺子 (Pedicle Screw; PS) 設置への使用から始め、徐々にその適応を広げている。本稿では、Cirq[®]を使用した椎弓根螺子設置の手順や留意点などを紹介する。

術中Cirq[®]を有効に使用するためには、術前のセッティングが何よりも重要である。Cirq[®]を含めた脊椎手術用ロボットは、Curve[®]ナビゲーションシステムと連動している。そのためロボットを用いてPilot Holeを

作製する際は、ステレオカメラからReference ArrayとスリーブおよびドリルガイドのReference Markerが同時に見える必要がある。ロボットの設置位置によってはロボットアームが干渉し、ステレオカメラからReference Arrayが見えにくくなり、こうなると手術が非常にやりにくい。常にステレオカメラから、Reference Array、アームやReference Markerを含めたRobotic Unitの順になるようなセッティングを心掛けている (図1)。

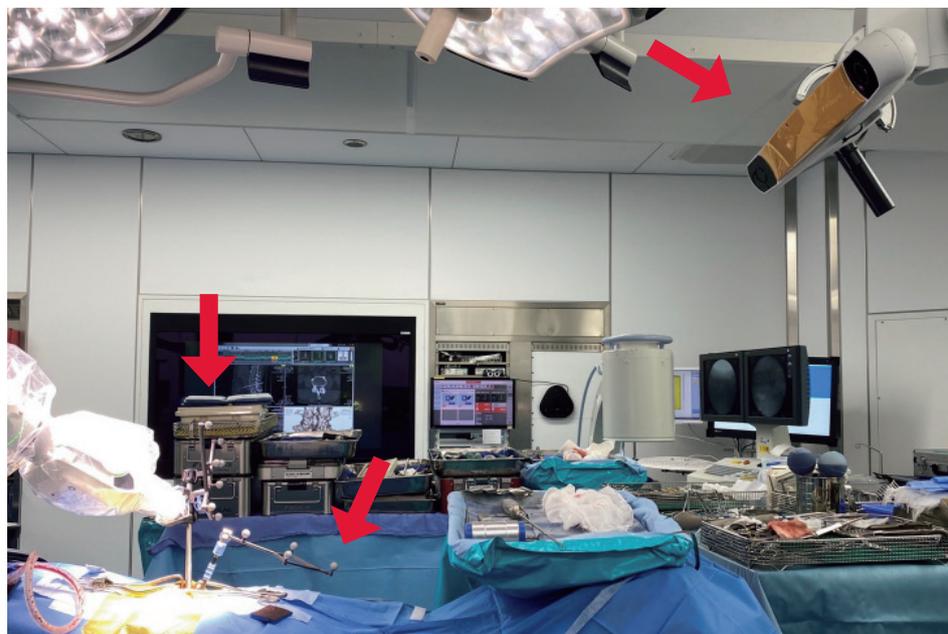


図1 右から順に、ステレオカメラ、Reference Array、Robotic Unit。常にこの順になるようなセッティングを心掛ける。

Registrationは術前に撮像したCT画像でも可能であるが、当院では遊走式CTを有するHybrid手術室があり、術中CTを撮影すると自動でRegistrationが行われる。この場合、ロボットアームはCT撮像時にガントリーと干渉しないようにベッドレール上に設置し、Pilot Hole作製時に術野に届く位置まで移動して使用している（図2）。



図2 CT撮像時はロボットアームを頭側によけておき（上）、Pilot Hole作製時にベッドレールごと術野にロボットアームが届く位置まで移動する。

1. 正中縦皮切を用いて椎弓から椎間関節外側、PS 刺入部位までを展開する。
2. Reference Array を設置した後、必要なら Surface Registration を行い、Navigation System の精度を確認する。
3. 実際の術野でポインターを用いて、Workstation 内の Cirq[®] の Software 上で確認しながら PS Trajectory の Planning を行う（図3）。

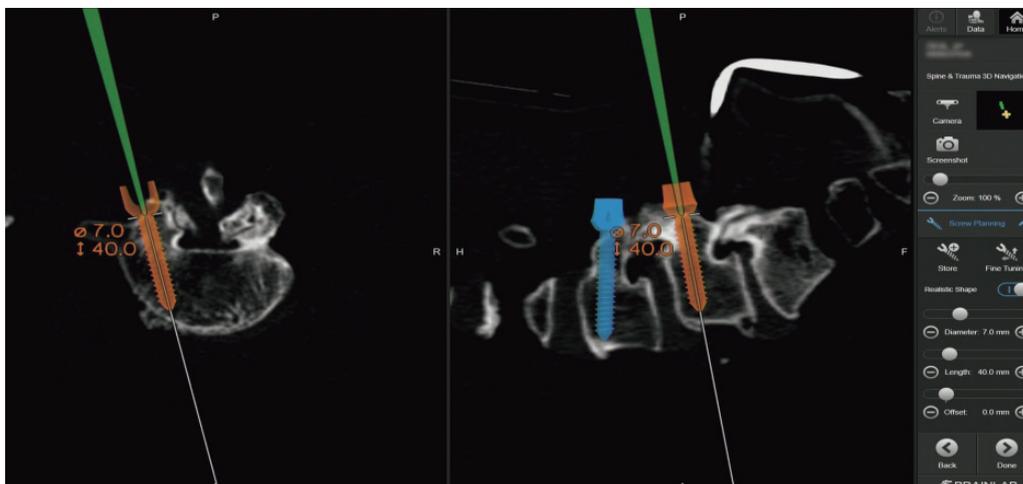


図3

PS Trajectory の Planning とその後の Pilot Hole の作製は 1 本ずつ行うことも可能であるが、後の作業の煩雑さを減らし手術を速やかに行うために、我々は刺入予定の PS 全ての Planning を一度に行っている。PS の刺入点となる位置はハイスピードドリルを用いて Pit を作製しておく、Skive の予防になるだけでなく、後の Pilot Hole 作製時の Trajectory の精度の目安にもなる (図 4)。

