



スマート治療室から展開する遠隔医療

村垣, 善浩
正宗, 賢
川俣, 貴一

(Citation)

脳神経外科ジャーナル, 33(7):496-500

(Issue Date)

2024

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2024 日本脳神経外科コンgres

Creaticve Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100498942>



スマート治療室から展開する遠隔医療

村垣 善浩¹⁾²⁾³⁾⁴⁾，正宗 賢³⁾，川俣 貴一⁴⁾

1) 神戸大学未来医工学研究開発センター，2) 同 大学院医学研究科医療創成工学専攻，3) 東京女子医科大学先端生命医科学研究所先端工学外科，4) 同 脳神経外科

情報技術 (information technology: IT) を用いた情報誘導手術

情報の最も適切と考えられる定義は Goldratt が提唱する「意思決定に必要なデータ」であり，情報技術 (information technology: IT) を用いた外科手術は，意思決定に必要なデータとその処理や表示技術を用いた手術と考える⁴⁾。一方，近年デジタルデータが増加したにせよ，従来の外科手術の意思決定は豊かな経験とそれに裏打ちされた暗黙知——構造化されていないアナログ的な決定プロセス——により行われており，属人的で正確な伝承も困難である。暗黙知を客観的な形式知に変換し，誰でも判断しやすい情報を提供する IT 手術を実現できれば，手術結果の再現性が高まり手術成績の高度均てん化が図れる。具体的なプロセスは，術中の意思決定に必要なアナログ生体信号を可視化し，デジタルデータ化 (digital transformation: DX) し，情報化することである (Fig. 1)。

われわれは，この IT 手術の原型とも呼べる情報化した多種類の可視化データによって判断を支援する情報誘導手術を開発し，術中 magnetic resonance imaging (MRI) を核とするインテリジェント手術室において，神経腫瘍摘出術に適用してきた³⁾。摘出率向上と機能温存率向上とで競合がある摘出の意思決定のために必要な情報を 3 種——摘出すべき腫瘍位置や残存腫瘍を示す解剖学的情報，温存すべき運動や言語に関する機能的情報，腫瘍が周辺脳かの鑑別のための組織学的情報——に分類し，可視化や DX を実現し，術中 MRI を核としインテリジェント手術室で実現した。3 種の情報をそれぞれ取得する機器や方法は，術中 MRI¹⁾やナビゲーション，運動誘発電位 (motor evoked potential: MEP) などの機能モニタリングや覚醒下手術による機能マッピング，術中迅速病理診断や 5-aminolevulinic acid (5-ALA)⁷⁾や術中迅速フローサイトメトリー，などである (Fig. 2A)。

組織学的情報において，可視化/DX/情報化のプロセスを説明する。たとえば 5-ALA によって腫瘍を発光させて可視化するのみでも十分摘出に有用であり，映像をデジタルビデオで記録すればデジタル化されているといえ

るが，評価は強陽性，弱陽性，陰性などの順位変数のままである。一方，術中フローサイトメトリーにより 10 分以内で DNA 解析が施行できる装置を開発し⁶⁾，ヒストグラムで細胞周期を可視化するのみならず，分裂期細胞割合 (%) を悪性化指数として連続変数に定量化した後にデジタルデータ化した。さらに，328 例の神経腫瘍において悪性化指数と病理診断結果を ROC (receiver operating characteristic) 解析したところ，最適な腫瘍と正常の分別閾値が悪性化指数 7% と判明した。この閾値のデータによって，15% を示す組織は腫瘍らしい，4% の組織は周辺脳らしいと，判断が容易にそして客観的となり，意思決定を支援する情報化を可能とした⁶⁾ (Fig. 1)。このように IT 手術の効能は，生体情報の可視化とともに，できるかぎり意味のあるデジタルデータ化すなわち構造データ化する方法の開発が加速されることであり，artificial intelligence (AI) 利用のデータ基盤が構築できることである (Fig. 1)。

