VR 技術を応用した健康機器の開発

澤田一哉，野村淳二
松下電工

1．はじめに

Virtual Reality（以下，VR）という言葉は，1989 年に世界初の商用 VR システム RB2(Reality Built for 2) を発表した米国 VPL（Visual Programming Language）リサーチ社（既に解散し，現在は存在しない）の創始者 J. Lanier が使い始めた [1] ことに端を発する．

1990 年，我々は世界初の VR 産業応用事例として，この RB2 を応用したシステムキッチン疑似体験システム [2] を開発・発表し，ショウルームにおいて一般顧客を対象に実用化した．これに端を発し，現在に至るまで，図 1 に示すように住空間設計支援システムや都市環境計画支援システム，没入型高臨場感映像提示システム，ロボット遠隔操作システム，さらには健康維持・増進機器や生体計測・活性化機器など，VR 技術を応用した様々なシステムおよび商品の開発に取り組んできた［3］［4］．

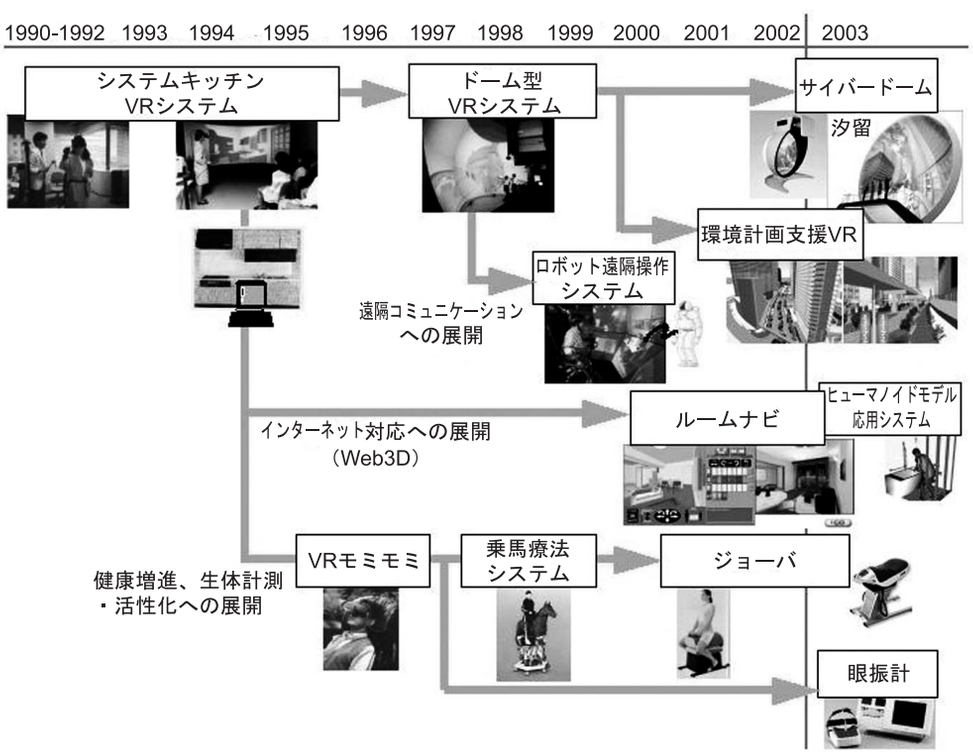

図１　松下電工におけるＶＲ応用への取り組み

これらの開発における一つの柱が，健康・医療分野への取り組みである．本稿では，特にこの分野に焦点を当て，現在までに我々が開発・商品化した健康維持・増進機器，生体計測・活性化機器の事例について紹介する．すなわち，心身のリラックス・リフレッシュを目的としたマッサージシステム［5］［6］，腰痛予防や筋力アップを主目的とした乗馬療法システム［7］［8］ならびに乗馬フィットネス