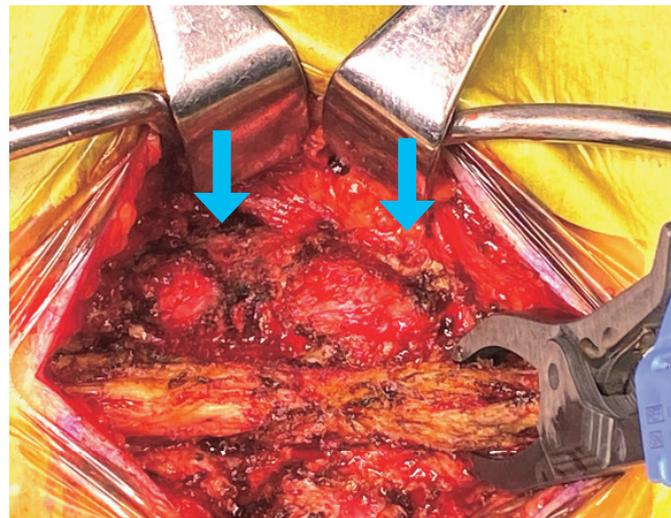


図4 Pit (矢印) の作製。

4. Software 上で、Pilot Hole を作製する PS の Planning を選択する。再度ポインターを用いて Navigation System の精度を確認した後、ロボットのアームを手動的に動かし、アーム先端に装着されたスリーブホルダーが PS trajectory 上にくるようにする。このスリーブホルダーの位置は、Cirq® の Software 上で骨組織との 3 次元的位置を確認することができる。スリーブホルダーが Planning した PS Trajectory に近づくと、モニター上でスリーブホルダーは緑になり (図 5)、その後はアームが自動的に動き PS Trajectory の微調整を行う。

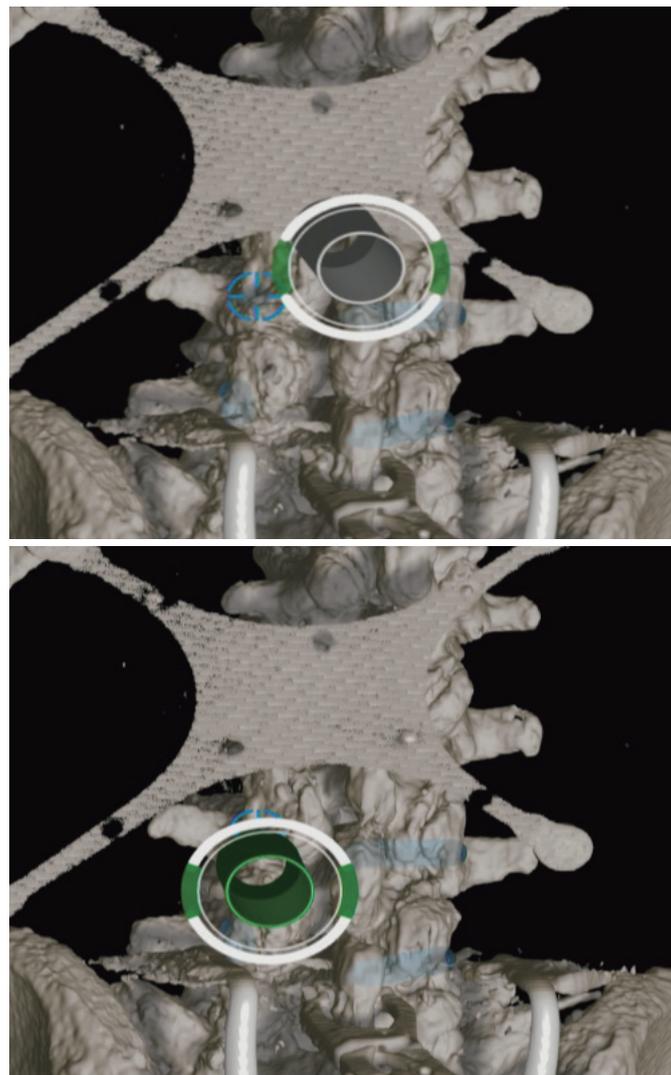


図5 Software上では、ロボットアーム先端のスリーブホルダーと骨組織との3次元的位置が示される(上)。スリーブホルダーはScrew Trajectory上に近づくと緑に変わり(下)、その後ロボットがScrew Trajectoryの微調整を行う。

5. スリーブホルダーにスリーブおよびドリルガイドを設置する。
6. Software 上で、Planning した PS Trajectory とドリルガイドの Trajectory が一致していることを確認する (図 6)。

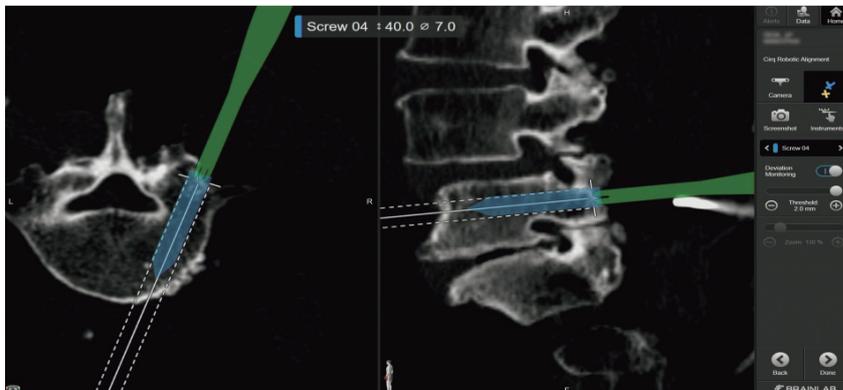


図6 青は計画したScrew Plan、緑はドリルガイドの位置を示す。

この際、ロボットのアームが軟部組織に押され、ドリルガイドの Trajectory が Planning した Trajectory より内側にずれることが多いが、その場合はスリーブに手を添え外側に軽く引くことで修正される。最終的に Planning した Trajectory とドリルガイドの Trajectory が一致していれば、ドリルガイドの先端は Planning の際に作製した Pit の位置にくるはずである。