情報統合を行うスマート治療室

情報誘導手術を行うインテリジェント手術室では前述の 3 種類の情報を取得する機器が完全に独立し，生データの統合は不可能であった。そのため産業用で使用されていた機器オペレーティングシステム (OS) とアプリをつなぐためのミドルウェアを応用し，手術室内の機器をネットワークで接続したのがスマート治療室である (Fig. 2B)。スマート治療室は，基本版が広島大学，標準版が信州大学⁵⁾，高機能版が東京女子医科大学病院に導入され，2018 年に世界で初めてネットワークで 20 以上の機器を接続し時間同期され統合した情報で意思決定を支援する IoT (Internet of Things) 手術が信州大学で行われ，東京女子医科大学では 400 例以上の神経腫瘍中心の手術が行われた。

スマート治療室では，顕微鏡や手術室ビデオカメラからの映像，心電図や血圧などの一般生体信号のモニタリング機器や麻酔器，そして 3 種の情報を提供する各機器から，時間同期されたデータが取得でき，各情報をマル

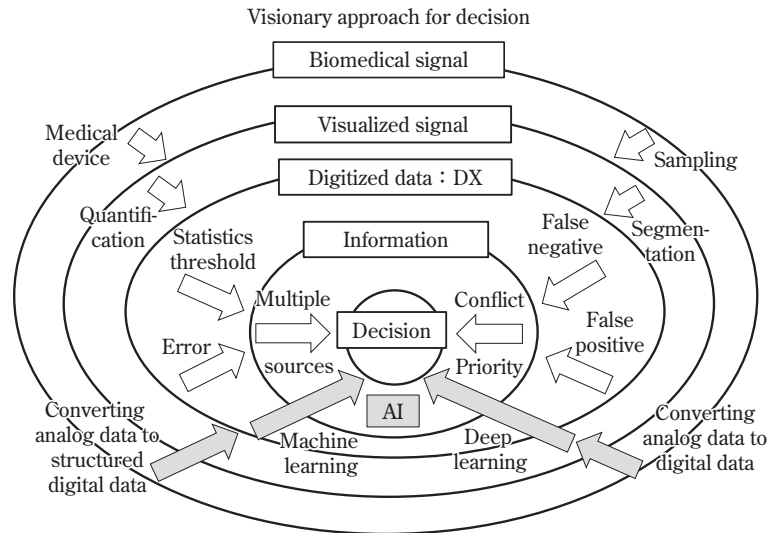


Fig. 1 Visionary approach for decision⁴⁾

Visualization of biomedical signal is a key factor for dramatic development of medicine such as medical device CT and MRI and sampling of tissue have changed diagnosis. To analyze the visualized signal, we should digitize data itself by quantification of signals and segmentation of images. The digitized data can be something simple and random, and data should be processed, or organized by minimizing an error, or eliminating false negative and false positive, to transform data to information. In addition, we had better to determine a threshold through statistical processing. Decision should be made by information from multiple sources. Concordance of information from multiple sources could strengthen doctor's own decision. Conflict or dilemma of information from multiple sources might happen and demand doctor's policy which information has priority. We live in an age where AI can perform this information processing instead of general statistical processing, but in order to perform deep learning or machine learning, it is necessary to convert analog data into digital data or structured digital data, respectively.

