〈特別寄稿〉

人類社会の持続的発展に貢献する統合科学

五福明夫[*1 *2]

Interdisciplinary Science Contributing to Sustainable Development of Human Society

Akio GOFUKU[*1, *2]

Abstract - With the increase of the complexity of human society because of the globalization and the advancement of each scientific field, innovations by effective collaborations of experts in various fields become necessary to solve problems in human society and to increase the findings of each field. From the backgrounds, the interdisciplinary science becomes popular in recent years. This article presents the approach of interdisciplinary science and its importance to the sustainable development of human society. As an example of studies by interdisciplinary science, this article introduces a virtual reality based mirror visual feedback therapy system that the author has been developed in collaboration with medical doctors, professors in engineering field and students of the author's laboratory in Okayama University.

Keywords : Interdisciplinary science, Collaboration of medicine and engineering, Virtual reality, Mirror visual feedback therapy system

1. はじめに

本稿では、著者の経験に基づいて、統合科学の研究の発展性と社会的意義を説明することを試みたい。また、統合科学の研究の１つの例として、仮想現実感技術を応用した鏡療法システムに関する研究の経緯と成果を紹介する。

統合科学の方法や社会的意義を整理・考察する前に、何故著者が統合科学を重要と考えているかを理解してもらうために、著者の研究領域の変遷（拡大）を述べておくことが必要であろう。著者は小学・中学時代にプラ模型（主に軍艦）やちょっとした電子工作を行なっていたことから、大学では電気・電子工学を専攻した。配属された研究室の研究分野から、修士研究では原子力プラントの異常診断に関する研究を行い、助手時代にはその研究を発展させるとともに原子力プラント事故時の熱流動解析を行うようになった。このため、流体力学や熱力学とそれらの数値解析手法を学んだ。それもあって、1994 年 12 月に岡山大学に助教授で着任した時の所属は、工学部機械工学科であった。そこでは、機械工学と電気・電子工学の発想やカリキュラムの相違に驚いたものであった。1996 年４月に、岡山大学工学部にシステム工学科が新たに設置されてそこに配置換えとなり、基本的にはシステム工学を教育・研究する学科・コースを担当し、2023 年３月に定年退職時の学部担当は工学部工学科ロボティクス・知能システムコースであった。岡山大学工学部での主な担当講義科目は、電磁気学、電子回路、インタフェース設計学であった。大学院の担当は、最初は自然科学研究科産業創成工学専攻知能機械システム学講座であったが、生命医用工学専攻の設置とその発展形のヘルスシステム統合科学研究科の設置に伴って、それらを担当した。なお、ヘルスシステム統合科学研究科の設立経緯については、本稿においても少し触れるが、妹尾名誉教授の詳細な記事[1]を参照されたい。

以下本稿では、２節において統合科学による社会の持続的発展への貢献の可能性を述べ、３節では著者が理解している統合科学の方法を述べる。また、４節では統合科学の研究例として、仮想現実感技術を応用した鏡療法（VR-MVF：Virtual Reality based Mirror Visual Feedback）システムを紹介する。そして、本稿の最後には、統合科学の発展への期待を述べる。

2. 統合科学による社会の持続的発展への貢献の可能性

2.1 統合科学の方法

統合科学の重要性を述べる前に、科学（science）の意味するところを整理し、統合科学（interdisciplinary science）の意味を明確にしておきたい。科学は狭義には自然科学の意味で理学と同義で用いられることが多いが、対象をある目的や方法で研究す

*1: 岡山県立大学
*2: 岡山大学
*1: Okayama Prefectural University
*2: Okayama University

る人間の活動であり、広義には人文科学（humanities）、社会科学（social science）、医学（medicine）、工学（engineering）などを含む。ただし、理学（狭義の科学）が人間を含む自然現象がどのような構成となっていてどのような原理や法則に従っているかを明らかにしようとする活動に対して、工学は明らかとなった原理や法則を活用して人類に役に立つ人工物を生み出そうとする活動である。これらの目的の相違から、狭義の科学では観察や計測に基づいて自然現象を定性的、定量的に説明するアプローチを採るのに対して、工学では既存の物を組み合わせて新しい物を創造する方法や人工物の目的を達成できる原理や法則が成り立つ仕組みや構造を設計するアプローチを採る。何かを生み出すという目的や発散的思考を伴う点で、工学は芸術（art）に似た側面を持つ。

