

仮想現実 (VR) 技術を用いたトレーニング

原 正彦^{1,2)}

— Key Words —

アフオーダンス, 再プログラミング, 点推定, 脳皮質の再編成, 非言語コミュニケーション

はじめに

近年, 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の世界的流行の影響を受け, 人対人の接触を避けるためのデジタル技術を用いた医療の効率化や, 厚生労働省が解禁したオンライン診療の枠組みを用いた新たな医療提供体制の構築に注目が集まっている。われわれは大阪大学における産学連携活動を通して仮想現実 (virtual reality: VR) 技術を応用したリハビリテーション用医療機器「mediVR カグラ」を開発し 2019 年 3 月より一般販売を開始している¹⁻³⁾。本機器は座位トレーニングで安全に治療ができる一方で, その独自性のある高い治療効果に期待が集まっている^{1,2)}。この治療効果は脳の再プログラミングという概念によって説明可能であり, 本稿ではリハビリテーション医学の分野における mediVR カグラを用いたトレーニングの実際とその臨床効果に関して概説したい。

mediVR カグラの構成と基本的使用方法

mediVR カグラは, ① VR 機器 (現在は HTC 社製の HTC VIVE または VIVE Pro Eye を使用), および ② カグラシステムを搭載したパーソナルコンピュータによって構成された医療機器 (届出番号 27B2X00324201901) である (図 1)⁴⁻⁸⁾。mediVR カグラを用いたリハビリテーションは原則として座位の状態で行う。患者はヘッドマウントディスプレイを頭部に装着し, コントローラーを両手に保持して VR 空間上に出現するさまざまな種類の標的に触れるようなリーチ動作を行う (片麻痺患者の場合はコントローラーを手や肩にバンドで固定する)⁴⁻⁸⁾。図 1 および図 2 では患者が仮想空間内に固定された静的目標物に対してリーチングを行う様子を示しているが, 例えば落下してくるボールのような動的目標物を対象とすることも可能である^{1,2,6)}。

mediVR カグラガイド下リハビリテーションの場合, 患者は三次元空間において, 目標物の座標と自身の保持するコントローラーの座標を重ね合わせるような認知処理と身体動作を同時に行う必要があり, このような動作をわれわれは「点推定」と表現している (図 2)²⁾。点推定を行うためには患者の脳内において自身の運動イメージを明確に生成しなければならず, これはフィードフォワードが強力に行われていることと同義であると筆者は考えている。そしてフィードフォワードが強力な状態において, 目標動作が達成され

Virtual reality-guided training in rehabilitation medicine

1) 株式会社 mediVR: 〒561-0872 大阪府豊中市寺内 2-4-1 緑地駅ビル 3 階

Masahiko Hara, MD, PhD: Department of Medical Device Development, mediVR

2) 島根大学地域包括ケア教育研究センター

Center for Community-Based Healthcare Research and Education, Shimane University Faculty of Medicine



図1 mediVR カグラを用いたトレーニング中の様子

脳梗塞後の右片麻痺患者。図はセラピストが歩行機能と認知機能の改善を目的として、左手に保持したコントローラーでディスプレイ画面内標的の右端にリーチングをさせている場面である。リーチングは原則として基礎疾患によらず必ず左右交互に行う。写真では右上肢の軽度の緊張状態と外転位となった右股関節が見て取れるが、リハビリテーションを20分程度進めると右上肢の緊張が緩和し、右下肢のアライメントが整うことで片脚立位や歩様が改善した。

た瞬間に視覚、聴覚、触覚の複数の感覚を刺激するような多信号生体フィードバックを行うことによってその達成を脳に報知し、患者が脳内運動モデル、あるいは認知モデルの再構築を促せるようにサポートしていく^{1,2)}。われわれはこのようにフィードフォワードとフィードバックのループを応用して学習を進める作業を脳の再プログラミングと表現している。

mediVR カグラを用いたリハビリテーションを理解するためにはリハビリテーションの戦略に関して、既存の治療概念と異なる考え方を採用する必要がある。例えば上肢機能に対しては constraint-induced movement therapy (CI 療法) や川平法など、患側を集中的にトレーニングするという考え方が昨今では一般的であると思われるが、mediVR カグラガイド下リハビリテーションでは治療対象が歩行機能か上肢機能かに関係なく、必ずリーチ動作を左右交互に促しながらトレーニングを行う。これは、脳の再プログラミングを促すために必ず健側の動きを参照しながらトレーニングを実施したほうがよいという考えに基づいている。実際、自験例において従来の方法と比較して明らかに改善スピードが早い、といった結果が得られており、後述するような劇的な臨床効果につながっている⁴⁻¹⁰⁾。