7. ドリルガイド先端にはスパイクがついている (図 7)。



図7

ハンマーを用いてスリーブおよびドリルガイドを軽く叩き、スパイクを骨に食い込ませると、ドリルガイドは安定し、強固に固定される (図 8)。

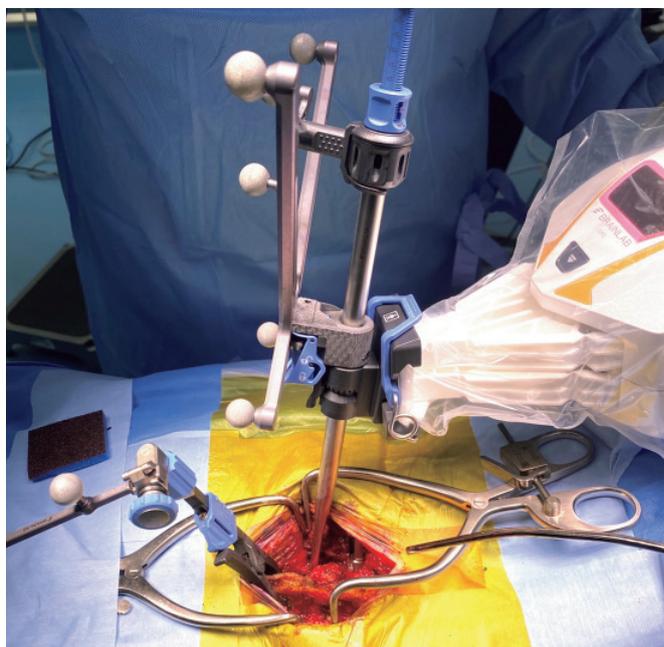


図8

8. ϕ 3.2mm の手回しドリルを用いて、Pilot Hole を作製する (写真 9)。
9. その後のタッピング、PS 刺入は術者が行う。
10. 続く PS でも同様の操作を繰り返すが、その度に Navigation System の精度を確認する。

Cirq[®] を使用した椎弓根螺子刺入の実際を紹介した。前述の如く、Cirq[®] を含めた脊椎手術用ロボットは Navigation System と連動している。つまり、ロボットの精度は Navigation System の精度そのものである。そのためロボット補助下に正確な Pilot Hole を作製するためには、Navigation System 自体の精度に問題がないかを常に確認しておくことが必要である。また、ロボット自体は外科医にとってブラックボックスである。我々も初期において、術中に Cirq[®] の Software がフリーズして動かなくなり、その後通常の PS 刺入に切り替えたことが数度あった。言うまでもないが、ロボットによる補助が得られなくなる状況を想定した手術計画は必須である。

我々は、数例の胸腰椎への PS 設置の経験の後、頸椎の PS 設置にも Cirq[®] を使用している。スクリュー挿入には、Curve[®] ナビゲーションシステムと互換性のある VIPER PRIME[®] と SYMPHONY[™] のナビゲーション専用デバイスを用いている。頸椎は椎骨動脈が走行するため、胸腰椎より高い精度の PS 設置が求められる。また、椎弓根が細く、PS Trajectory は convergent であり、さらに術中の姿勢を強固に固定することができないため、プローブなど Pilot Hole を作製する器具のわずかな力で椎体が回旋してしまい、PS の設置は胸腰椎に比して Technical Demand が高い。しかし、ロボットを使用すれば、PS Trajectory はロボットが示してくれるため、Pilot Hole 作製の際に手ブレを気にする必要がないだけでなく、ドリリングに余計な力が加わることはない (頸椎では ϕ 2.4mm の手回しドリルを使用)。また、PS Trajectory は convergent であるが、ドリルガイドの先端のスパイクを骨に打ち込むことで、ドリルガイドはしっかりと固定される。ロボットがその真価を発揮するのは、頸椎 PS ではないかと思っている。

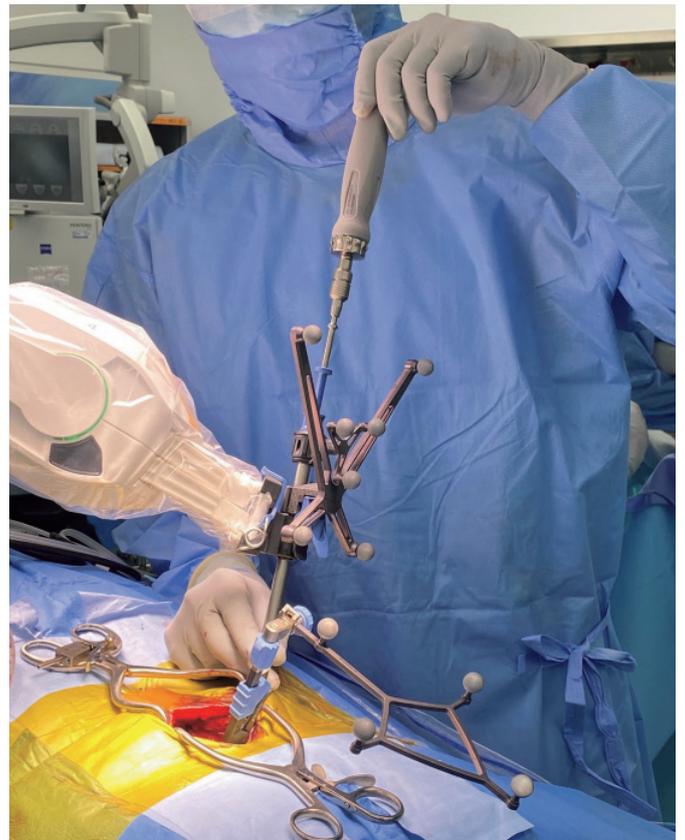


図9

Digital Spine

— 脊椎低侵襲手技 (MIST) を支えるデジタル技術 —



はじめに

① “Digital Spine” とは？

“Digital Spine”て、何ぞや?と、思われていることと思います。私も実際にわかっていませんが、事のいきさつを少々。

“Digital Spine”との出会いは、2019年暮れに、深圳で開催された第一回 Digital Spine Meetingにあります(図1、2)。私自身、Digitalと呼べる何か特別