一方、科学とよく対にして用いられる技術は、狭義の科学の知見に基づいて工学により創造された方法や人工物を、それらの使い方を含めて指す。これは、科学は『科学する』や『科学の方法を教える』などと用いられるのに対して、技術は『技術する』とは言わず、『技術を持つ』や『技術を伝授する』などと用いられることからも分かる。

統合科学では、人類社会への社会実装のために様々な学術分野の知見を統合・応用する学術的活動である。統合科学では図1のサイクルに示す通り、様々な問題（改善したいこと）のある現場に対して、現場の問題を観察・解析型活動により課題として抽出し、抽出された課題に対する解決策を構成型活動によって制度や人工物として具現化し、行動型活動によって現場の改善を図る。統合科学には構成型活動の１つとして工学も含むことから、統合科学の用語における「科学」は広義の科学の意味として理解すべきである。

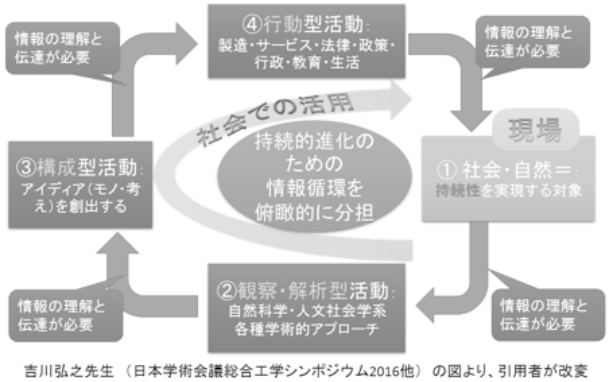

図1　統合科学のサイクル

統合科学の英語表現に含まれる「inter」に類似した接頭辞に「multi」と「trans」がある。それらの意味の相違は、分野Aと分野Bを考えた場合に、「multidisciplinary」では２つの（複数の）分野の知見が独立して統合されておらず、「interdisciplinary」では２つの（複数の）分野の知見が統合されており、「transdisciplinary」では２つの（複数の）分野の知見に加えて学術的分野以外の知識も統合されていると説明されている[2]。

また、文献[3]によれば、interdisciplinary research（学際的研究）では、

> 学際研究とは、疑問に答え、課題を解決し、単一の専門分野で適切に扱うには広範すぎるもしくは複雑すぎるテーマを扱うプロセスであり、このために、より包括的な理解の構築のために知見を統合するという目標を持って各専門分野を利用する

とされている。

2.2　統合科学の重要性

ある物事は多面的に見ることができ、視点によって異なる結論が得られる。群盲評象（盲人像を評す）[4]のインド発祥の寓話では、盲人達が象の鼻、牙、足などの一部分だけを触って、触っているものが何かをそれぞれに評するが、意見が異なって対立が深まる。最終的には同じ物の別の部分であることに気づいて対立が解消する。最初、盲人達が評している内容は全て正しいが、象という全体を正しく表現しているわけではない。専門分野にはそれぞれ前提事項とアプローチ法がある。すなわち、研究する視座（視点）があり、科学（狭義）のそれぞれの分野は、自然や人間社会を特有のスポットライトを当てて観察し、そこから知見を得ている。このため、群盲評象と同じことが起こる危うさがある。これを回避するためには、各分野の専門家は、その分野の活動方法を理解し、また他分野の知見も理解する努力が大切である。原子力分野では、「もんじゅ」の研究開発において、流体工学分野での常識では考えられないセンサのナトリウム配管内への配置方法により、ナトリウム漏れとそれに伴うナトリウム火災が発生し、その他の要因もあって最終的には「もんじゅ」開発が中止されてしまった。この不幸な事例からも、部分を追求することも必要であるが、同時に全体にも気を配る（様々な視座から物事を理解しようと努力する）ことが重要であることが理解される。