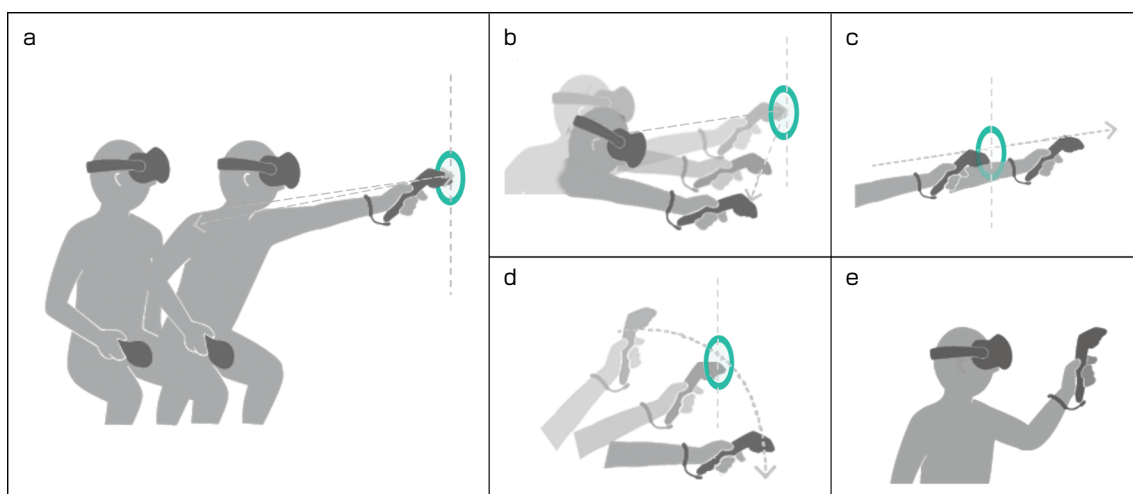


図 2 点推定の身体認知精度とリーチング動作の関係

点推定が正確に行える場合、標的内の特定の部位（例えば真ん中）に対してリーチングが可能である（a）。その際、体幹機能が十分であれば標的に触れた瞬間の位置で姿勢を保持でき、そのままリーチ動作と同じ軌跡で座位姿勢に戻ることができる（a）。一方、体幹機能が十分でない場合は標的に触れた後に姿勢が下方に崩れることが多い（b）。また、体幹を含む身体機能、あるいは認知機能の何れかに異常がある場合、点推定が正確に行えないことにより標的の中心を通り過ぎるようなリーチングとなったり（c）、あるいは上から振りかぶるような動作を加えて運動の軌跡で標的をとらえようとする（d）。空間認知能力が乏しい場合は手関節を背屈させ、視覚代償的に位置情報を把握しようとした動きが加わる（e）。これら患者動作の組み合わせによって、患者の機能障害の中心が身体機能にあるのか、認知機能にあるのか、あるいはその両方にどの程度の割合であるのかなどを判断していくことが可能となる。

適応疾患と臨床効果概要

mediVR カグラは脳の再プログラミングを促進するための複数の特許技術によって構成されており、国内外に多く存在する既存の VR 製品とはその治療効果や応用可能疾患の幅広さが明確に異なっている（図 3）^{1,2,8}。コクランの系統的レビューやメタアナリシスでは、リハビリテーション領域における VR 介入の効果はいかなる機器を用いてもきわめて限定的であると報告されている^{11,12}。しかしながら、mediVR カグラガイド下治療では座位トレーニングで運動失調、歩行機能、上肢機能、認知機能、および慢性疼痛に対して介入可能であることが報告されており^{4-10,13}、特に運動失調や半側空間無視ではリハビリテーション開始後に数分単位で即座に症状が改善していくため、セラピストからは患者が信じられないペースで改善してしまう、というような驚きの声を多くいただいている。