な事をしているわけではなかったのですが、中国の“Digital Spine”のイメージに沿う進歩・発展の程度に興味があったことや、古くからの友人である北京大学深圳分院の于教授にお誘いいただき、参加して参りました。



図1 深圳：経済特区・シリコンバレー
北京、上海、広州の次、第4の都市
人口(2021)：1,768万人
GDP(2021)：3.07兆元(約49兆円)

河の東側では水田・農村風景が広がるが、西側では超高層ビルが立ち並ぶ。勢いある深圳の街での開催は、今後のDigital Spineの発展を予感させる。



図2 1st Digital Spine Meeting
Dec. 14-15, 2019, Shenzhen

“Digital Spine”との出会い
Founding meetingに参加して。

結果としては、Digital Spine 学会の founding meeting であり、その内容は予想通り Navi. や 3D model などの演題が並んでおりました。中にはリモート・遠隔手術などの近未来を期待させる演題も少々ありましたが、まだまだこれからの感です(図3)。もちろん我が国でも状況も、さして変わらない様に思われます。スピード感としては彼の国の方があるかもしれません。

まずは、“Digital Spine” の位置付けはともかく、この分野の今後に関しては大きな期待あるところですし、避けて通れないところでしょう。未来志向の画像加工、評価や手術技術などの先進的な分野に接し・体現する機会、情報共有できる場を提案出来たらと思っております。

この“Digital Spine” の響きに、魅せられています。様々なシチュエーションで、この“Digital Spine” が俎上に載ることを願ってやみません。

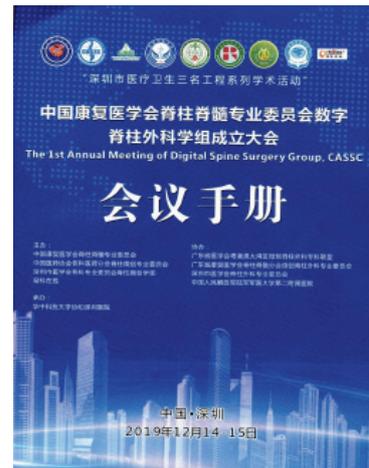


図3 1st Digital Spine Meeting プログラム
総論(中国におけるDigital Spineの現状と今後) 1

CT, Navi.	11
3D model	9
5G / remote	2
MIST	6
case discussion	4 / 演題

② Digital Spine に想いを巡らせて (図4)

さて、Digital Spine の内訳について、考えてみますと、

- ① Topics に関しては、
 - CAOS / navi., robotic surgery
 - Image / AR, VR, MR
 - AI
 - 3D model
 - OR / hybrid-, remote-
- ② 範囲、方向性に関しては、
 - research
 - education, teaching
 - management
 - business

など、様々な切り口が考えられます。また、

- ③ 立ち位置、レベルにおいても、
 - 初級：開始にあたり
 - 中級：実施 / 運営において
 - 上級：展開を見据えて

その完成・到達度や進行度によるステージには、個々の背景・事情があることと思います。できるだけ先生方のモチベーションに合致した機会となればと思います。そして、その参加には、地域性やメーカーまたはユーザーとしての立場などの隔たりなく、自由闊達な討論が展開されることを期待しております。

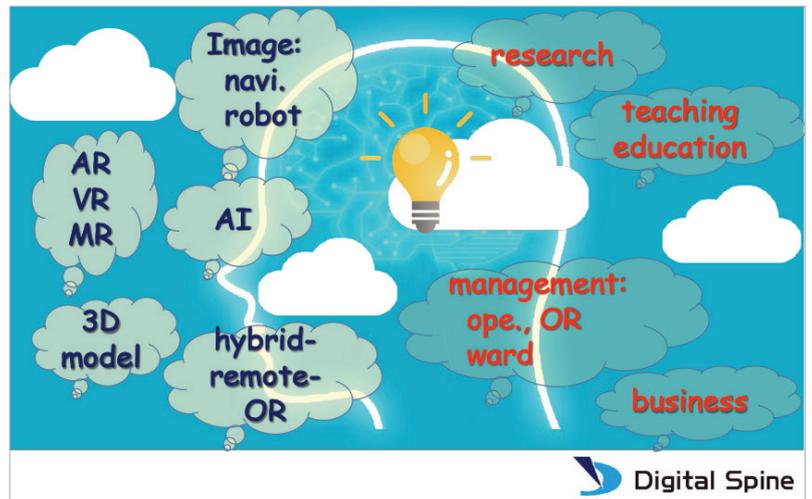


図4 “Digital Spine” に想いを巡らせて
Topics : CAOS / navi., robotic surgery
Image / AR, VR, MR
AI
3D model
OR / hybrid-, remote-
Area, Direction : research
education, teaching
management
business

③ Digital Spine のこれまでの取り組み (図5)