20 世紀後半までは、科学（広義）のそれぞれの分野の知見が単独で、人類社会の様々な課題を解決できる場合が多かった。しかしながら、交通や通信技術の発達により国際的な人の往来や物流が増加し、それに伴って価値観が多様化して社会が複雑化し、また人工物の人類社会への影響も大きくなってきている。このため、近年では１つの分野だけでは現在の複雑な人類社会における課題の解決が困難になってきている。例えば、高い安全性が求められる複雑システム（航空機、原子力プラントなど）の運用においては、技術的課題の解決だけでなく、人的要因（ヒューマンファクタ）の考慮も必要である。また、科学（狭義）は観察

や計測とそれらによるデータの処理と解釈に基づいているため計測技術やデータ処理技術（統計処理、最近ではデータサイエンス）の発展が重要であり、工学にはニーズが必須であることから、単独分野だけでは科学（広義）の発展には限界がある。このことから、異分野融合によるイノベーションの必要性が認識されるようになってきている。

近年のコロナ禍のような感染症による世界的パンデミックにおいては、医学分野でのウィルスの特性分析、薬学分野でのワクチン研究にだけでなく、経済的活動の低下を最小限に抑えながら感染症の拡大を食い止めるための社会科学的な研究、空気中でのウィルス拡散状況の工学的シミュレーション研究などが活発に行われた。また、遠隔でも対話や会議を可能とする遠隔会議システムの開発と整備が精力的に行われた。

行動型活動を主とする医学分野では、早くから医学以外の分野の知見や技術を適用することによって医学が進歩する意識があり、1990 年代から盛んに医工連携の必要性が叫ばれ、医工連携研究が盛んになってきた。岡山では、1992 年に岡山医用工学研究会が発足して医工連携活動が始まり、岡山大学に学内措置として医歯工学先端技術研究センターが2004 年4 月に発足している。医工連携は全国的に盛んとなり、2008 年には東北大学に大学院医工学研究科が設置されている。その後、岡山大学では2015 年4 月に大学院自然科学研究科に生命医用工学専攻が設置され、それを母体として人文社会科学や法学、医学、薬学、保健学の分野も含めて2018 年4 月に大学院ヘルスシステム統合科学研究科が設置された[1]。

社会はスパイラル的に持続的に発展する。すなわち、医師、技術者、法律家などが行う現場での活動を改善するための社会的なニーズに対して、観察・解析型活動（理学、人文科学や社会科学などの諸手法）により具体的な課題として抽出し、人類が持つシーズをイノベーティブなアイデアの下で構成的活動（工学的研究）を通して新しい人工システムや制度を開発し、それらを社会実装して現場に活用することにより社会が改善する。すなわち、ニーズ、シーズ、アイデア、社会実装のスパイラルにより、人類社会は持続的に発展する。なお、類似のスパイラルとして、設計やプロジェクトでのスパイラルやPDCA サイクルがある。

ニーズは社会的要請やより高い改善目標であり、シーズは主に科学（狭義）から生み出される。社会実装するためには、ニーズ、シーズ、アイデアが揃うことが必須であり、これらには様々な分野からの多様な視座が必要である。すなわち、社会実装には様々な分野の専門家の視点や方法が必要である。この意味で、ある分野だけの知見では社会の発展が大きくは望めない時代となった現代においては、多様な視座からアプローチする統合科学が重要となる。

3. 統合科学の類型

統合科学による成果は、分野を横断したものと、それぞれの分野へのフィードバック的成果の２通りが考えられる。本節では、ニーズ、シーズ、社会への実装や展開の3 つの観点から、統合科学の類型について考察する。考察を複雑にしないために、２つの分野に関する統合科学を考え、ニーズやシーズはどちらかの分野にあるとする。この場合には類型は、大きく分けると以下の表1 の4 通りが考えらえる。

