

VR 技術を用いたリハビリテーション医療の工学的理論背景

村川 雄一朗¹⁾、原 正彦^{1), 2)}

1) mediVR リハビリテーションセンター
2) 島根大学 地域包括ケア教育研究センター

1. はじめに

我々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 (以下、リハビリ) 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た。本機器は座位トレーニングで安全にリハビリが出来る一方で、その独自性のある高い改善効果に期待が集まっている^{1)~3)}。機器発売当初はその効果に懐疑的な意見も多く認められたが、近年ではエビデンスの蓄積や症例毎の劇的な改善の実体験も相まってその改善効果に対する認識がかなり浸透してきたと感じている。本項では mediVR カグラの多彩な臨床効果や安全性が、どのような工学的理論背景に基づき開発されたのかを概説する。

2. mediVR カグラの構成

2.1 機器構成

mediVR カグラ (図 1) はソフトウェアとしてのカグラシステムを搭載したコンピューターと、高性能 VR 機器によって構成される医療機器である。現在 VR 機器としては HTC 社製 HTC VIVE Pro Eye を利用しており、患者は頭部にヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着し、両手にコントローラーを保持又は固定して座位でリーチング動作を用いたリハビリを行う。なお、カグラシステムの実施にはインターネットを介したサーバーとの接続が必須となっているが、取り扱うデータ packets を最低限に留めることで上り 500kbps、下り 1Mbps 程度の通信が確保できれば不

都合なく利用できる。

2.2 三次元トラッキング

HTC 社製の高性能 VR 機器を採用した理由は三次元空間においてミリ単位で正確な計測が可能だからである。ベースステーションと呼ばれる赤外線を利用した測定用の機器を、リハビリスペースを囲むように配置することで HMD あるいはコントローラーの位置を正確に把握する (図 1)。このような特徴から、セラピストはリハビリ中に自分自身の体が赤外線の遮蔽物とならないように立ち位置に気を使ったり、赤外線の乱反射を惹起するような鏡などの反射物、あるいは赤外線と干渉するような強い光を生じるライトなどを周辺に配置しないようにしたりして、トラッキングエラーが生じないように注意する必要がある。

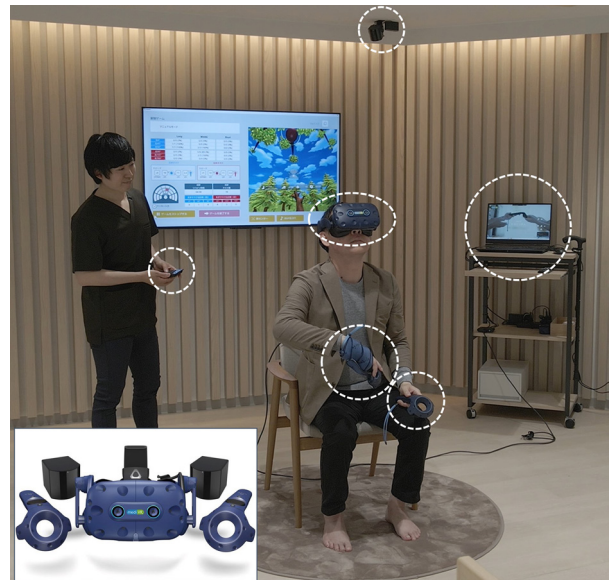


図 1 mediVR カグラの構成と右片麻痺患者に対するリハビリテーションの様子

1) mediVR リハビリテーションセンター
〒561-0872 大阪府豊中市寺内 2-4-1 緑地駅ビル 3 階

2.3 操作画面

カグラシステムを搭載したコンピューターに表示さ

れる操作画面を図2に示す。セラピストはリハビリを行うためのパラメーター設定を画面左側で行い、HMDに映し出される正面画像の一部を画面右側で確認できる。また、これらの基本操作はすべてワイヤレス型テンキー（図3）を用いて実行できるようになっており、セラピストは患者の様子を観察しながらリハビリを提供できる（図1）。