これまでの取り組みについて、お話しします (図 5-1)。

① 2021/11/26 JASMISS (日本低侵襲脊椎外科学会) に始まります (図 5-2)。

“Digital spine symposium” と銘打って、できるだけ多くのトピックを網羅しました。先述の Digital Spine Meeting の founder である Prof. Yi 先生の挨拶に始まり、Digital spine の現状について、T. Kanemura 先生 (日本)、R. Kuang 先生 (中国) に基調講演をお願いしました。また、“夢であった、夢でなかった” リモート手術室に関する講演 (栗栖 薫 広島大学名誉教授、村垣 善浩 東京女子医科大学教授) を中心に、1日通して Navi.: 6、Robotic Surg.: 4、Image / AR, VR, MR: 6、3D model: 3、AI: 5 の 29 演題を進め、最後の Free Talk (座談会) では、石井 賢教授、安倍 雄一郎先生、成田 渉先生に舵取りをお願いしました。セッションの事前打ち合わせもなく、まさしく free talk の形態でしたが、3名の先生方の巧みな話術、運営、コントロールにより、演者および聴衆の先生方にも、印象深い、心に残るセッションであったものと思っております。と同時に、今後の Digital Spine セッションのあり方を示してくれた機会でした。

② 2022/6/25 MIST (最小侵襲脊椎治療学会)

“AI は水戸黄門様の印籠か?”

Digital Spine 分野は、脊椎低侵襲手技を支える重要な位置を占めるものと考えますが、その内容および方向性とも多岐にわたります。よって、今回は、牧 聡 先生および佐藤 洋一 先生をコーディネーターに迎え、AI をテーマに展開しました。AI 研究の開始からその実施・運営、将来的な実装など、様々なステージでの実際を、free talk の形態で語って頂きました。

- 2021/11/26 JASMISS学会
Digital spine eymposium
- 2022/6/25 MIST学会
“AIは水戸黄門様の印籠か?”
- 2022/9/2 JPSTSS学会
“Digital spineの進歩”

図5-1 Digital Spine の取り組み

③ 2022/9/2 JPSTSS (日本脊椎・脊髄神経手術手技学会)

“Digital spine の進歩” とのテーマで、整形外科の先生のみならず、脳外科領域の先生にも、Digital Spine の内容・取り組みをご案内しました。CAOS 関連の実際や画像技術の進歩、AI 研究の実用性・将来性について紹介しました。

図5-2 “Digital Spine” symposium (11/26, 2021)

trend or summary	3
Navi.	6
Robotic	4
Remote OR	2
Image / AR, VR, MR	6
3D model	3
AI	5 / 演題

Digital spine symposium 2021/11/26

Digital spine 1: Navigation, Robotics			ランチョンセミナー			Digital spine 2: AI, 3D printing, VR, AR																													
First greeting by Weihong Yi			LS (1)	Remote OR (1)	栗栖 薫	DS2-1-4	AR	Zhewei Ye																											
DS1-1-1	Navi. PLIF	Weihong Yi	LS (2)	Remote OR (2)	村垣 善浩	DS2-1-5	AR VR	Tezuka Fumitake																											
DS1-1-2	Navi. OLIF	Xiaojian Ye	Trends of Digital Spine			DS2-1-6	3D model	Binsheng Yu																											
DS1-1-3	Navi. OLIF	Hongxun Sang				DS2-1-7	3D model	Yoshiharu Kawaguchi																											
DS1-1-4	Navi. Tumor	Dazhi Yang	DS2-1-1	Trends of D.S.	Lei Kuang	DS2-1-8	3D model	Yuichiro Abe																											
DS1-1-5	Navi. Cervical	Masataka Ueda	DS2-1-2	Trends of D.S.	Tokumi Kanemura	<table border="1"> <tr> <td>DS2-2-1</td> <td>AR VR</td> <td>Wataru Narita</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-2</td> <td>AR VR</td> <td>Morimoto Tadatsugu</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-3</td> <td>AR VR</td> <td>Norihiro Isogai</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-4</td> <td>AR VR</td> <td>Hiroyuki Ogawa</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-5</td> <td>AI</td> <td>Maki Satoshi</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-6</td> <td>AI</td> <td>Sato Yoichi</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-7</td> <td>AI</td> <td>Humito Yabu</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-8</td> <td>AI</td> <td>Ken Nagahama</td> </tr> <tr> <td>DS2-2-9</td> <td>AI</td> <td>Hosotani Kazunori</td> </tr> </table>			DS2-2-1	AR VR	Wataru Narita	DS2-2-2	AR VR	Morimoto Tadatsugu	DS2-2-3	AR VR	Norihiro Isogai	DS2-2-4	AR VR	Hiroyuki Ogawa	DS2-2-5	AI	Maki Satoshi	DS2-2-6	AI	Sato Yoichi	DS2-2-7	AI	Humito Yabu	DS2-2-8	AI	Ken Nagahama	DS2-2-9	AI	Hosotani Kazunori
DS2-2-1	AR VR	Wataru Narita																																	
DS2-2-2	AR VR	Morimoto Tadatsugu																																	
DS2-2-3	AR VR	Norihiro Isogai																																	
DS2-2-4	AR VR	Hiroyuki Ogawa																																	
DS2-2-5	AI	Maki Satoshi																																	
DS2-2-6	AI	Sato Yoichi																																	
DS2-2-7	AI	Humito Yabu																																	
DS2-2-8	AI	Ken Nagahama																																	
DS2-2-9	AI	Hosotani Kazunori																																	
DS1-1-6	Navi. Scoliosis	Miyazaki Masashi	DS2-1-3	TMISS DMISS	Yue Zhou																														
DS1-2-1	Robot	Michael Winking																																	
DS1-2-2	Robot	Sohei Ebara																																	
DS1-2-3	Robot	Tsutomu Akazawa																																	
DS1-2-4	Robot	Tokumi Kanemura																																	

Digital spine 3: Free Talk / 座談会

④ 当科の取り組み

Digital Spine と呼べるほど特別な事をしていないとは思っていますが、すでに日常診療、研究にもその始まりを見ることができます。

□ Navigation:

一番イメージしやすいトピックでしょう。今までにも、ナビゲーションを用いたスクリー刺入精度の向上の報告が多くあります。当科からも頸椎スクリー刺入精度について報告しています(2017 辻、2021 山根)。それによると、Grade 2 以上は、8～15%でした。この値の大小は、対象症例や術者のプランニングや術中対応の方向性により多少の差があるものと考えます。

ナビゲーション技術への期待は、positive な経験を持った脊椎外科医において、より高まります。ナビゲーション導入時における術者のナビゲーションへの期待度を、以前報告しました。頸椎スクリー刺入そのものにリスクあることは承知しておりますが、椎弓根径が小さく、刺入角度の厳しい状況において、よりナビゲーションへの期待・依存する傾向が見て取れます(図6)。

ナビゲーションの今後:

① 軟部組織への展開:我々整形外科医/脊椎外科は、S/N 比の大きな骨組織を対象としたCTベースのナビゲーションの恩恵を大きく受けてきました。さらに昨今のインプラントや周辺機器をも網羅したフルタイムのナビゲーションの発展は、術者に更なる安心感を与えることに繋がっております。

先日、コンピューター支援の放射線科および外科の学会に参加して参りました。整形外科領域以外の一般外科や脳外科分野などでは、軟部組織や腫瘍組織のナビゲーションが話題となっています。術中MRIに基づいたリアルタイムの軟部組織の描出や、腫瘍切除後の術野の変化の評価およびナビゲーションへの展開は、今後のナビゲーションのあり方を垣間見た思いでした。加えて、AR, VR, MR などの画像加工技術の進歩も、その発展の一翼を担っています。これら新技術の発展は急でしょうから、その情報に接する機会が貴重ですし、積極的に交流を図っていくべきと考えます。

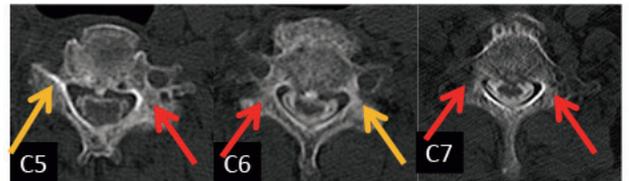
② ロボット技術:現在、一番ホットな分野です。その期待には、ナビゲーションを上回る精度や術者への負担軽減があるかと思えます。もとより施設レベルでの案件ですので、すべての脊椎外科医がその恩恵を享受できるわけではありませんが、少なくともその動向には、アンテナを張り巡らせておきたいものです。また、すでに導入された施設からの機器の導入・設定における情報または経験を共有させて頂くことは、今後の導入を考慮されている先生方にも貴重な道標となることでしょう。

脊椎外科医5人による頸椎スクリー刺入における判断

Grade	0	1	2	3	4	5
Confidence	100	80	60	33	20	0 (%)
Navigation	not necessary	not required	better	necessary	required	useless
Screw insert	easy	safe	sl. difficult	difficult	tough	im-possible

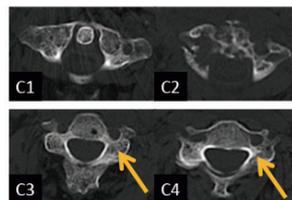
Grade 0-1: ナビゲーション なしでも可
 Grade 2: あった方が良い
 Grade 3: 必要
 Grade 4: 必須
 Grade 5: あっても不可

図6-1 脊椎外科医5人による頸椎スクリー刺入における判断
 A, B, C: ナビゲーション 利用経験あり
 D, E: ナビゲーション なし



	C4		C5		C6		C7	
	rt	lt	rt	lt	rt	lt	rt	lt
A	1	0	4	2	2	3	2	1
B	3	2	5	3	2	3	2	2
C	4	3	4	4	3	4	3	2
D	1	1	4	3	3	4	3	2
E	3	3	4	4	3	3	2	2

図6-2 72M, DSA
 脊椎外科医5人の判断は、ほぼ同様



		C3		C4	
		rt	lt	rt	lt
A	*	4	2	3	2
B	*	3	3	4	4
C	*	4	4	4	4
D	*	1	1	1	2
E	*	2	2	2	2

図6-3 69F, C2 meta.
 ナビゲーション経験者(A,B,C)は、より厳しい状況(椎弓根径の狭小など)において、その利用を求める

□ 3D—モデル

3Dプリンターの汎用性が高まり、身近なものとなりました。当科でも篠原が腰仙椎移行椎における Bertolotti 症候群において3D-モデルを作成し、術前・中での空間認識に有用であったと報告しています。

□ 外視鏡：

手術時の視点のお話です。通常の裸眼での手術から、ルーペ⇒顕微鏡/内視鏡へと微小な対象へのアプローチがなされてきました。この外視鏡(図7-1)は、基本的には、顕微鏡視の映像をモニターに描出する手法です。通常、術野における顕微鏡の設定には、手術体位や術者の立ち位置などに制約あることが多く経験されます。この外視鏡では、鏡視の方向や位置の制限が大幅に緩和され、術者にストレスのない手術環境が可能となります。またモニター画像での拡大および3次元描出は、dis-orientationの問題を回避することができます(図7-2)。何よりも内視鏡手術に慣れている脊椎外科医にとっては、馴染みのあるモニター画像が得られますので、本技術の導入はスムーズであり、その有用性に魅せられることでしょう。当科でも山根が、その導入による術中の負担軽減や、頸椎～腰・仙椎までレベルを選ばない汎用性とその有用性を報告しています(図7-3, 4)。

外視鏡の今後：

すでに顕微鏡では、画像加工技術の応用がなされています。外視鏡にても同等の画像およびナビゲーション技術の応用が期待されます。



図7-1 外視鏡



図7-2 外視鏡の設置
 術者と助手は対面し、各々のモニターを使用
 3D眼鏡による3次元での術野の確認
 カメラヘッドの設置・調整には、何ら制約ない
 術野の直上にも設置可能