機器［9］，めまい検査を主目的とした眼振計［10］について，その概要を述べる．

2．心身賦活マッサージシステム［5］［6］

2．1　開発の背景

人間は様々なストレスにさらされている．特に，精神性ストレスや心因性のストレスなどの中枢性疲労，VDT 作業による眼精疲労が増えてきている．これらの疲労を解消するには，生体の活動度を一旦低下させて眠らせ，完全にリラックスした状態を作り出し，さらにその後に，リラックスによる傾眠状態を解消してリフレッシュ状態に導く，といったことが必要である．そこで，VR 技術を応用することで，短時間に睡眠・覚醒といった生体活動の変化を積極的に促し，被験者の心理面および生理面に好ましい効果をもたらす生体情報フィードバック型の心身賦活システムを開発した．以下では，その概要について述べる．

2．2　システム構成

図 2 にシステム構成を示す．本システムは，ビデオテープからの信号と脈拍センサからの情報に基づいてシステムを制御する制御装置，被験者の視界に対して外界からの情報を遮断しながらシステムからの映像を直接提示する HMD（Head Mounted Display），およびスピーカと振動子を組み込んだマッサージ機により構成される．映像と音楽のシナリオはビデオテープに収められており，後半のリフレッシュ段階では，被験者の視覚を刺激することを狙いとして立体映像を用いている．また，このビデオテープにはマッサージ機の制御信号がトーン信号として記録されており，映像と音楽に合わせた筋肉刺激パターンの信号が制御装置を介してマッサージ機に送られ，ビデオテープの再生によってシステムが自動的に稼動する．これらの映像，音楽，マッサージ制御のプログラムは，臨床心理学者 M. Maltz が提唱したサイコ・サイバネティクス理論［11］に基づいて作成している．また，制御装置内のマイクロコンピュータには，心拍数の低下度合によって入眠判定を行うプログラムが内蔵され，被験者が入眠したと判断されたときには HMD への映像提示ならびにマッサージ機の動作が止められ，音楽のボリュームが一定値まで下げられるといったフィードバック機能を有している．

図３　ＶＲモミモミの使用イメージ

本システムは，「VR モミモミ」という商品名で 1996 年に発売された．本システムの体験中の様子を図 3 に示す．

2．3　効果の検証例

効果検証の一例として，自律神経系の活動度を尺度として行った実験結果を示す．評価には，心拍変動を自律神経機能評価に用いる方式を採用した．心拍変動は主として高周波（HF）の呼吸性変動成分と低周波（LF）の血圧性変動成分から成っており，HF と LF/HF が，それぞれ副交感神経系，交感神経系の活動度の指標になるとされている［12］．

実験は以下の通りである．成人男子 3 名と成人女子 2 名の計 5 名の被験者が，はじめに定められた VDT 作業を 40 分間行う．次に，①本システム利用，②休憩，③ VDT 作業続行，の内いずれかを 10 分間行う．②の休憩は，VDT 作業椅子に座ったまま開眼状態で安静にしているものとする．その後，2 回目の VDT 作業を 40 分間行う．