表2　統合科学の類型

類型	ニーズ	シーズ	社会実装や展開
1	分野A	分野B	分野A
2	分野A	分野B	分野B
3	分野A	分野B	分野A とB
4	分野A	分野B	分野A とC

類型1 は分野A のニーズに対応するために分野B のシーズを適用して分野A への社会実装を行うものである。この場合には、シーズを提供する分野 B の研究者がサービスに徹することが必要となる。従来からよく行われている医工連携研究のような、医学分野のニーズに対して工学分野のシーズを適用して、医学分野で社会実装を行うものである。例えば、病院内患者へ薬を自動で配達するシステムは、工学分野の自動配送システムを応用することにより社会実装される。

類型2 は、医工連携研究の場合では、医学分野のニーズに対して工学分野のシーズを適用しようとした際に、そのニーズに対応するシステムの社会実装までは至らないが、工学分野の発展が促される場合である。この場合は工学分野（分野B）の研究者にとっては実施した価値があるが、医学分野（分野A）の実務者にとっては社会実装まで至らなかった点で不満が残る。例えば、コロナ禍において実施されたくしゃみの飛沫のスーパーコンピュータによる数値シミュレーションがそれに当たると考えられる。すなわち、流体の数値シミュレーションは従来から工学分野で研究されていたが、新たな医学的ニーズにより、数値シミュレーション技術（例えば、並列計算プログラムの作成技術）が進化する場合である。そして、医学的ニーズに応えられる社会実装も実現した場合には類型 3 となり、両方の分野にとって Win-Win の関係となる。

類型4 は特殊な場合で、分野A のニーズに応えるために分野B のシーズを適用するが、その成果は分野A のみならず分野C にも波及する場合である。この場合には、シーズを提供する分野B の研究者が分野C にも関心があることが望ましい。筆者の医工連携研究での、感染症対策の手指衛生の意識向上のための VR 教育システム[5]がこれにあたる。ここでは、目には見えないウィ

ルスを擬似的に可視化することにより、手指衛生を徹底しないとウィルスが環境内に拡散することを体験させることにより、手指衛生の意識向上を図るもので、社会実装として医学分野(感染症の蔓延対策)とともに教育分野(教育や意識改革へのVRの適用)に展開されることが期待される。

4. 統合科学研究例としての仮想現実感を応用した鏡療法

4.1 研究・開発の背景

疾病や事故により手指、手や足などを失った患者のかなりの割合で、切断による傷が治癒した後でも疼痛を感じる幻肢痛を発症し、疼痛により生活に支障をきたす場合がある。痛みの治療には薬剤や神経ブロックなどが使われるが、鎮痛効果に乏しかったり効果が一時的であったりという治療に抵抗性があり、難治性疼痛とされる。これに対して、図2のように、鏡を立てた箱の中で健常側の手や足(健常肢)を動かして喪失した手や足(喪失肢)があたかも自由に動くとの錯覚を起こさせることで、疼痛が軽減することが報告されている[6, 7]。この治療法は鏡療法と呼ばれている。また、鏡療法は四肢の喪失を伴わない慢性疼痛症候群(Complex Regional Pain Syndrome:CRPS)にも有効であることが報告されている[8, 9]。

図2 鏡療法

鏡療法は簡便な治療法であるが、鏡の箱の中で健常肢を動かすことから、動作範囲が制限されることや、単調な動作となるために患者が治療に飽き易いことが課題である。佐藤は2000年頃に、当時発展が著しい仮想現実感(Virtual Reality:VR)技術を適用することで、VR応用の先行研究[10]も参考として、これらの課題が解決できるのではないかと考え、VR技術を適用した上肢を対象とした鏡療法(VR-MVF)システムを着想し、著者らに研究・開発の協力依頼をした。当時、著者らはVRに関する研究は行っていなかったが、それ以前から大規模プラントのヒューマン・マシン・インタフェース(Human-Machine Interface:HMI)の研究を行っており、HMIへのVR応用にも関心があったことから、VR-MVFシステムの構築や画面に表示される仮想空間で物体のハンドリングを行うタスク(治療用タスク)の研究・開発に協力することとした。