DX : digital transformation, AI : artificial intelligence

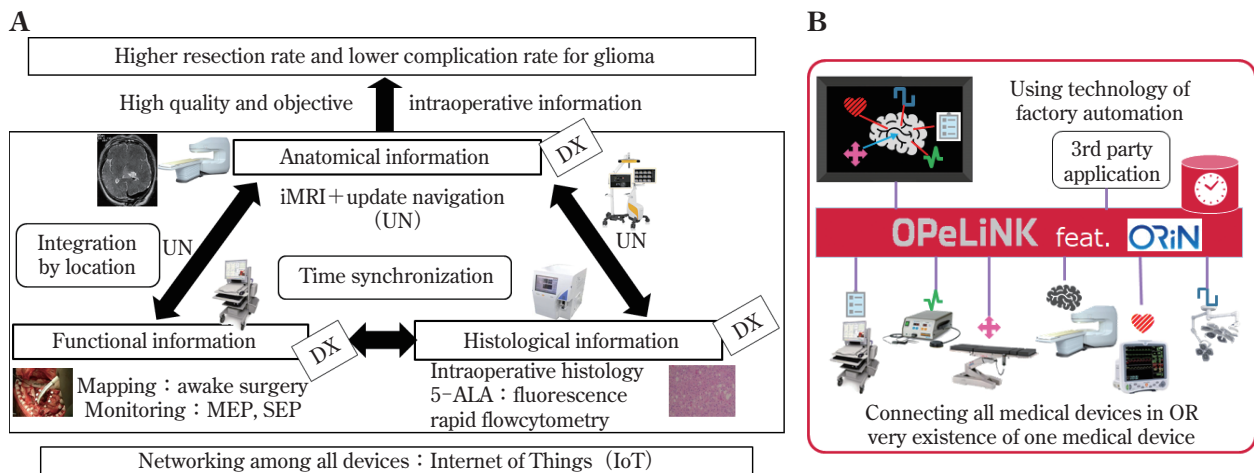


Fig. 2 A : Information-guided surgery for glioma resection at Smart Cyber Operating Theater (SCOT). To maximize resection rate and minimize complication rate, we need various kinds of information such as, anatomical, functional, and histological information. All devices providing each information are networked by middleware and all data was time-synchronized. Anatomical information is integrated to functional and histological information by update navigation (UN).

B : SCOT network using middleware. By using middleware (OPeLiNK), which is an application of ORiN used in factory automation, surgical equipment from various companies is connected and time-synchronized data is displayed on an application on the strategy desk.

iMRI : intraoperative MRI, DX : digital transformation, MEP : motor evoked potential, SEP : sensory evoked potential, 5-ALA : 5-aminolevulinic acid

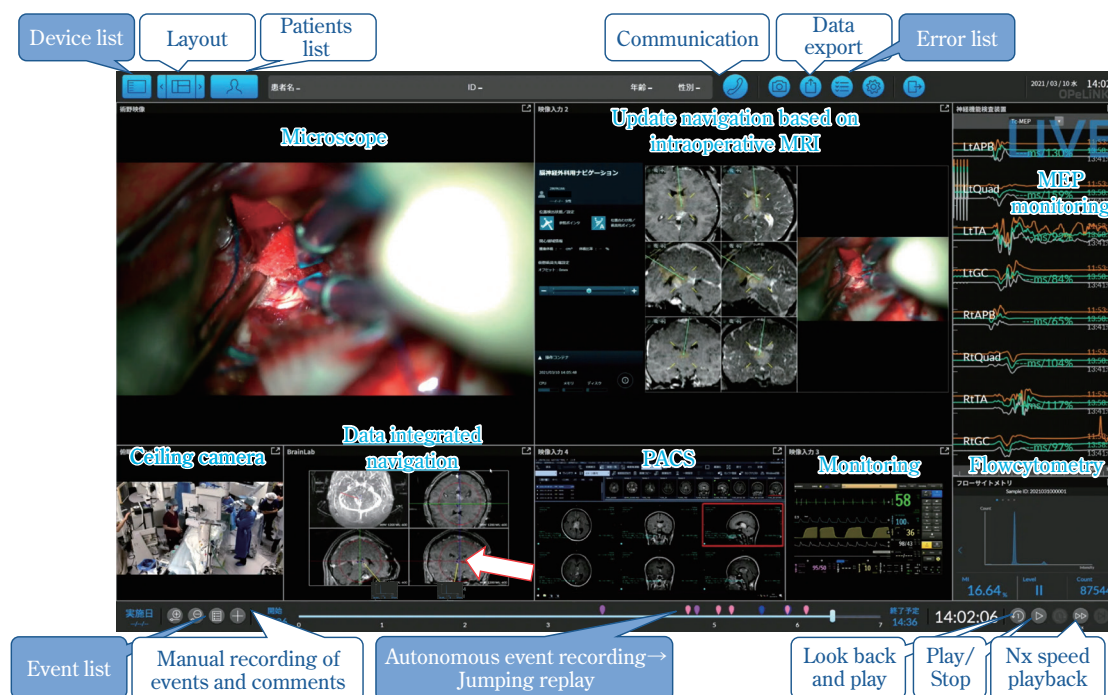


Fig. 3 Strategy desk screen for a thalamic glioma case

Anatomical information (intraoperative MRI and navigation), functional information (motor evoked potentials), and histological information (flowcytometry) are displayed along with microscopic images, operating room camera images, and patient monitoring. Information integration is also possible where the biopsy site is tagged and displayed in the navigation (arrow). It is possible to communicate with the surgeon and supervising physician through voice and image drawings, and to play back recordings during surgery to provide feedback for decision-making.