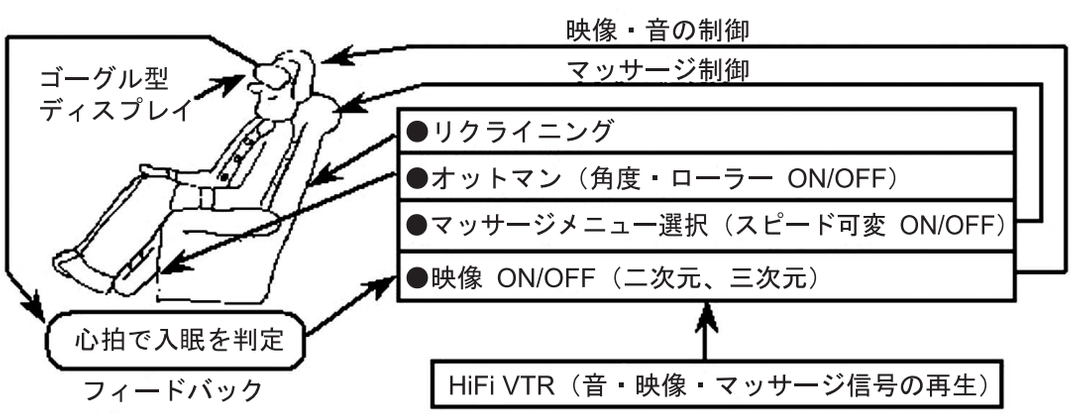

図２　ＶＲモミモミの全体システム構成

ここでの VDT 作業とは，PC のモニタ上に現れる標的をマウス操作で追跡するという内容のものである．

上記 90 分の間，被験者の心電を測定し，副交感神経系の活動度 HF を算出した結果，本システムを使用中の 10 分間が，休憩や VDT 作業続行した場合の 10 分間に比べて，HF が際立って高くなることが明らかとなった．これは，本システムを使用した場合に被験者がリラックス状態になっていることを示している．

3．乗馬療法システム［7］［8］［9］

3．1　開発の背景

乗馬が心理的・身体的な訓練になることは従来から良く知られている．特に欧米においてドイツ・イギリスを中心に障害者乗馬療法として発展し，身体や精神に障害を持つ患者に対して効果をあげている［13］．

乗馬療法は，加齢による筋力の衰えに起因する姿勢性腰痛や変形性膝関節症などの予防，さらには転倒予防といった効果も期待できる．乗馬は，騎乗者に他動的訓練（Passive Training）を与えることで二次的に自発的運動（Active Exercise）を誘発し，無意識のうちに結果的に運動になる．したがって，一般に運動意欲が高くない高齢者にとっても，心理的苦痛や抵抗感が少なくて，取り組みやすい運動であると言える．

我々は医療的視点に立ち，VR 技術を応用した乗馬療法システム・機器の開発を進めてきた．すなわち，初めに，実馬の鞍の動きを忠実に再現し，かつ対話的に楽しみながら乗馬療法が行えるシステムを開発し，次に，そこで得られた知見を基に，乗馬療法の効果を損なうことなく機構の簡略化と低コスト化を実現した乗馬フィットネス機器の開発を行った．以下では，これらのシステムおよび機器についてその概要を述べる．

3．2　高機能型乗馬療法システム［7］［8］

1）鞍の動きの抽出と再現機構

乗馬時の鞍の動きを忠実に再現する VR 乗馬療法システムの開発にあたり，まず，モーションキャプチャを利用して，常歩，速歩，駈歩といった馬の基本的な歩行パターンに対する鞍の動きデータを採取した．鞍の動きは，前後・左右・上下方向への平行移動（x，y，z）と，各方向を軸中心とする回転方向（yaw，roll，pitch）の合計 6 自由度からなる．なお，前後方向については，前方への等速移動分を差し引いて位置データとした．

次に，鞍の動きを忠実に再現するために，6 軸パラレルメカニズムの機構部を開発した．これは，6 個のアクチュエータを独立にモータで制御することで，任意の 6 自由度の動きを実現させるものである．入力データを取りかえるだけで任意の動きを再現できることが，この機構の大きな特徴である．

2）システム構成

VR 乗馬療法システムの外観を図 4 に示す．本システムは，上述の 6 自由度のパラレルメカニズムをその駆動部としており，手綱やスイッチで馬の常歩，速歩，駈歩の動作スピードや進行方向を変更でき，それに応じて映像と環境音（ひずめ音や周囲の雑音など）が再生されるといった対話的機能を有している．

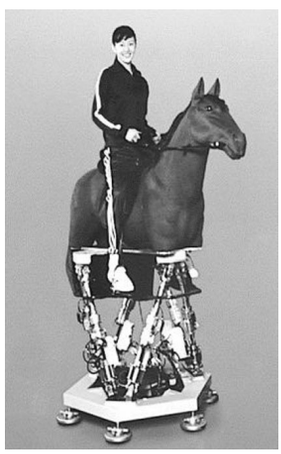

図 4　ＶＲ乗馬療法システム外観

システムの全体構成を図 5 に示す．本システムでは，まず利用者の操作に関する情報が VR 用計算機に送られる．次に，あらかじめ作成された映像データの再生速度が指定されて再生が始まると共に，効果音などのデータが MIDI 制御によりサンプラに送られ，映像と音声が同期をとって出力される．また，VR 用計算機から駆動用計算機にスピードや歩様パターンのデータが送られ，さらに駆動用計算機から駆動部に対して鞍の動きデータに基づく制御信号が送られることにより，駆動メカが実際に動作する．このようにして，映像，音響，駆動が連動して再現され，臨場感の高い乗馬療法の VR 体験が可能となる．