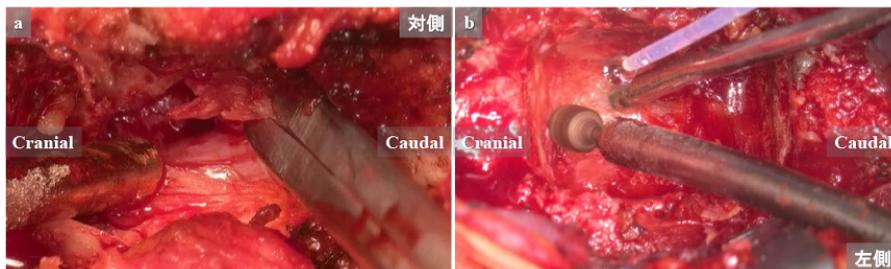


図7-3 A / LCS における対側除圧
 B / OPLL における骨化切除

	Surgical loupe	Microscope	Exoscope
Surgical working space	Excellent	Good	Excellent
Magnification, illumination	Poor	Excellent	Excellent
Orientation of surgical field	Good	Good	Excellent
Posture	Excellent	Good	Excellent
Sharing information among the surgical team	Poor	Good	Excellent
Hand eye coordination	Not required	Not required	Required

図7-4 手術用ルーペ / 顕微鏡 / 外視鏡 のまとめ
 (山根ら. 整形外科 Surgical Technique. 2022)

□ AI:

昨今、巷にあふれている“AI”ですが、我々の学会発表、論文でも“AI”の活字が多く目に留まるようになってきました。この波に乗り遅れるのは面白くありません。ただ、AIを錬金術のごとく、盲目的に追従するのも良しとは、したくありません。AIは、個人展開可能な“小”デジです。その体験を紹介します。

私どもは、脊椎・脊髄疾患において、MRI (Time-SLIP 法) による非侵襲的脳脊髄液 (CSF) flow の研究を推し進めて参りました (図 8-1,2,3)。津山工業高等専門学校 細谷 和範 教授との共同研究であり、その次なる方向として、AI手法を応用し、このCSF flow 画像からの圧迫度測定を目指しています。ただ、必要な臨床データは膨大となります。現在、その前段階として、脊椎-流動ファントムによるCSF flow の再現、画像および圧迫測定データ (図 8-4) からAIを用いた圧迫モデルの推論を行って参りました (図 8-5)。現時点で、“二値分類”(流れの向き:左 or 右、流路内の凸部/凹部:ある or ない) であれば十分に学習と推論が可能となっています。現在、次なるステップとして、流速を段階的に分類・評価する“多値分類”を目指しています。

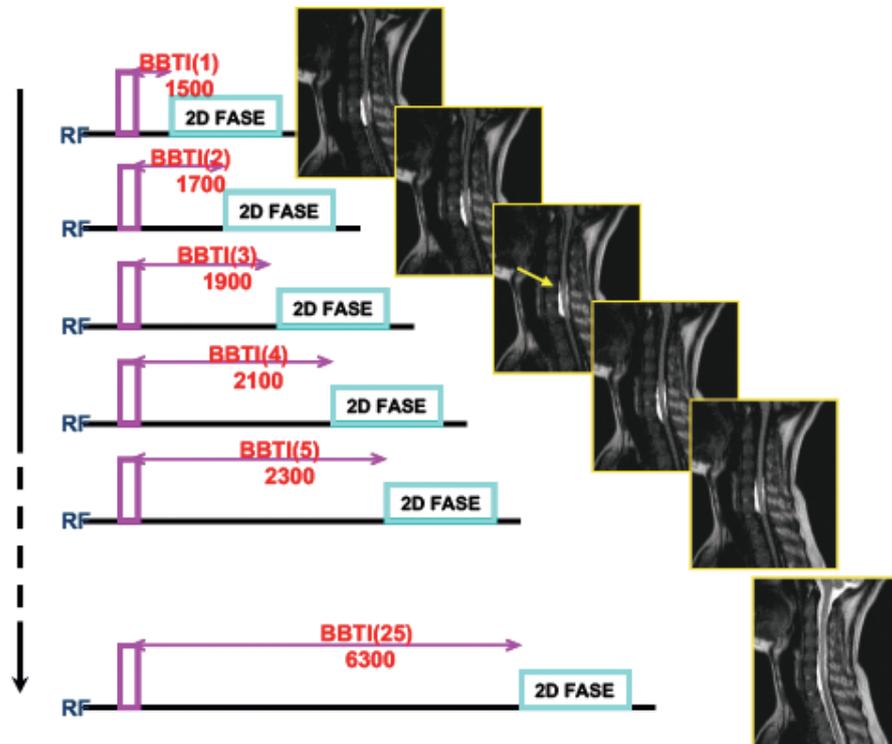


図8-1 Time-SLIP(Time-spatial labeling inversion pulse) 法
選択的な inversion recovery(IR) パルスおよび位相差撮影により、ターゲットとする流れを可視化