チ画面で提示する戦略デスクと呼ばれるアプリによって、モニター上に表示される (Fig. 3)。

スマート治療室は、残存腫瘍含めて頭蓋内画像を示す術中MRIを核としたシステムであり、意思決定を支援するIT手術が施行されている。

情報通信技術 (information and communication technology : ICT) を用いた戦略デスクによる遠隔手術指導と記録コンテンツによる手術教育

戦略デスクにおける情報統合の基盤となるのが、空間の位置情報をもつ手術ナビゲーションである。たとえば、戦略デスクでは、術中に組織を採取した場所をナビで記録し、その組織のフローサイトメトリーの結果をリンクしてナビゲーション画面上に表示することや、MEP結果をその時間の手術操作部位にリンクして表示することが可能である (Fig. 3)。すなわち、時間と空間のデータがタグ付けされた質の高い情報が提示・記録されることになる。デジタル記録のため記録中にも振り返りが可能であり、MEPが低下した際にどの部位を操作してい

たかを術後のみならず術中にプレイバックすることが可能である。また術後にもチーム内での振り返りが可能であり、フライトレコーダーのようにインシデントやアクシデントの原因探索にも耐えられる本質的な情報が時間同期して記録されている。現在、訓練医の教育として、あるいは熟練医の手術前術式検討を目的として、個人情報マスクされ重要なポイントにフラグが立ち術者のコメントが付与されている戦略デスクを含めた手術動画が、登録会員用にウェブ上で閲覧可能である。また、働き方改革も視野に入れ、簡易版の戦略デスクが術後手術動画の編集時間短縮のために開発されている。機器のネットワーク化によって実現したこのIoT手術は、これまで分散してアナログ的に利用が行われていた各種術中データを、統合しデジタル化のうえで一括表示記録することにより意思決定を支援する。その効能は、手術チーム内の口頭でのデータの一部伝達により生じる情報ロスのリスクを低減するとともに、情報共有さらには意思決定の均てん化に貢献することである。