本 VR 乗馬療法システムは，1998 年 10 月に岡山県早

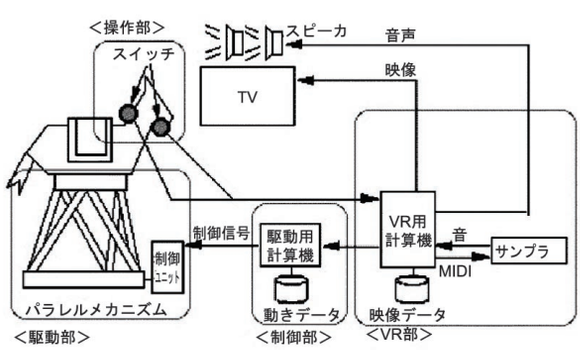

図５　ＶＲ乗馬療法システム全体構成

島町の健康福祉施設に 2 台，1999 年 3 月に京都府亀岡市の健康福祉施設に 1 台導入されている．

３）効果の検証例

VR 乗馬療法システムを用いて，筋力強化の効果を定量化した評価実験結果の一例を示す．20 歳代の成人 9 名（男性 8 名，女性 1 名）を第 1 群，60 歳代の高齢者男性 10 名（平均年齢 65.4 歳）を第 2 群とし，被験者は 3 ～ 4 ヶ月の間，本システムに 1 回 15 分間で週 2 ～ 3 回騎乗した．3 ～ 4 ヶ月間の訓練の前と後に，第 1 群については腹筋，背筋の等尺性ならびに等速性筋力を，第 2 群については腹筋，背筋の筋力を測定した．

その結果，第 1 群の 20 歳代の成人 9 名については，腹筋，背筋の筋力測定において，等速性では 9 名中 4 名が伸展・屈曲ともに増加し，4 名は伸展・屈曲のいずれかが増加していた．また，等尺性では 9 名中 5 名が伸展・屈曲ともに増加し，3 名は伸展・屈曲のいずれかが増加していた．第 2 群の 60 歳代の高齢者男性 10 名については，背筋力が 115.5N から 164.8N に，腹筋力が 104.2N から 158.6N に，それぞれ有意（$P<0.01$）に増加していた．また，第 2 群については，閉眼片脚立位時間も計測した．その結果，訓練の前後で，8.7 秒から 12.9 秒に有意（$P<0.05$）に延び，バランス感覚の改善も認められた［14］．

３．３　乗馬フィットネス機器［９］

１）筋力強化に重要な鞍の動き成分の抽出

次に，前述の VR 乗馬療法システムを基に，以下のような手順で筋力強化に重要となる鞍の動き成分の抽出を行い，簡易な機構で乗馬療法の効果を実現することにより，一般家庭でも使用できる乗馬フィットネス機器を開発した．

まず，VR 乗馬療法システムの 6 軸パラレルメカニズムを使用し，乗馬療法の基本である常歩の動きを感じさせるのに必要な軸の絞り込みを行った．すなわち，モーションキャプチャで得た鞍の動きの 3 次元データに基づき，各自由度を任意に組み合わせた 63 通りの動きを対象に，騎乗者の主観的満足度の評価実験を行った．被験者は乗馬部員 7 名と乗馬未経験者 11 名である．被験者にはどの自由度の組み合わせが提示されているのかを知らせずに，63 通りの動きをランダムな順番に提示して実験を行った．満足度の評価は，乗馬部員に対しては実馬の常歩と感じる動きを 5 点満点，乗馬未経験者に対しては 6 自由度全てを動作させた動きを 5 点満点とし，5 段階評価とした．本実験結果の一部を図 6 に示す．