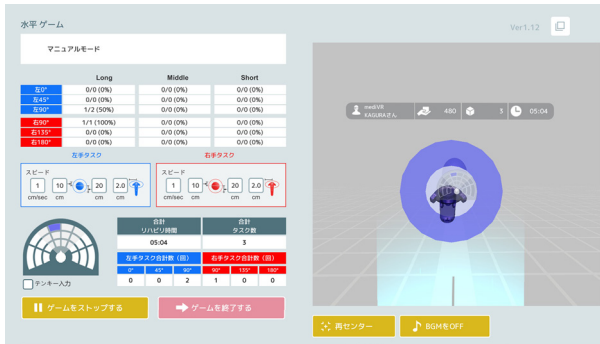


図2 カグラシステムを搭載したコンピュータの操作画面



図3 テンキーの操作割り当て

カグラでは左真横、左斜め前方、左前方、右前方、右斜め前方、右真横の6方向にリハビリ課題を出現させることができ、図のように各方向に対してテンキーのボタンが割り当てられている。

2.4 管理画面

カグラシステムの管理画面（図4）はGoogle Chrome に対応している。ここでは患者情報の登録や、リハビリの記録閲覧、時系列比較が可能でありデータはcsv形式で入手できる。また、リハビリ結果のレポート印刷がボタン一つで出力でき、患者のモチベーション維持などに利用されている。さらにテンプレートと呼ばれる機能を用いることでセラピストが行った

リハビリ内容をボタン一つで完全に再現でき、患者が自主トレーニングをする際に利用されている。



図4 カグラシステム管理画面

3. VR 酔い予防の工学的理論背景

3.1 VR 酔いのメカニズム

一般的にVR機器使用に際しては「VR酔い」と言われる乗り物酔いに似た目眩感やふらつき症状、吐き気などが3割程度のユーザーで生じると言われており、VRの医療応用の際の障壁となる^{1)~3)}。このような気分不良はsensory conflictと呼ばれる視覚情報と内耳情報の解離によって引き起こされることが知られている⁴⁾。例えば、大海原における船酔いや小児の車酔いは視覚情報に変化がない状況で、内耳が揺さぶられるために生じる（視覚＝動いていない vs 内耳＝動いている）。また、テレビのニュース番組等でカメラが揺れる映像を見た際に生じる映像酔いは、船酔いとは逆に視覚情報が変化している状況で、内耳からの情報に変化がないために生じる（視覚＝動いている vs 内耳＝動いていない）。

このような観点から、船酔いや車酔いの予防には視覚的变化を検出しやすくするフレームに液体が入った眼鏡が有効であることが知られている（図5）。



図5 乗り物酔い防止用眼鏡の1例（Shozxlcci 社製）

3.2 Sensory Conflict の回避

カグラシステムではVR酔いの原因となるsensory conflictを軽減するために以下の5つの工夫を盛り

込み、VR 酔いの発生率を 0.5%未満に抑えることに成功している^{1)~4)}。

3.2.1 背景画面の固定

没入型の HMD を装着した VR 環境では視覚情報が 360 度全方位 VR 映像となる。ほとんどすべての VR コンテンツで採用されているような背景画像が刻々と変化する仕様の場合、強力な視覚インプットにより内耳情報との乖離が大きくなり、前述した映像酔いの機序によって VR 酔いが極めて生じやすい状況になってしまう。一方、カグラシステムでは患者自身が頭を動かさない限り背景画像は動かず固定されている。このように、視覚と内耳情報に齟齬が生じないように背景映像を固定し sensory conflict を予防している点がカグラシステムの特徴の 1 つとなっている。

3.2.2 レーダーによる予測

HTC VIVE Pro Eye の HMD の視野角は 110 度であり、視野角 180 度の健常人が本来頭位を変換しなくても見ることのできる物体を視認するために頭を動かす必要がある。そのため、我々はカグラシステムでのリハビリ中に VR 空間上のディスプレイ正面に扇型の分度器様視覚補助機構を表示し、これをレーダーと呼んでいる(図 6)。レーダー画像には HMD の向いている方向(図 6A 正面、図 6B 左斜め 45 度、図 6C 左真横 0 度)、及び VR 空間上に出現するオブジェクトの位置をレーダー上に表示することで、次に得られるであろう内耳変化を事前に予測させ sensory conflict を予防している。このレーダー配置による内耳変化の事前予測は、車酔いを予防する目的で窓から外を見ることと同義であり、VR 酔い予防に繋がっていると考えている。なお、mediVR カグラを用いたリハビリに際してはこのレーダーを応用して分配性注