戦略デスクは、手術室内のモニター上に表示されるとともに (Fig. 4A)、手術室外の医局や教授室などに設置したモニターから閲覧し指示が可能で、5G携帯端末な

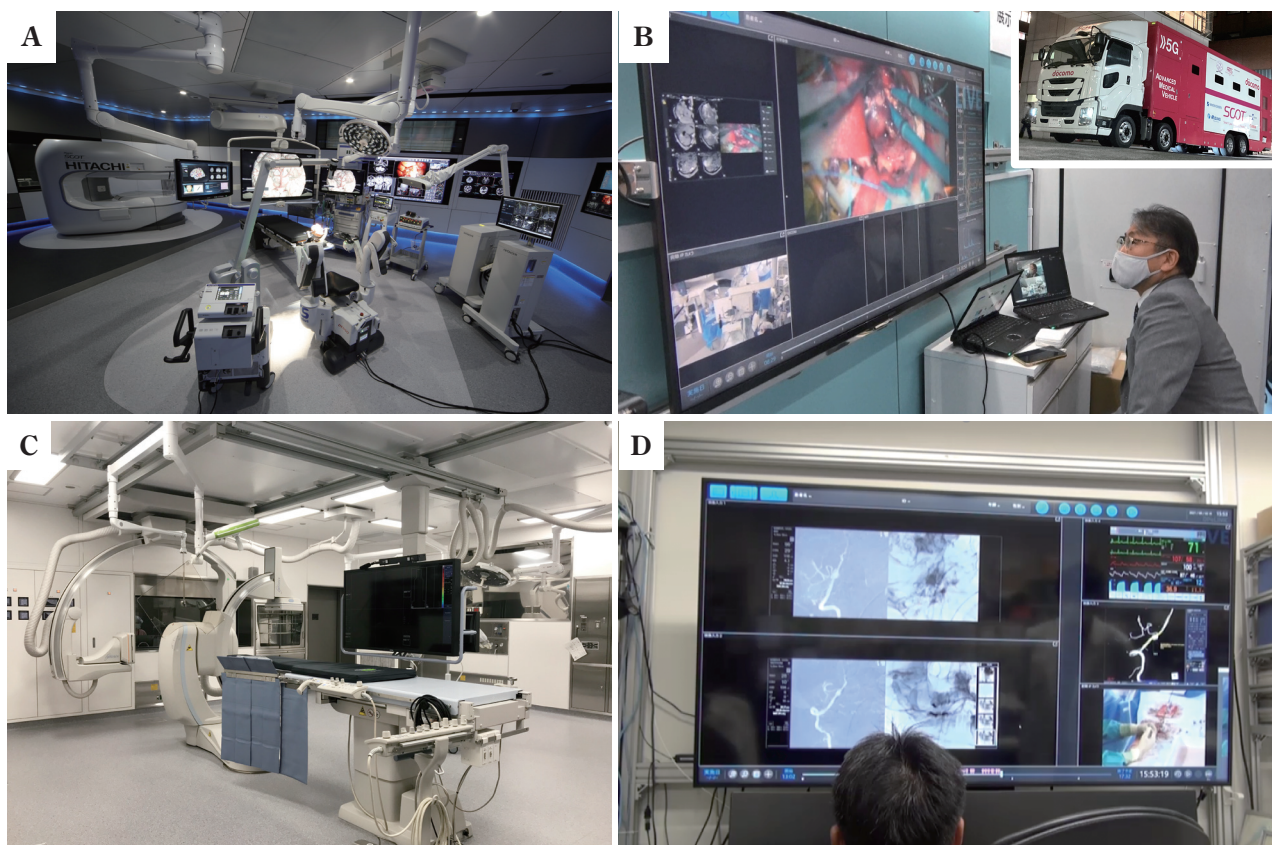


Fig. 4 Telemedicine using hyper type of Smart Cyber Operating Theater (hyper SCOT)

Emergency surgery was performed in the hyper SCOT M with an intraoperative MRI (A), and the instructor provided remote surgical guidance (B) using a 5G connection in the mobile SCOT (inset in B). Endovascular treatment was performed using a newly approved flow diverter at hyper SCOT A equipped with an angiography device (C), and the instructor provided some remote surgical guidance using the in-hospital LAN (D).

どを用いて遠隔地から閲覧することも可能である (Fig. 4B)。遠隔指示は音声のみならず、顕微鏡画面上で操作必要部位を“お絵描き”機能で示すことも可能である。従来の顕微鏡や内視鏡画像のみによる遠隔手術指導 (tele-mentoring) は画素数や通信速度に大きく依存するが、手術チームの様子やナビゲーションの操作部位や MEP 含めてさまざまな情報を同時に見ることができスマート治療室では必要で適切な助言ができる可能性が高い。実際に指導医が学会中の緊急手術において、海外の戦略デスク上のフローサイトメトリーの結果から手術方針を指導した症例も経験した。必要情報を示す戦略デスクを用いれば、空間を超えてベストメンバーで手術チームを構成できる可能性がある。これらは遠隔手術指導と呼ばれ、手術支援ロボットを遠隔から手術を一時的に代理施行する遠隔手術支援、遠隔からのみでロボットを操作して手術を行う遠隔手術などを含めて、ICT 技術を利用した手術すなわち ICT 手術と考えられ、外科中心に臨床研究が行われている。ICT 手術の効能は、手術室内のチームメンバー内の正確で効率的な情報共有が可能

になり、さらに高速大容量低遅延の通信環境下では、空間を超えた手術チームが編成できることである。

今後の脳神経外科分野における IT や ICT の展望

神経腫瘍手術のみならず、他の開頭手術や血管内手術 (Fig. 4C)、そして機能的脳神経外科手術において、可視化/DX/情報化が進むと考えられる。そのうえで2種類以上の情報を統合するスマート化が進み、保険収載の課題が解決できれば、通信技術の進歩とともに信頼できる遠隔手術指導 (Fig. 4D) もより広く行われるようになると思われる。

さらに、デジタル化できた手術や診断治療においては、情報化のためさまざまなAIが利用されることが考えられる。実際に、われわれは最近注目の多種類情報による multimodal AI を先駆けて用いた神経腫瘍の術前遺伝子分類予測²⁾や、術中 MRI 画像の artifact 低減や brain shift 予測に関してAIを用いた研究を発表しており、類似症例

検索や術中予後予測研究を行っている。

現在対象外となっている脳神経外科領域において新規の手術ロボットが開発されれば、遠隔手術や遠隔手術支援、さらには遠隔手術室や遠隔治療室なども開発のスコープに入ってくると考える。