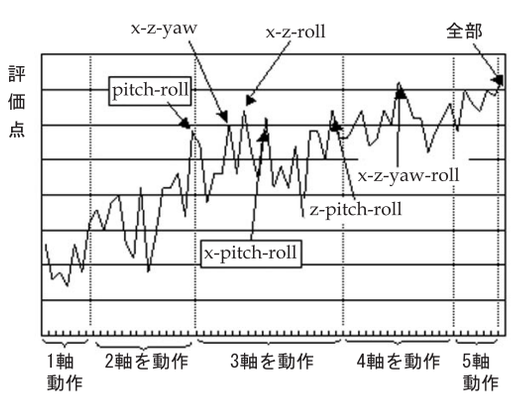

図６　有効な軸の絞り込み（主観評価結果）

上下動を含む動きを実現しようとすると，騎乗者を持ち上げるために強力なパワーのモータと大きな機構が必要となり，必然的に大掛かりで高価なものになる．そこで，3 自由度以内で評価点数が高かった動きの中で，上下動を含まない pitch-roll と x-pitch-roll に動きを絞った．ここで，x は前後方向への平行運動，pitch は左右軸を中心とした回転運動，roll は前後軸を中心とした回転運動である．回転中心は座部表面，すなわち，人体と座面との接触部分である．次に，絞り込まれた 2 種類の動きについて，60 才台の健常な男性 3 名を対象にして両極表面筋電計測実験を行い，筋放電が得られる動きと速度の決定を行った結果，筋放電を得られる簡易な動きは x-pitch-roll，すなわち「前後への動き（x），前後への回転（pitch），左右への回転運動（roll）」の組み合わせであるとの結論を得た．

２）機器構成

前述の x-pitch-roll による簡素化した常歩の動きを実現するために，1 つのモータを駆動源とし，クランク機構を用いることにより，前後動と前後への回転運動を同時に行い，かつ，左右への回転運動も制御する機構を開発した．乗馬フィットネス機器は，2000 年に家庭用として「ジョーバ」という名称で商品化され，現在では，様々なタイプの機器が販売されている．その一例を図 7 に示す．

図７　ジョーバ外観（一例）

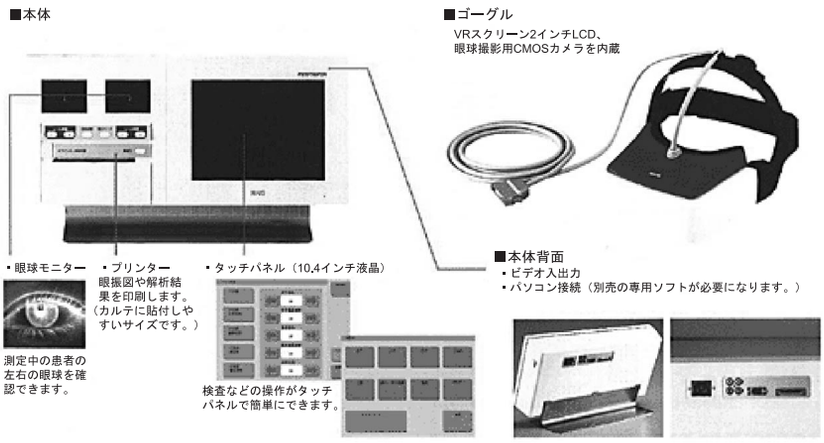

図８　メディテスターの全体システム構成

図９　メディテスター使用イメージ

３）効果の検証例

乗馬フィットネス機器を用いて，筋力強化の効果を定量化した評価実験結果の一例を示す．被験者は 60 歳代の男性 4 名と女性 5 名の計 9 名，平均年齢は 63.8 歳であり, 1.5 ヶ月の間, 1 回 15 分間で週 3 回, 本機器に騎乗した．1.5 ヶ月間の訓練の前と後に，腹筋・背筋，膝屈曲・伸展筋の等尺性筋力を測定することで, 筋力評価を行った．その結果，腹筋力は 9 名全員が，背筋力は 9 名中 8 名が，両膝屈曲・伸展筋力は 9 名全員が増加していた．統計学的評価では，腹筋力は $P<0.02$ で，背筋力，両膝屈曲･伸展筋力に関しては $P<0.01$ で有意に増加していた．