4.2 開発したVR-MVFシステムの構成

VR-MVFシステムは、図3に示すように、健常肢の動作を検出する健常肢モーションセンサ部、検出した健常肢の動作を左右反転させて喪失肢の動作を仮想空間に生成する仮想肢動作生成部、および、生成された仮想肢の動作を表示するディスプレイから構成される[11, 12, 13, 14]。なお、喪失が手足の一部である場合には残存部の動作検出のための残存部モーションセンサ部も必要となる。図3では、健常肢モーションセンサ部として左手にデータグローブを、残存部モーションセンサ部として右下腕部に磁気センサを装着している。

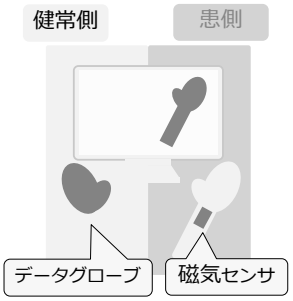

図3 VR-MVFシステム

著者らはこれまでに3種類のVR-MVFシステムを開発し、岡山大学病院、川崎医科大学病院、および、患者の自宅で試用してきた。開発した3種類のVR-MVFシステムのモーションセンサ部とディスプレイの構成の概要を表2に示す。仮想肢動作生成部はパソコンとその内部で動作するプログラムであるので、表からは割愛している。岡山大学病院用のVR-MVFシステムでは、手を喪失した患者を想定して開発していることから、健常肢にデータグローブ、喪失肢の下腕部に磁気センサを装着することを標準としているが、喪失肢側に磁気センサを装着することもできる。データグローブや磁気センサは当時高価であったので、在宅利用のVR-MVFシステムでは、物体の掴み動作を手全体の握り動作に限定して無線マウスのクリックにより握り動作を行うようにしている。ゴーグル表示のVR-MVFシステムでは、近年安価になってきているゴーグル表示VRシステムを利用している。なお、岡山大学病院用のVR-MVFシステムは、最初はシステム構築や治療用タスクの開発を業者に委託して、棚にある物体の移動を行う治療用タスクが実装された。その後、仮想空間内の物体の物理的挙動を模擬した治療用タスクを開発した。

治療用タスクは、仮想空間内にある物体を掴んで移動させることを基本としているが、ゴーグル表示システムではゲーム感覚で行える治療用タスクも用意した。それぞれのVR-MVFシステムで実装した治療用タスクを表3に示す。治療用タスクにおける画面表示例として、棚にある物体の移動、机の上の物体の移

表2　開発した3種類のVR-MVFシステムのハードウェア構成

システム	岡山大学病院用	在宅利用	ゴーグル表示
モーションセンサ部	健常肢：データグローブ 喪失肢：磁気センサ	健常肢：無線マウス 健常肢・喪失肢：骨格動作検知装置（Microsoft KINECT）	健常肢・喪失肢：専用コントローラ or データグローブ（健常肢）
ディスプレイ	液晶ディスプレイ	液晶ディスプレイ	ヘッド・マウント・ディスプレイ（VIVE）

表3　開発した3種類のVR-MVFシステムの治療用タスク

システム	岡山大学病院用	在宅利用	ゴーグル表示
物体移動タスク	棚にある物体の移動 机の上の物体の移動	机の上の物体の移動	−
ゲーム感覚タスク	−	−	感電棒（4種類）坂を転がる球の移動 ストラックアウト

図4 棚にある物体の移動の治療用タスク

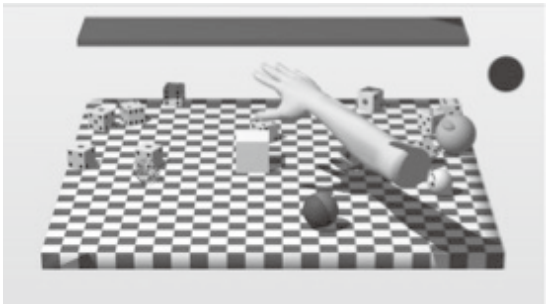

図5 机の上の物体の移動の治療用タスク

図6 感電棒（円形図形）の治療用タスク

図7 坂を転がる球の移動の治療用タスク

動、感電棒（円形図形）、坂を転がる球の移動を、それぞれ図4から7に示す。なお、ゴーグル表示のVR-MVFシステムの治療用タスクの開発にはUnityを用いている。

4.3　治療効果

岡山大学病院において、5人のCRPS患者に対して、机の上の物体の治療用タスクを適用した[14, 15]。1週間に1回の割合でVR-MVFによる治療を行なった。各々の治療セッションでは時間制限は設けなかった。主観的な痛みをVAS（Visual Analogue Scale）で報告してもらった。結果は、VR-MVFの適用前ではVASの値が平均64±標準偏差14であったところが、5〜8週間の治療の後は平均31±標準偏差26に減少し、治療効果があることが示された。