COI

著者全員は日本脳神経外科学会へのCOI自己申告の登録を完了しています。本論文に関して開示すべきCOIはありません。

文 献

- 1) Kubben PL, ter Meulen KJ, Schijns OE, ter Laak-Poort MP, van Overbeeke JJ, van Santbrink H: Intraoperative MRI-guided resection of glioblastoma multiforme: a systematic review. *Lancet Oncol* **12**: 1062-1070, 2011.
- 2) Matsui Y, Maruyama T, Nitta M, Saito T, Tsuzuki S, Tamura M, Kusuda K, Fukuya Y, Asano H, Kawamata T, Masamune K, Muragaki Y: Prediction of lower-grade glioma molecular subtypes using deep learning. *J Neurooncol* **146**: 321-327, 2020.
- 3) Muragaki Y, Iseki H, Maruyama T, Tanaka M, Shinohara C, Suzuki T, Yoshimitsu K, Ikuta S, Hayashi M, Chernov M, Hori T, Okada Y, Takakura K: Information-guided surgical management of gliomas using low-field-strength intraoperative MRI. *Acta Neurochir Suppl* **109**: 67-72, 2011.
- 4) 村垣善浩, 伊関 洋, 丸山隆志, 新田雅之, 齋藤太一, 田村 学, 岡田芳和: 可視化情報を統合する意思決定学. 脳外誌 **23**: 876-886, 2014.
- 5) Ogiwara T, Fujii Y, Hanaoka Y, Kitamura S, Kuwabara H, Funato K, Inomata Y, Yamazaki D, Yamazaki K, Murase H, Yokota A, Hardian RF, Goto T, Hongo K, Horiuchi T: Intraoperative Image-Guided Surgery for Gliomas in the Smart Cyber Operating Theater (SCOT): A Preliminary Clinical Application. *World Neurosurg* **160**: e314-e321, 2022.
- 6) Shioyama T, Muragaki Y, Maruyama T, Komori T, Iseki H: Intraoperative flow cytometry analysis of glioma tissue for rapid determination of tumor presence and its histopathological grade: clinical article. *J Neurosurg* **118**: 1232-1238, 2013.
- 7) Stummer W, Pichlmeier U, Meinel T, Wiestler OD, Zanella F, Reulen HJ; ALA-Glioma Study Group: Fluorescence-guided surgery with 5-aminolevulinic acid for resection of malignant glioma: a randomised controlled multicentre phase III trial. *Lancet Oncol* **7**: 392-401, 2006.

要 旨

スマート治療室から展開する遠隔医療

村垣 善浩 正宗 賢 川俣 貴一

従来、手術の手技自体はアナログ的であり、その意思決定の多くは暗黙知と呼ばれる経験に基づいたプロセスによってなされる。ITやICTを利用するためにはデジタルデータに変換し、形式知としなければならない。顕微鏡画像をデジタルビデオ記録することもデジタル化の1例であるが、実際に利用するためには意味のあるデジタル化（構造化）データが必要であり、さらに意思決定に必要な情報に変換することが重要である。情報への変換には、統計解析や人工知能（AI）が用いられるが、近年1つの情報のみでは精度の向上には限界があり、多種類のデータ統合やAIが解決手段の1つである。多種情報を利用する情報誘導手術においては、空間情報が付与され時間同期したデータが特に重要で、この高品質データが提供できるのがスマート治療室であり、画面上で表示し記録するアプリが戦略デスクであり遠隔手術や教育に利用できる。神経腫瘍の手術のみならず、血管内治療や多領域の手術への展開が期待されるIT/ICTと考えられる。

脳外誌 **33**: 496-500, 2024

Editorial Comment

先進的な「スマート手術室」の利点と限界

杏林大学脳神経外科 丸山啓介

東京女子医科大学に導入されているスマート手術室についての解説論文である。先進的な取り組みの紹介であり、大変興味深い。多種多様なデジタルデータを統合して手術の際の意思決定に反映させるというものであり、今後のデジタルトランスフォーメーションの進化、普及も相まって本法も広く普及

することが望まれる。一方で、本文中には言及されていない点としてハード面、ソフト面、人的な面でのコストの問題が挙げられる。多大な費用が必要なものとして推測され、一部の先進的な研究施設での導入に限られるだろう。