４．刺激スクリーン内蔵型ビデオ眼振計［10］

４．１　開発の背景

生理指標の計測を病気の診断に役立てる検査の一つに，耳鼻咽喉科などの病院で行われている眼振検査がある．これは，種々の視環境下におけるめまい患者の眼球運動を観察することで，「めまい」の原因・重度を調べようとするものである．従来の眼振検査では，患者の前に設置された大型スクリーンに刺激映像を投影し，その映像の動きを患者の眼球が正確に追随できるかどうかを観察する．眼球運動の観察には電極式眼振計を使用し，患者の顔面に多数の電極を貼り付け，その電位差を計ることによって，眼球運動を計測する．この電極の貼付けに時間と手間がかかり，患者にとっても負担の大きい検査となっている．また，大型スクリーンを設置しなければならないため，広い専用検査室も必要となる．このような設置スペースと検査時間の問題から，専門的なめまい検査は，大学病院や大規模な病院でないと実施することは困難であった．

これに対して我々は，一般の病院でも使用できるように，コンパクトで，かつ短時間での検査が可能な刺激スクリーン内蔵型ビデオ眼振計「メディテスター VOG（Video OculoGraphy）」を開発した．以下では，その概要について述べる．

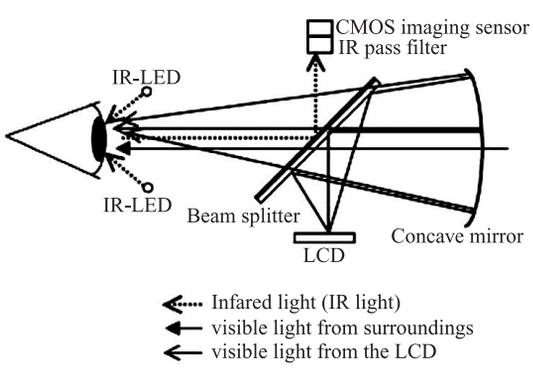

図 10　メディテスターのゴーグル内部模式図

４．２　システム構成

システムの全体構成を図 8 に，使用イメージを図 9 に示す．本システムは，ゴーグル部と画像処理コントローラから構成される．

ゴーグル部は, 映像提示ならびに眼球撮像を行う. ゴーグル部内部の模式図を図 10 に示す．映像提示は，ゴーグルに内蔵された LCD により行われる．右目用映像と左目用映像を独立に提示することができるため，立体映像提示も可能である．ゴーグルに組み込まれた光学系により，提示される映像の水平画角 45 度，その虚像位置は眼前約 3 m となっている．また，眼球撮像は，ゴーグルの被験者眼前部に内蔵されている赤外線 LED（中心波長 960nm）により行われ，被験者に知覚されることなく，暗環境下での眼球撮像が可能となっている．したがって，

使用する際に周辺環境の照度を一定に保つための設備や，映像提示のために別のディスプレイやスクリーンを設置するような専用の広い検査室は不要である．

画像処理コントローラでは，提示映像の生成と撮像された眼球映像の処理を行う．提示映像刺激としての指標画像は，画面の任意の位置や，速度を制御しながら画面上を移動したりして提示される．指標画像は何種類か用意されており，タッチパネルにより簡単に切り替えることができる．さらに，外部接続端子から入力されたビデオ映像を提示する機能も有している．また，撮像された被験者両眼の眼球画像は，60Hz サンプリングで処理され，リアルタイムに瞳孔径ならびに眼球位置の算出が行われる．その結果は，タッチパネル上に波形データとして表示される．この波形データは内蔵プリンタで印刷できる．また，オプションソフトウェアによって，外部パソコンにデータを保存し，データベースとして活用することも可能である．