また、ゴーグルタイプのVR-MVFシステムを、9年前に事故で右手の人差し指から小指を喪失した患者に川崎医科大学病院で試用した[16]。適用した治療用タスクは、坂を転がる球の移動である。球の把持動作は健常側の手（左手）で持った専用コントローラで行い、球の移動は喪失側の手に固定した専用のコントローラにより行なってもらった。痛みの程度はMcGill痛み質問紙（SF-MPQ2）により調査した。この方法では痛みの程度の最大評価値は220となる。また、24時間の左右両肢の上腕の活動量を計測した。ただし、入浴時は計測装置を取り外す必要があるために除外している。VR-MVFシステムの適用により痛みの程度は147から徐々に減少し、18週間以降は100〜105と

なった。また、上腕の活動量は、治療前では健常側がかなり大きかったが、18 週間以降では健常側はやや増加するとともに喪失側は健常側とほぼ同じとなり、生活における活動の改善につながった。

4.4 工学研究への波及効果

統合科学研究では、連携する研究者各々にメリットがあることが重要であると考えている。例えば医工連携による統合科学研究では、医学の発展とともに、新たな工学研究への波及効果があることが望ましい。VR-MVF システムの開発においては、単に VR 技術を鏡療法に適用するだけではなく、VR 技術に関するいくつかの発展や工学および科学における課題の気づきがあった。それらは、著者が研究指導した学生の研究テーマとなって工学的な成果が挙がったり、関連研究に発展したりした。主な研究テーマとその成果や発展を以下に述べる。

1) 在宅用 VR-MVF システムと治療用タスク実施データの遠隔収集システム：岡山大学病院用の VR-MVF システムは、モーションキャプチャ用の装置が高価なために、患者は来院時のみ治療用タスクを行うことができた。このため、在宅で治療用タスクを行う VR-MVF システムが望まれた。その場合、VR-MVF システムを安価に構成する工夫とともに、治療用タスクの実施データをどのように病院に回収するかも問題となった。そこで、実施データをインターネットで回収する機能を持った在宅用 VR-MVF システムを開発した[13, 17]。当時は、人間の骨格の動きを認識する安価な装置はあったが手指の動きを正確に認識する安価な装置がなかったために、指の動きは握り動作のみに限定し、仮想物体の把持指令は無線マウスのクリック動作に置き換える工夫を行なった。残念ながら、情報セキュリティの関係で病院のネットワークをインターネットに接続することができないために、治療用タスクの実施データの遠隔回収は実現しなかったが、在宅用 VR-MVF システムの枠組みは提案でき、また、研究開発した学生の知識と能力が高まった。
2) 治療意欲維持の仕組みの検討：患者の治療意欲の維持を支援する仕組みを考察し、鏡療法の実施を支援する 3 つの外装的機能をシステムに実装した。すなわち、1. 患者自身が一人でも治療タスクや各種アンケートの実施を支援する手順支援機能、2. 治療の結果や痛みの状態を記録・提示する治療経過提示機能、および、3. Captology[18]の概念を応用した称賛のメッセージを表示する機能を導入した[19]。
3) 鏡療法による慢性疼痛軽減の機序解明の脳工学研究への発展：VR-MVF システムを研究開発していく中で、ディスプレイに表示される手は明らかに自身の手ではないことが認識されるにもかかわらず、慢性疼痛が何故軽減するのかに疑問を抱くようになった。そこで、幻肢痛発生が運動指令と感覚フィードバックの不一致に起因し、鏡療法や VR-MVF ではあたかもそれらが一致するように錯覚させることで慢性疼痛を軽減するのではないか、そして、それは人間の持つ２種類の感覚（身体所有感（Sense Of Ownership：SOO）と運動主体感（Sense Of Agency：SOA））のうちの SOA が関連しているのではないかとの仮説の下で、SOA と慢性疼痛の関連性を脳波計測により調べる研究を進めている[20, 21, 22]。まだ、SOA と脳波の関連性の一端が明らかになり始めたところではあるが、今後患者データの収集により仮説の妥当性を検証したいと考えている。なお、この研究の波及効果として、プラント運転員などのシステム操作者の認知状態の判別（特に、ヒューマン・エラーを起こし易い認知的混乱状態の判別）の研究にも展開している。

