

博士論文

把握力調整能力に着目したヘルスケアシステムと
機能的自立度評価スコアの予測に関する研究

A Study on Healthcare System Based on
Adjustability for Grasping Force and Prediction
of Functional Independence Measure Score

2024年6月

野村 正和

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 超少子高齢社会における医療	1
1.1.2 医療DX	2
1.1.3 リハビリテーションにおける医療DXの現状	3
1.1.4 手指巧緻性に着目した医療DXの現状と課題	4
1.1.5 機能的自立度評価スコアの予測に着目した医療DXの現状と課題	7
1.2 本研究の目的	9
1.3 本研究の構成	10
第2章 把握力調整能力評価トレーニングデバイス iWakka のユーザビリティの向上	12
2.1 はじめに	12
2.2 PC版 iWakka	12
2.2.1 把握力計測システム	12
2.2.2 評価課題と定量的評価のプログラム	15
2.2.3 先行研究	17
2.3 臨床現場からのニーズと要求仕様	18
2.4 iPad版 iWakka	19
2.4.1 把握力計測システム	19
2.5 おわりに	23
第3章 iWakka へのゲーミフィケーションの導入と有用性検証	24
3.1 はじめに	24
3.2 臨床現場からのニーズと要求仕様	24
3.2.1 自閉症児のための臨床現場	25
3.2.2 発達性協調運動障害児のための臨床現場	25
3.3 iWakka Game の開発	26

3.4	Wakka のカバーと小型 Wakka の開発	28
3.5	自閉症児による有用性検証	30
3.5.1	定量的評価のプログラム	30
3.5.2	実験方法	30
3.5.3	実験結果	32
3.6	発達性協調運動障害児による有用性検証	33
3.6.1	定量的評価のプログラム	33
3.6.2	実験方法	34
3.6.3	実験結果	35
3.7	考察	38
3.8	おわりに	39
第 4 章	iWakka ヘルスケアシステムの開発と有用性検証	41
4.1	はじめに	41
4.2	iWakka ヘルスケアシステム	42
4.2.1	課題の実施方法	42
4.2.2	課題の内容	43
4.3	実験方法	44
4.3.1	対象者	44
4.3.2	手順	52
4.3.3	評価項目	52
4.3.4	分析方法	52
4.4	実験結果	53
4.4.1	把握力調整能力の変化	53
4.4.2	把握力調整能力の運動学習	55
4.4.3	認知機能評価と QOL 評価	57
4.5	考察	61
4.6	おわりに	62
第 5 章	FIM スコアの予後予測モデルの開発と有用性検証	64
5.1	はじめに	64
5.2	提案手法	65

5.2.1	予測対象のリハビリ病院と患者データ	66
5.2.2	退院時の FIM スコアの予測手法	75
5.2.3	次元圧縮部と予測部の構造	76
5.2.4	次元圧縮部と予測部の学習	77
5.2.5	次元圧縮部と予測部の評価	77
5.3	提案予測モデルの予測精度の検証実験	77
5.3.1	重回帰モデルとの比較	80
5.3.2	単独予測部モデルとの比較	82
5.4	考察	84
5.5	おわりに	85
第 6 章	結論	87
6.1	本研究のまとめ	87
6.1.1	第 2 章のまとめ	87
6.1.2	第 3 章のまとめ	88
6.1.3	第 4 章のまとめ	88
6.1.4	第 5 章のまとめ	89
6.2	今後の課題と将来の展望	89
6.2.1	将来の医療 DX	89
6.2.2	医療 DX と今後の課題	90
6.2.3	iWakka と今後の課題	91
6.3	リハビリ難民	91
6.4	最後に	92
	参考文献	93
	謝辞	104

図リスト

1.1	Aging population trends and future estimates [2]	2
1.2	Procedure in smart rehabilitation [9]	4
1.3	Functional Impairment Measurement score	8
1.4	Overview of the study	9
2.1	iWakka developed in previous studies [15, 16]	13
2.2	Wakka details	13
2.3	iWakka Viewer for PC	14
2.4	iWakka evaluation tasks	15
2.5	iWakka evaluation sections	16
2.6	Block diagram of grasping force measurement system	19
2.7	iWakka Viewer for iPad	21
2.8	iWakka evaluation results	22
3.1	iWakka Game	26
3.2	Target force while the bird is in contact with clouds	27
3.3	Device cover for safety	28
3.4	Child with autism using iWakka	31
3.5	Changes of $AGFscore$	32
3.6	Target waveforms and sections to be evaluated	34
3.7	$AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 1	36
3.8	$AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 2	36
3.9	$AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 3	37
3.10	$AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 4	37
3.11	Assist time of each section	38
4.1	Flow of daily tasks	42
4.2	1st task of daily tasks	43