mediVR カグラの発売当初はその治療効果に懐疑的な意見も多く認められたが、近年では臨床現場でのデモンストレーションやエビデンスの蓄積も相まって mediVR カグラガイド下治療の効果に対する認識がかなり浸透してきたように感じている。代表的な改善例としては小脳梗塞後の上肢失調²、体幹失調⁶、あるいは廃用症候群の高齢者における歩行および認知機能⁵、脳梗塞後の上肢機能²、くも膜下出血後の注意障害⁹、脊髄梗塞後の体幹機能⁷、外反母趾症例における mediVR カグラの有用性や¹⁰、慢性疼痛に対する効果発現機序に関する総説が各種和英文誌で発表されている¹³。また、これらに加えた最新の知見は日本リハビリテーション学会や日本整形外科学会などでも紹介しており、例えば第 5 回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会の教育講演 35 では図 4 に示す 10 代の脳性麻痺児の症例提示を行い大きな反響を呼んだ。

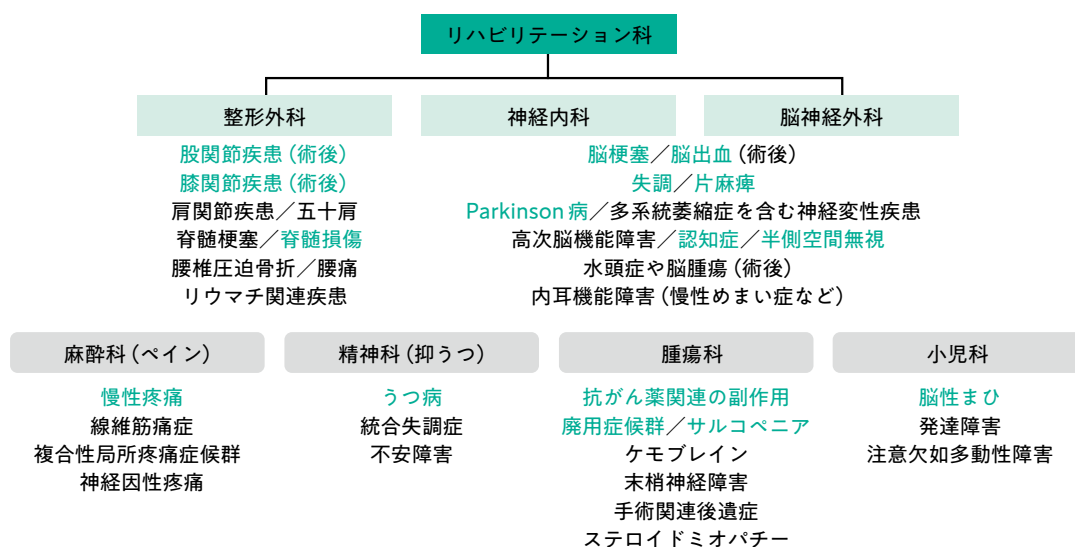


図3 mediVR カグラの応用可能疾患(文献¹⁾より転載・改変)

便宜的に疾患名と症候を同列表記している。色文字は特に応用が進んでいる疾患・症候領域を示す。



図4 脳性麻痺患者での使用例

提示症例は10代の脳性麻痺児。在胎30週の低出生体重児で出生し生後10か月で脳性麻痺と診断。5歳時に選択的脊髄後根切断術やボツリヌス療法を施行され、その後近隣施設にて外来療育を受けていた。日常生活では座位保持椅子を使用し(a)、立ち上がり動作は重介助、移動には車椅子が必要であった。mediVR カグラガイド下治療を1日20～30分、ストレッチあるいは筋肉トレーニングを1日20～30分、合計1時間弱のトレーニングを週5日程度行うことで、1週間で端座位保持が可能となり治療開始33日目に自力杖歩行が可能となった(b)。動画(c)、経過の詳細(d)は二次元コードリンクから確認可能である。

また、2021 年末にはパーキンソン病の Hoehn & Yahr 重症度分類Ⅳ以上の患者に限定した mediVR カグラ初の多施設共同前向き研究 (UMIN-CTR ID UMIN000041770) の結果が出揃い、上肢機能および歩行機能の改善に対してきわめて良好な治療効果が得られている。本稿執筆時点で英文誌への投稿の準備中であるため詳細は記載できないが、これらの効果は脳内における各種機能統合、あるいは上述した脳の再プログラミングという概念で一元的に説明可能であると筆者は考えている。

なお、現時点で mediVR カグラを用いて 5 万 4 千回以上のリハビリテーションが施行されているが、転倒イベントなどの安全性にかかわる報告は未だなく、独自技術により VR 酔いがきわめて生じにくい仕様となっていることから、mediVR カグラガイド下リハビリテーションは臨床使用上きわめて高い安全性を確保していると考えている^{1,2,4)}。