5. おわりに

著者は主に医工連携研究において統合科学研究を実施してきたが、著者の知識や能力の限界や研究連携環境が整わなかったこともあって、人文社会科学分野とも連携した統合科学研究はほとんど実施できなかった。人間中心の工学システムの研究、開発や社会実装のためには、人文社会科学分野との連携が必要と考えており、文理融合の統合科学が今後発展することを期待している。

ヘルスシステム統合科学研究科は、その特徴的な組織体制と教育プログラムから文理融合の統合科学を発展させることができる世界的にも数少ない組織である。今後世界的拠点の１つとして統合科学研究の先導的役割を担うことを期待している。

そして、統合科学の研究成果に基づいた社会実装による社会の持続的発展を期待して、本稿を締めくくりたい。

謝辞

本稿で紹介した VR-MVF システムの研究開発やその医療への応用に関して協同いただきました皆様に謝意を表します。特に、川崎医科大学の佐藤健治教授（開発開始時は岡山大学）、川崎医療福祉大学の吉村学講師、岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科の中澤篤志教授、亀川哲志准教授（現在大学院環境生命自然科学研究科教授）、杉原太郎助教（現在東京工業大学准教授）には、研究・開発実施や開発システムの適用に関して、多くの協力をいただきました。また VR-MVF システムに関して様々な研究テーマで素晴らしい成果を上げてくれた岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科インターフェイスシステム学研究室の学生さんに感謝致します。

参考文献

[1] 妹尾昌治, 大学院ヘルスシステム統合科学研究科：設置の構想と経緯, 統合科学, Vol. 3, pp. 1-9 (2023).