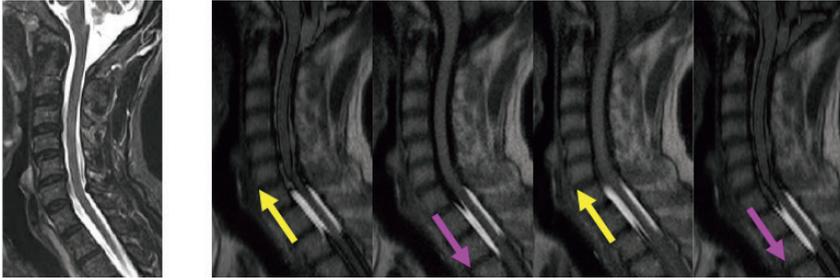


図8-2 CSF flow (頸椎) flow in(赤色)とflow out(黄色)の往復する流れが観察

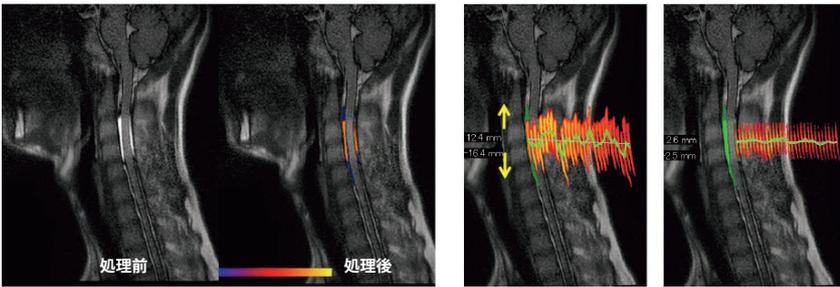


図8-3 CSF flow 画像解析のデジタル化 ①
CSF flow の変位の振幅の大きさ (≒速さ) を可視化し、評価

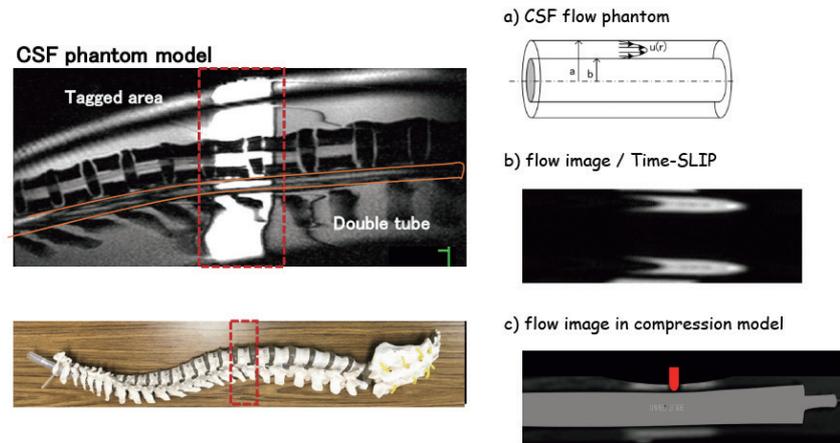


図8-4 ファントムモデルを用いたflow 実験
a / ファントムモデル
b / Time-SLIP による flow image
c / 圧迫モデルでの flow image

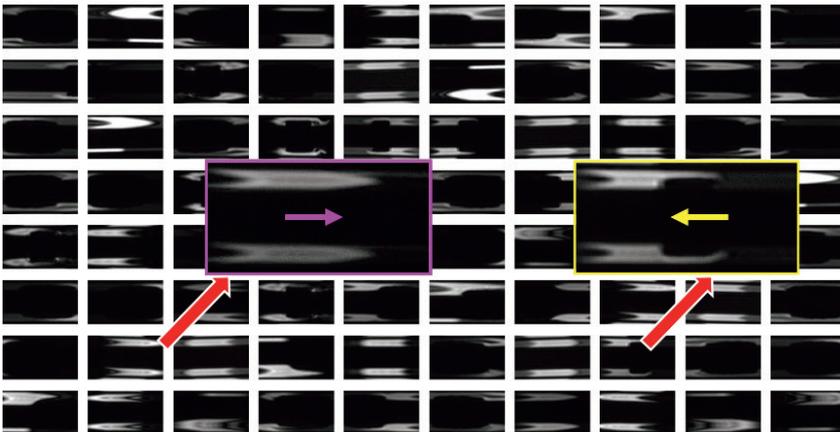


図8-5 CSF flow 画像解析のデジタル化 ②
AIを用いた解析

⑤ 今後のDigital Spine

#2 でも述べましたが、Digital Spine には、様々なトピック、分野、方向が含まれます。これらすべてを一度に網羅していくことは困難です。そして、対応する我々にも、個人的な背景や関心には差があります。もちろん所属の組織や施設における制約も無視できません。

これから Digital Spine を推し進めていくに、以下の key word を用いて整理してみました。

□ 分野 (図 9-1) :

① “大” デジ：施設、設備に関する分野

(Navi.、Robot、Image、顕微鏡、内視鏡、外視鏡、リモート手術、手術室など)

⇒ 見学ツアー、情報交換の場を提案

② “小” デジ：個人展開可能な分野

(AR・VR・MR、AI、3D モデルなど)

⇒ セミナー、ハンズオンセミナーの機会を紹介

□ 立ち位置・レベル：開始 ⇒ 実施・運営 ⇒ 展開

① 初級：開始にあたり

学ぶきっかけ、アイデアを実行に移す際の準備や戸惑いに対して

② 中級：実施 / 運営において

実施中の困難、問題点への対応に関して

③ 上級：展開を見据えて

今後を見据えた技術や製品の応用や実装に関して分野を

超えたグループの拡充を個人のレベルや興味に応じた内容や解決法などが、ご提案できればと思っております。

皆様とともに “Digital Spine” を、想像し、創造していく努力を目指しております。

皆様のご意見およびご参加をお待ちしております (図 9-2)。



図9-1 “大”デジ “小”デジ



図9-2 “Digital Spine” 想像し、創造していく努力を

最後に：

“Digital Spine” に関心のある先生方は、下記の QR コードより登録ください (図 9-3)。

個々の背景・事情があることと思いますが、できるだけ先生方の条件やモチベーションに合致した機会を、ご提案できればと思っております。

また見学ツアーやセミナーなど、皆様と触れ合う場面を大切にしながらご提案・ご案内していきたいと思っております。



図9-3 Digital Spine 参加用QRコード (MISS VOICE)