具体的な治療介入方法—① 身体機能編

mediVR カグラによる身体機能に対する治療介入は、運動失調、歩行機能障害、または上肢機能障害のいずれにおいても、原則として同じアプローチで行う。すなわち、左右交互のリーチ動作を応用して左右の坐骨への重心移動を促すことにより体幹のトレーニングを行っていく。装具は基本的にすべて外し、足底をしっかりと地面に設置した状態でトレーニングを行う。この際、可能な限りゆっくりとしたリーチング動作を行うことが重要であり、例えば目標物に「優しく触れてゆっくりと戻してください」などと声掛けをする(図 1, 2)。体幹機能の改善はあらゆる身体機能の土台を作る作業であり、体幹機能が改善することにより肩、肘、手指の順で機能改善が得られてくることから、近位から遠位に向かって治療していくイメージを持つとよい。この際、体幹保持能力に問題がある患者の場合は図 2b-d に示すような特徴的な動きをとることが多いため、これらの動作の出現の有無によって身体機能の判断や負荷量の決定に役立てる。なお、当然ながら固定された静的目標物よりは落下してくるような動的目標物に対するリーチングのほうが身体負荷は高くなる。

少しイメージしにくいかもしれないが、本来歩行は左右の重心移動の繰り返しであり、このような左右交互の座位リーチトレーニングによって十分な歩行機能の改善が得られることが実際に数多く報告されている^{1,2,5-7)}。サルコペニアの患者の場合でも mediVR カグラによるリハビリテーションですぐに歩様が改善することが多く、現在の歩行機能改善アプローチは筋力回復だけに焦点を当てすぎており、もう少し姿勢や体幹バランスへも意識を向けたほうがよいと考えている。なお、mediVR カグラを用いたリーチングでは全身の筋肉の協調運動が必要不可欠であり、リーチの高さを調整することで部位特異的なアプローチを行うことも可能である。例えば、腰痛や呼吸筋の改善には高めのリーチング、膝や足関節のコントロール賦活には臍の高さでのリーチングを促すといった具合である¹⁰⁾。

通常の診療で行われているリーチングと mediVR カグラを用いたリーチングの相違に関して一見ただけでは理解できないという意見をよく耳にするが、既存のリーチングでは点推定の要素が皆無であり、そのために十分な治療効果を得ることが難しい。点推定を促すことができれば、深層筋を強く刺激することが可能となる。例えば内外腹斜筋の収縮は既存のリーチングでも簡単に促すことが可能であるが、腹横筋を収縮させるようなリーチングは、見た目が同じでも点推定を行う mediVR カグラでしか効率的に行えない。いずれにしても、mediVR カグラガイド下リハビリテーションの臨床効果を目の前で見ただけならば、患者の状態が改善するという事実の前に、現在臨床で行われているリーチング

と mediVR カグラを用いたリーチングの違いを詳細に議論する必要性はそれほど高くないだろう。

具体的な治療介入方法—② 認知機能編

これまでのリハビリテーションでは、重度認知症や高次脳機能障害患者、あるいは小児患者に対して意図した動作を促すことが困難な場合も多かったが、mediVR カグラではゲーム的な仕掛けを応用してこれらの課題を解決した⁸⁾。つまり、小児がスイッチを見て思わず押してしまうような、非言語的かつ直感的に動作を促すことのできるアフォーダンス（環境が与える意味のこと）の高い仕組みを取り入れることで、あらゆる患者に対してリハビリテーションを実施できるようになった⁸⁾。また、アフォーダンスの高い見せ方を採用することにより、目標物を表示しながらも「リーチング動作を行わないように我慢してください」といった前頭前野の抑制系をトレーニングするための課題設定も可能となった。結果として易怒性のある患者の感情コントロールが改善する例も認め、医療スタッフの精神的介護負担の軽減を目的に mediVR カグラを導入する施設も増えている。