意障害の程度を把握したり、あるいは介入戦略に取り入れたりしている。

3.2.3 フレームレートの維持

映像出力のフレームレートが低いと画面がカクカク動き、頭位変換時に背景画像がスムーズに追従してこない。この場合、視覚情報と内耳情報の間に齟齬が生じ、映像遅延により VR 酔いが引き起こされる。我々はカグラシステム内の画像にローポリゴンコンテンツを用いることで Graphics Processing Unit (GPU) への負荷を低減し、プロセッサとして Intel Core i5-4590 または AMD FX 8350 の同等品以上、GPU として NVIDIA GeForce GTX 1070/Quadro P5000、または AMD Radeon Vega 56 の同等品以上の性能を備えたコンピューターを用いることでどのような条件でも殆どの人が映像遅延を感じないとされる 90fps 以上のフレームレートが必ず維持できる環境を用意しており、VR 酔い軽減に繋げている⁴⁾。

3.2.4 情報バーによる頭位の視覚認知

mediVR カグラのディスプレイ正面にはレーダー画像に加えて、その上部にプレイヤー名やプレイ開始後の経過時間などが表示される情報バーが配置されている(図 2 右側)。情報バーは VR 空間内地平線面と平行である(図 6D)。患者の頭位や体軸がゆがむと、HMD の傾きに追従するレーダー底面と情報バーとの平行関係が崩れるため、患者は視覚補助的に内耳情報を補正することが可能であり、セラピストも患者の体軸のゆがみに気づきやすい仕様となっている。図 6D は頭位が右側に 20 度傾いている際の映像を例示した。このようにカグラシステム内のユーザーインターフェースは患者がリハビリに没頭できるための要素に加えて、医学的な実利を兼ね備えた設計となっている。

3.2.5 座位による触覚入力

mediVR カグラによるリハビリは上肢機能改善を図る場合であっても、下肢やバランス、歩行機能改善を図る場合であっても原則として座位で実施する^{1)~3)}。座位で実施することによって、座面、背面、床面の三箇所から触覚を介した内耳情報の補完が行える。我々はこの仕様が sensory conflict が生じにくい環境構築の一助となっていると考えている。このように触覚を介した内耳情報補完は、例えば歩行時に壁に触れることでバランスを安定させるライトタッ

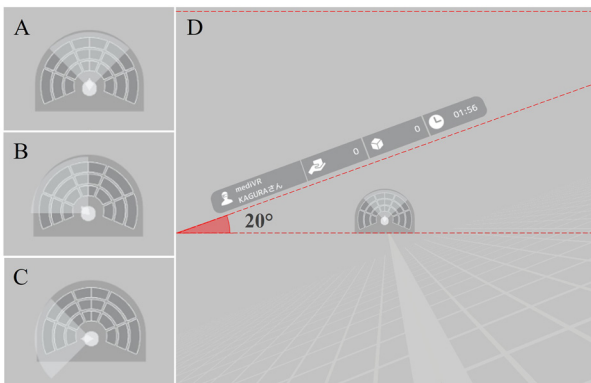


図 6 レーダー表示 (A-C) と頭位把握のための情報バー (D) の仕組み

チ現象としてよく知られている⁵⁾。

4. 改善効果発揮のための工学的理論背景

4.1 脳の再プログラミングという概念

これまでのリハビリで行われてきた運動学習は、患者の理解度に一部依存する部分もあったため学習の定着効率が悪かったり、認知機能や覚醒状態によっては学習自体が困難な場合も存在した。一方、mediVR カグラを用いたリハビリではセラピストが1回のリーチングごとに患者にあった適切な課題設定を行うことで、症候学的見地から脳の機能統合が急速に進むような変化が生じていると考えられ、我々はこれを脳の再プログラミングと表現している¹⁾。この変化はまるで自転車の乗り方を覚えるかの如く無意識下で生じ、一度学習が完了すればその記憶は長期間に渡って保持される。その結果、カグラシステムを用いたリハビリでは「座位」でのリーチング動作を「左右交互」に繰り返すだけで運動失調、歩行機能、上肢機能、認知機能、及び慢性疼痛に対して高い改善効果が発揮できると考えられている^{1)~3)}。なお、その効果はプログラマーであるセラピストの実力に100%依存すると考えている(図7)^{1)~3)}。