[2] Ed. Steph Menken, Machiel Keestra, An Introduction to Inter disciplinary Research theory and practice, Amsterdam University Press, p. 32 (2016).
[3] アレン F. レプコ 著, 光藤宏行, 大沼夏子, 阿部宏美, 金子研太, 石川勝彦 訳, 学際研究 プロセスと理論, 九州大学出版会, p. 14 (2013).
[4] https://ja.wikipedia.org/wiki/群盲象を評す, アクセス日：2024.1.31.
[5] 和泉真尋, 五福明夫, 柴田光宣, 廣田聡, 萩谷英大, ウイルスの模擬可視化による医療従事者の行動変容を促す VR 教育システムの検討と教育効果の評価, 第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 848-854 (2022).
[6] V.S. Ramachandran, D. Rogers-Ramachandran, Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors, Proceedings of the Royal Society of Lomdon, Series B: Biological Sciences, pp. 377-386 (1996).
[7] V. S. Ramachandran, D. Brang D, P. D. McGeoch, Size reduction using Mirror Visual Feedback (MVF) reduces phantom pain, Neurocase, Vol. 15, Issue 5, pp. 357-360 (2006).
[8] C. S. McCabe, R. C. Haigh, E. F. J. Ring, P. W. Halligan, P. D. Wall, D. R. Blake, A controlled pilot study of the utility of mirror visual feedback in the treatment of complex regional pain syndrome (type 1), Rheumatology; Vol. 42, pp. 97-101 (2003).
[9] C. S. McCabe, R. C. Haigh, D. R. Blake, Mirror visual feedback for the treatment of complex regional pain syndrome (type 1), Current Pain and Headache Reports, pp. 103-107 (2008).
[10] H. Sveistrup, J. McComas, M. Thornton M, S. Marshall, H. Finestone, A. McComick, K. Babulic, A. Mayhew, Experimental studies of virtual reality-delivered compared to conventional exercise programs for rehabilitation, Cyberpsychology & Behavior, Vol. 6, pp. 245-249 (2003).
[11] 福森聡, 五福明夫, 佐藤健治, バーチャルリアリティを利用した在宅 CRPS 治療システム, 遠隔医療学会雑誌, Vol. 5, No. 2, pp.248-251 (2009).
[12] 福森聡, 五福明夫, 佐藤健治, CRPS のための没入型治療システムの研究開発, 遠隔医療学会雑誌, Vol. 6, No. 2, pp. 203-206 (2010).
[13] 諫武賢志, 福森聡, 五福明夫, 佐藤健治, 慢性疼痛患者のためのカメラ画像に基づく身体動作認識デバイスを利用した簡易型 VR鏡療法システムの開発, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 17, No. 1, pp. 159-166 (2015).
[14] Kenji Sato, Satoshi Fukumori, Takashi Matsusaki, Tomoko Maruo, Shinichi Ishikawa, Hiroyuki Nishie, Ken Takata, Hiroaki Mizuhara, Satoshi Mizobuchi, Hideki Nakatsuka, Masaki Matsumi, Akio Gofuku, Masataka Yokoyama, Kiyoshi Morita, Non-immersive Virtual Reality Mirror Visual Feedback Therapy and Its Application for the Treatment of Complex Regional Pain Syndrome: An Open-label Pilot Study, Pain Medicine, Vol. 11, No. 4, pp. 622-629 (2010).
[15] Kenji Sato, Satoshi Fukumori, Kantaro Miyake, Daniel Obata, Akio Gofuku, Kiyoshi Morita, Chapter 10: A Novel Application of Virtual Reality for Pain Control: Virtual Reality-Mirror Visual Feedback Therapy, Pain in Perspective, Intech, pp. 237-254 (2012).
[16] Manabu Yoshimura, Hiroshi Kurumadan, Junya Hirata1, Katsutoshi Senoo, Kozo Hanayama, Toru Sunagawa, Kosuke Uchida, Akio Gofuku, Kenji Sato, Case Report: Virtual reality training for phantom limb pain after amputation, Frontiers in Human Neuroscience, (2023). DOI 10.3389/fnhum.2023.1246865
[17] 三宅貫太郎, 五福明夫, 福森聡, 杉原太郎, 佐藤健治, 遠隔情報共有機能を持つ在宅バーチャルリアリティ鏡療法システムの構築, 遠隔医療学会雑誌, Vol. 11, No. 2, pp. 64-70 (2015).
[18] B. J. Fogg, Persuative Technology: Using Computers to Change What We Think and Do, Morgan Kaufmann, (2002). （邦訳：高良理, 安藤知華 共訳, 実験心理学が教える人を動かすテクノロジ, 日経BP社, (2005)）.
[19] 三宅貫太郎, 福森聡, 杉原太郎, 五福明夫, 佐藤健治, Captology 諸原理を応用した慢性疼痛患者の治療意欲を維持するための外装的機能の検討, 人工知能学会論文誌, 30巻, 1号 SP1-I, pp. 148-151 (2015).
[20] Satoshi Fukumori, Kantaro Miyake, Akio Gofuku, Kenji Sato, Assessment of motor function in Complex Regional Pain Syndrome with Virtual Reality-based Mirror Visual Feedback: A Pilot Case Study, Neuroscience and Biomedical Engineering, 3(E-pub ahead of print), pp. 1-7 (2015).
[21] 福森聡, 五福明夫, 佐藤健治, 丸尾智子, 谷野雅昭, 鏡療法使用時における運動イメージによる予測と視覚情報の不一致に関わる認知機能の解明, 認知科学, Vol. 23, No. 4, pp. 321-336 (2016).
[22] Hani M. Bu-Omer, Akio Gofuku, Kenji Sato, Makoto Miyakoshi, Parieto-Occipital Alpha and Low-Beta EEG Power Reflect Sense of Agency, Brain Sciences, Vol. 11, Issue 6, https://doi.org/10.3390/brainsci11060743, (2021).