mediVR カグラによる認知機能に対する治療介入も、基礎疾患や症候にかかわらず原則として共通である。すなわち、目の前の肩の高さ、手を伸ばした位置の目標物を認識することが最も認知負荷が低く、そこから上下、前後、左右に空間を広げることが、それぞれ等しく認知負荷の増大につながる。認知負荷が高すぎる場合は視線が一定しなかったり、コントローラーに目線がいったりと目標に注意を持続できなくなるため、そのような際には「休憩しましょう」といって何もさせずにいったん認知負荷をゼロベースに戻す。その後リハビリテーションを再開する際にはあらかじめ目標物が表示されることを伝えたり、タッピングをうまく利用しながら認知負荷を下げた状態で目標物を出現させつつ認知すべき空間を広げたり、さらには目標物の数を増やしたりして負荷を複雑化させていく。mediVR カグラには背景情報のあるゲームとないゲームが準備されているが、基本的には背景のない環境設定の整備された空間でリハビリテーションを開始することで、自宅でのリハビリテーションに準じるような反応が得られやすい。もちろん、背景を入れるとより認知負荷の高いリハビリテーションが可能であるが、注意の選択、持続、転導、分配到障害がみられやすくなるためこういった変化に注目しながらリハビリテーションを提供する必要がある。なお、固定された静的目標物よりは、落下してくるような動的目標物に対してリーチングを行うほうが、認知負荷は高くなる。

このような視点で患者の認知レベルを評価するなかで、われわれは図5に示すように、用いる空間の広さ、目標物の大きさや数、目標達成までの制限時間、背景情報の有無から、高精度で認知機能年齢を推定 ($\text{adjusted } R^2=0.897$) することに成功し、患者の認知能力を客観的数値に落とし込んで評価できるようになった。この結果、内的動機づけが低くてリハビリテーションが行えないなどと評価されているすべてのケースにおいて、認知負荷を適切に調整することでリハビリテーションが施行可能となる経験を得た。また、高齢者の多くが認知機能の低下によって周辺環境の評価が行えないことにより自分がいる場所自体に恐怖を感じ、あたかもわれわれが高所で足がすくんで動けなくなるように fear avoidance 的に恐怖を感じることで筋緊張が高まり、本来発揮できる動作ができていないケースが多いことも判明した。

なお、VR の類似技術として拡張現実 (augmented reality : AR) や混合現実 (mixed reality : MR) 技術も存在するが、AR や MR ではリハビリテーション時の周辺状況や環

Table 認知年齢推定 及び 転倒リスク評価 推定指標

測定ルール
 ① 4秒間隔を空け、3回連続パーフェクト判定でタスクを達成できるとクリア
 ② ボールの大きさ 10cm、Interval 1秒に設定

* 水戸専門ゲームの場合は水戸ゲーム - 3才、落着きゲームの場合は落着きゲーム - 3才、野鳥ゲームの場合は野鳥ゲーム - 5才

		25 cm/秒	25 cm/秒	50 cm/秒	75 cm/秒	100 cm/秒	125 cm/秒
タスク 1こ	90度	90才	75才	70才	65才	63才	61才
	45-135度	85才	73才	68才	63才	61才	59才
	0-180度	75才	70才	65才	60才	58才	56才
タスク 2こ	90度	85才	73才	65才	55才	54才	53才
	45-135度	80才	71才	63才	53才	52才	51才
	0-180度	70才	68才	60才	50才	49才	48才
タスク 3こ	90度	-	71才	60才	45才	44才	43才
	45-135度	75才	69才	58才	43才	42才	41才
	0-180度	68才	66才	55才	40才	39才	38才
タスク 4こ	90度	-	69才	55才	43才	42才	41才
	45-135度	70才	67才	53才	40才	39才	38才
	0-180度	65才	65才	50才	35才	34才	33才
タスク 5こ	90度	-	65才	50才	41才	40才	39才
	45-135度	68才	63才	48才	37才	36才	35才
	0-180度	63才	60才	45才	32才	31才	30才

結果の背景が赤色の方



運転が危険かも知れません。
認知機能が低下しています。

結果の背景が黄色の方



運転時に注意が必要です。
認知機能が低下気味です。

結果の背景が青色の方



これからも安全運転を。
認知機能に問題はありません。

* 年齢は 25-100 才を想定
 * この指標は認知機能を評価するものではありません。
 結果に頼らず安全運転を心がけてください。

medi VR

図 5 mediVR カグラを用いた認知年齢推定表

認知年齢を推定することで、転倒リスクや運転リスクも同時に評価することが可能である。例えば 85 歳程度の認知年齢の場合、mediVR カグラを用いれば左右の識別ができず言語指示で修正できない状況、すなわちアクセルとブレーキの踏み間違いに気づかないような状況が再現可能である。