図7 脳の再プログラミングの概念図

4.2 カグラシステムにおけるフィードフォワードの仕組み

我々は、上記のように脳の再プログラミングが行われるには脳に強力な動作イメージが生成されるような条件が必要であると考えている。そのため、他のVRリハビリコンテンツとは異なり、あえてVR空間内に患者の手や体を見せるなどの再現はしていない。手に保持したコントローラーと目標の座標をVR空間に提示し、それを重ね合わせるような動作を求めることで錐体路を介した明確な運動指令が脳から各筋

肉に伝達されるようデザインしている。これを我々は「点推定」と表現しているが、通常の現実空間で行うリーチングと比較して、点推定でのリーチングでは腹横筋や回旋筋腱板などのいわゆる深層筋の収縮が明確に得られる点が異なっている^{1)~3)}。

4.3 カグラシステムにおけるフィードバックの仕組み

脳に新しい記憶を定着させるためには脳内における明確なフィードフォワードの生成に加えて、その動作達成の有無や精度に関する明確なフィードバックも重要である^{1)~3)}。カグラシステムでは手に保持したコントローラーでオブジェクトに触れる毎に視覚、聴覚、触覚刺激が発生する多信号生体フィードバックと呼ばれる特許技術(特許第6714285号)を採用し、脳の記憶の定着を図る仕組みを取り入れている。フィードバック要素が少ない場合、すなわち視覚または聴覚刺激などの中から1つだけの要素でフィードバックをするリハビリを実施した場合に機能改善に1週間程度を要していたような症状であっても、フィードバック要素を2つにした途端数分単位で症状改善が得られるといった事例を自験例で多く経験している。また、フィードバック要素が2つであった場合に数日程度しか改善効果が維持できなかった症状であっても、フィードバック要素を3つにした場合は、数カ月単位で改善が維持されるなどの効果も認められている。なお、嗅覚及び味覚刺激は回数を重ねるごとに刺激閾値が変化する事、刺激強度が個人の感覚に依存する事、刺激に新たな装置が必要になる事等、安定したフィードバック機構となりえないと考えカグラシステムには採用しなかった。このように我々は工学的に得られた新しい知見を元に10種以上の特許を取得しカグラシステムに取り入れている^{1)~4)}。

5. サポート体制

デジタルデバイスを医療に安全に導入するためには機器導入後のサポート体制の構築も欠かすことはできない。一口にリハビリと言っても患者の疾患や障害は非常に多様であることから、患者の能力や回復目標に応じた適切な機器の操作を行うことが重要である^{1)~3)}。昨今の新型コロナウイルス感染症拡大の現状においては訪問規制などで現場での対面サポートが制限されることも少なくないため、mediVR社ではすべての機器導入施設に対してiPhone/iPad、

Wi-Fi ルーター、ヘッドフォン、マイクスピーカーといった通信デバイスを貸し出し、WEB 会議ツール (Zoom、Whereby、Teams、Google Hungout 等) を用いた遠隔サポート体制を提供している。

6. おわりに

以上詳述したように、mediVR カグラは様々な工学的理論背景に基づき開発された医療機器である。近年拡張現実 (augmented reality, AR) や混合現実 (mixed reality, MR) 技術が VR の上位互換と捉えられてしまうことも多いが、本項を通してリハビリ効果を十分に発揮するためには AR や MR では不十分であり、没入型 VR でなければならない理由を理解頂けたと願っている。mediVR カグラで「治せる」時代になった今、本医療機器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医師、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>

村川雄一郎は株式会社 mediVR の社員として給与所

得を得ている。原正彦は株式会社 mediVR の代表取締役であり、会社株式を保有している。

【参考文献】

- 1) 原正彦: 仮想現実 (VR) 技術を用いたトレーニング, 総合リハビリテーション, 50(4), 351-358, 2022
- 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(8), 877-880, 2021
- 3) 原正彦: VR を活用したリハビリテーション, medicina, 58(6), 864-867, 2021
DOI: [10.11477/mf.1402227642](https://doi.org/10.11477/mf.1402227642)
- 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
DOI: [10.2490/prm.20180016](https://doi.org/10.2490/prm.20180016)
- 5) John J Jeka: Light touch contact as a balance aid, Physical Therapy, 77(5), 476-487, 1997
DOI: [10.1093/ptj/77.5.476](https://doi.org/10.1093/ptj/77.5.476)