本眼振計は，既に医療用具としての認可を受け，めまいを診断する必要のある耳鼻咽喉医院や神経内科医院，総合病院の耳鼻咽喉科や神経内科などを対象に，2003 年 4 月に商品化されている．

4．3　検査例

本システムを用いると，被験者に映像刺激の負荷を与えて行う指標追跡検査や視運動性眼振検査などが可能となる．また，映像刺激を与えずに自発眼振検査を行う赤外線フレンツェル眼鏡としても使用できるなど，一連のめまい検査に利用可能である．

一例として，視運動性眼振検査の結果を以下に示す．被験者は健常者であり，前もって計測の同意を得た．視運動性視覚刺激とは，白黒の縦模様を水平方向に等速あるいは加速減速させて眼球運動を誘発させる映像を指す．図 11 は，左から右への等速の視運動性視覚刺激を両眼に提示したときに，タッチパネル上に表示された眼球運動記録画面である．図 11 の画面の下半分に表示されている眼球の左右移動を示すグラフから，本検査例では，眼球運動における右から左への急速相と，左から右への緩徐相がそれぞれ交互に正常に出現していることが分かる．

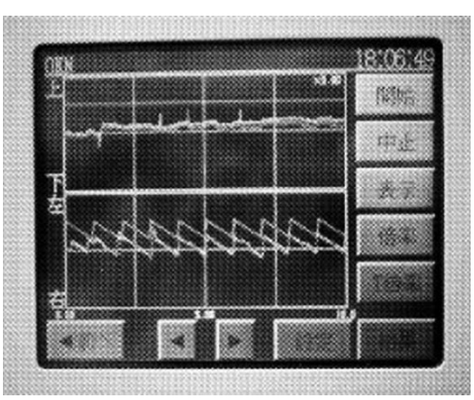

図 11　視運動性視覚刺激提示時の眼球運動記録例

5．おわりに

本稿では，現在までに我々が開発してきたさまざまな VR 産業応用事例の中から，特に健康・医療分野への取り組みに焦点を当て，VR 技術を応用した健康維持・増進機器，生体計測・活性化機器の商品化事例について述べた．

心身のリラックス・リフレッシュを目的に開発した「VR モミモミ」は，我々が VR 技術を商品に組み込んだ最初の事例であり，本稿で述べたその後の健康維持・増進，生体計測・活性化の機器開発の礎となった．

「VR 乗馬療法システム」は，高齢者の姿勢性腰痛や変形性膝関節症などの予防，さらには転倒予防を目的として開発したものである．これに引き続き，本システムで得られた知見を基に，機構の簡略化と低コスト化を実現し，家庭用でも使用できる「ジョーバ」の開発を行った．

「ジョーバ」は，日本身体障害者陸上競技連盟の日本代表選手育成強化合宿における体幹強化トレーニング機器に採用されたり，病院におけるバランス感覚訓練用リハビリ機器として利用されるなど，新聞にも取り上げられ，その有効性が評価されている．また最近では，糖尿病患者のインスリン抵抗性を改善させる効果［15］や，自律神経活動を向上させて体内エネルギーを消費しやすい体質に変える可能性があることなども明らかになってきている．これらの効果をさらに高めるシステムとして，騎乗中の筋電量の変化を機器にフィードバックさせることで利用者の個々人に適した運動を提供する「個人適応型他動訓練システム」なども検討されている［16］．

「メディテスター」は，我々が VR 技術を応用して開発した中で，医療用具として認可を受けた初の商品である．めまい患者の眼振検査を一般の病院でも行えるように，コンパクトで，かつ短時間での検査が可能なシステムである．本商品のゴーグル部は，前述の「VR モミモミ」における HMD 開発が緒となっており，その後の研究開発の積み重ねから生まれたものである．本商品は，左右両眼への映像を独立に提示可能，眼球運動以外に瞳孔経や瞬目の自動計測も可能などの特長があるため，眼振検査以外にも，視覚認知機能や視機能などの研究や検査への応用も期待できる．