境を一定に保つことができないため、筆者は没入型の VR でなければ適切な認知負荷でのトレーニングを提供できないと考えている。

今後の課題と展望

上述したとおり、mediVR カグラによる治療効果を最大限に引き出すためには既存のリハビリテーションの概念と違ったアプローチを受け入れられる柔軟な発想が必要となる。そのため、われわれは機器導入施設に対して 3 名の医師と 10 名以上の専属セラピストによる訪問、またはインターネットを介した遠隔による指導、サポートを行い、適切な使用方法を伝える努力を行っている。mediVR カグラの使用にあたっては患者の混乱や動作の変化に適切に気づくことのできる十分な観察眼を持った、患者に寄り添えるセラピストが重要であることはいうまでもない。

また、数多くの病院施設のサポートを行うなかで現在のリハビリテーション医療の抱える問題も明らかになってきた。つまり、現状のリハビリテーションでは「治す」ではなく「単位をこなす」という考え方が中心となりがちではないだろうか。そのような問題に一石を投じるため、われわれは 2021 年 11 月 15 日に大阪府豊中市に完全成果報酬型の自費リ

ハビリテーションセンターを設立した。これは、世界初の「治す」ことを保証した施設であり、機能改善が得られない限り支払いを行う必要がない。mediVR カグラで「治せる」時代になった今、患者を「治す」技術を持ったセラピストがより大きく活躍できる時代の足音が近づいている。

まとめ

デジタル技術の医療分野での応用が進み、VR リハビリテーション機器のようなデバイスが着々と身近なものとなってきた。一方で、本稿執筆時点でリハビリテーションに利用可能な VR 医療機器は mediVR カグラと、Tyromotion 社製の DIEGO[®] のみであり、安易な非認証医療機器の使用によって医療従事者が臨床研究法や薬機法違反に問われないように注意が必要である点も付言したい¹³⁾。mediVR カグラが、最適な治療を患者に提供できる環境構築の一助となり、患者を「治す」ことに真剣に取り組むセラピストの強力な武器となってくれば幸いである。

利益相反開示：筆者は株式会社 mediVR の代表取締役であり会社株式を保有している。

【文献】

- 1) 原 正彦：VR を活用したリハビリテーション. *medicina* **58** : 864-867, 2021
- 2) 原 正彦：VR 技術のリハビリテーション医療への応用. *臨床リハ* **30** : 877-880, 2021
- 3) 浅見豊子：義肢装具領域の進歩と未来. *Jpn J Rehabil Med* **57** : 1062-1068, 2020
- 4) Hara M, et al : Safety and feasibility of dual-task rehabilitation program for body trunk balance using virtual reality and three-dimensional tracking technologies. *Prog Rehabil Med* **3** : 20180016, 2018
- 5) Omon K, et al : Virtual reality-guided dual-task body trunk balance training in a sitting position improved walking ability without improving leg strength. *Prog Rehabil Med* **4** : 20190011, 2019
- 6) Takimoto K, et al : A case of cerebellar ataxia successfully treated by virtual reality-guided rehabilitation. *BMJ Case Rep* **14** : e242287, 2021
- 7) Michibata A, et al : Electrical stimulation and virtual reality-guided balance training for managing paraplegia and trunk dysfunction due to spinal cord infarction. *BMJ Case Rep* **15** : e244091 2022
- 8) 原 正彦：ゲームがつくる患者の未来—リハビリにおける VR ゲーム技術の応用. *日本臨床麻酔学会誌* **42** : 106-110, 2022
- 9) 濱嶋真弘, 他：注意障害を伴うくも膜下出血患者に対して仮想現実技術を用いた介入により注意機能が改善した 1 例. *Jpn J Rehabil Med* **58** : 450-457, 2021
- 10) Nakamoto M, et al : Seated virtual reality-guided exercise improved gait in a postoperative hallux valgus case. *Int J Environ Res Public Health* **18** : 13267, 2021
- 11) Laver KE, et al : Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev* **11** : CD008349, 2017
- 12) Bahar-Fuchs A, et al : Cognitive training for people with mild to moderate dementia. *Cochrane Database Syst Rev* **3** : CD013069, 2019
- 13) 原 正彦：仮想現実 (VR) 技術を用いたリハビリテーションは慢性疼痛患者の福音となるか? *運動器疼痛学会誌* **12** : 90-93, 2020