以上のように，VR 技術を応用することで，様々な健康維持・増進機器，生体計測・活性化機器が開発される

と共に，その後の様々な利用や効果検証実験などにより，開発当初に目的として掲げた以上の効果・効能も認められてきている．今後，本分野の研究開発ならびに商品開発がさらに進展するものと期待される．

紙面の都合上，個々のシステムの詳細までは述べることができず，十分に内容を伝えきれなかった部分も多い．参考文献を挙げているので，参照頂ければ幸いである．

参考文献

[1] Wright: Virtual Reality, The Sciences, Nov./Dec., 1987.
[2] 野村：人工現実感によるシステムキッチン疑似体験システム , 精密工学会誌 ,Vol.57, No.8, pp.1352-1355, 1991.
[3] J. Nomura and K. Sawada: Virtual reality technology and its industrial applications, Control Engineering Practice 7, pp.1381-1394, Pergamon Press, 1999.
[4] 澤田：バーチャルリアリティとその産業応用事例 , 平成 13 年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集 ,pp.5-12, 2001.
[5] 仲島 , 福島 , 西山 , 野村 , 橋本 , 菅井：バーチャルリアリティ機能付きモミモミ , 松下電工技報 , pp.34-39, Oct., 1995.
[6] 福島 , 鈴木 , 仲島 , 野村：VR を応用した心身賦活システムの開発 , 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 ,Vol.1, pp.215-218, 1996.
[7] 村上 , 関根 , 四宮 , 吉田 , 野村 , 木村：VR を応用した乗馬療法システムの構築 ; 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 , Vol.2,pp. 103-106, 1997.
[8] 仲島 , 四宮 , 関根 , 王 , 石田 , 木村：VR 乗馬療法システムの開発とその効果検証に向けての取り組み , ヒューマンインタフェース学会論文誌 ,Vol.1, No.4, pp.81-86,1999.
[9] 四宮 , 関根 , 仲島 , 澤田 , 王 , 石田 , 木村：乗馬療法機器の開発と筋力トレーニング効果の検証 , 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 ,Vol.6, No.3, pp.197-202, 2001.
[10] 村上 , 福島 , 田舎片 , 澤井 , 福永 , 筒井：高視野角映像提示機能付き軽量型眼球運動計測機器の開発 , 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 ,Vol.7, pp.9-10, 2002.
[11] M. Maltz : PSYCHO-CYBERNETICS, 1960.
[12] 早野他：心拍変動と自律神経機能 , 生物物理 ,Vol.28, No.4, pp.32-36, 1988.
[13] 太田：乗馬療法 , 畜産の研究 ,Vol.51,No.1,pp.148-154, 1997.
[14] 木村 , 石田 , 王 , 河田 , 四宮 , 仲島 , 高橋：馬体の動きに伴った平行機能保持能力・人体各部の筋活動の変化 , 厚生省精神・神経疾患研究委託費　中枢性神経疾患の介護機器の開発と応用に関する研究発表プログラム ,pp.23-26, 1999.
[15] 保坂 , 四宮 , 佐藤：乗馬運動器具を用いた軽運動の糖尿病患者に対する運動療法としての有効性についての検討 , 第 46 回日本糖尿病学会年次学術集会 ,2003.
[16] 四宮 , 小澤 , 石田 , 王 , 木村：健康増進機器への筋電 Feedback の応用に向けた取り組み , ヒューマンインタフェース学会研究報告集 ,Vol.3, No.5, pp.11-12, 2001.

【略歴】

澤田一哉（SAWADA Kazuya）
松下電工（株）システム技術研究所　主幹研究員
1978 年神戸大学大学院工学研究科修了．同年松下電工(株)入社．VR を中心とするヒューマンメディア技術を応用した新システム，新商品の企画，開発に従事．博士（工学）．

野村淳二（NOMURA Junji）
松下電工（株）取締役
新事業推進担当兼システム技術研究所長
1971 年京都大学工学部卒業．同年松下電工（株）入社．システム工学，AI，VR などを応用した新事業，新商品，新システムの企画，開発に従事．工学博士．