4.3	Typical example of changes in grasping force of Subject 12	54
4.4	Mean and standard deviation of daily <i>AGF scores</i>	55
4.5	Mean and standard deviation of daily numbers of stars acquired	55
4.6	Two examples of motor learning (representing exponential decay)	56
4.7	Three examples of motor learning (not representing exponential decay)	58
4.8	HDS-R and MMSE before and after intervention	59
4.9	FAB before and after intervention	59
4.10	TMT-A and TMT-A before and after intervention	59
4.11	Rey complex figure test (copy and 3-minute) before and after intervention	60
4.12	QOL-AD before and after intervention	60
5.1	Histogram of days since onset	75
5.2	Proposed prediction model	76
5.3	Comparison between multiple regression analysis and proposed prediction model	81
5.4	Histogram of errors in multiple regression analysis and proposed prediction model	82
5.5	Comparison between single predictor and proposed prediction model	83
5.6	Histogram of errors in single predictor and proposed prediction model	83
5.7	Comparison of cumulative frequency between single predictor and proposed prediction model	84
6.1	Medical DX in the future rehabilitation	90

表リスト

1.1	Classification of digitization [6]	3
1.2	Purpose of the study	10
2.1	Comparison of iWakka Viewer for PC and iPad	23
3.1	Comparison of iWakka and iWakka Game	27
3.2	Contents of tasks	29
3.3	Comparison of the small-sized and original Wakka	30
3.4	Information on subjects with autism	31
3.5	Experimental contents of tasks	32
3.6	Results of the third task of Subject 2	33
3.7	Information on subjects with developmental coordination disorder	35
3.8	Star acquisition results	38
4.1	5 star tasks per set	44
4.2	Contents(straight) of star task	45
4.3	Contents(mountain and valley) of star task	46
4.4	Contents(wave) of star task	47
4.5	Contents(triangle) of star task	48
4.6	Contents(pulse up) of star task	49
4.7	Contents(pulse down) of star task	50
4.8	Information on older subjects	51
4.9	Cognitive function and QOL assessment before and after intervention	57
5.1	Basic data 1 of the subjects	67
5.2	Basic data 2 of the subjects	68
5.3	Basic data 3 of the subjects	69
5.4	Inspection data 1-1 of the subjects	70
5.5	Inspection data 1-2 of the subjects	71

5.6	Inspection data 1-3 of the subjects	72
5.7	Inspection data 2 of the subjects	73
5.8	Numerated disease name 1-1 of the subjects	74
5.9	Numerated disease name 1-2 of the subjects	75
5.10	One input item set to 0 and its mean error	78
5.11	Prediction accuracy by disease 1	79
5.12	Prediction accuracy by disease 2	80

第 1 章

序論

1.1 背景

1.1.1 超少子高齢社会における医療

総務省統計局によると、2023 年 7 月 1 日現在の我が国の総人口は 1 億 2451 万人であり前年前月に比べ減少している [1]。そのうち 65 歳以上人口は 3624 万人、総人口に占める 65 歳以上人口の割合（以下、高齢化率）は 29.0 % である [2]。また 65～74 歳人口は 1687 万人、総人口に占める割合は 13.5 % である。75 歳以上人口は 1936 万人、総人口に占める割合は 15.5 % で、65～74 歳人口を上回っており高齢化が進んでいる。Fig. 1.1 に高齢化の推移と将来推計を示す。令和 52（2070）年には 2.6 人に 1 人が 65 歳以上、4 人に 1 人が 75 歳以上となり高齢化率は 38.7 % に達すると予測されている。厚生労働省の国民医療費の状況によると、令和 3 年度の国民医療費は 45 兆円であり前年度に比べて 4.8 % 増加し、人口一人当たりの国民医療費は 35 万 8800 円となり、前年度に比べ 1 万 8200 円、5.3 % の増加となっている [3]。加えて少子化により生産年齢人口は減少の一途をたどるため、社会的な問題として第 1 に高齢化による医療費の増加、第 2 に少子化による労働供給の不足が挙げられる。

このような状況から、2022 年には「医療 DX 令和ビジョン 2023」と題した医療のデジタル・トランスフォーメーション（以下、DX）化・医療情報の有効利用を推進するための提言が行われ、データヘルス改革推進本部に厚生労働大臣をチーム長とする「医療 DX 令和ビジョン 2030 厚生労働省推進チーム」が設置された [4]。世界に先駆けて少子高齢化が進む我が国において、国民の健康増進や切れ目のない質の高い医療の提供に向けて医療分野のデジタル化を進め、保健・医療情報（介護含む）の利活用を積極的に推進していくことが重要であるとされている。

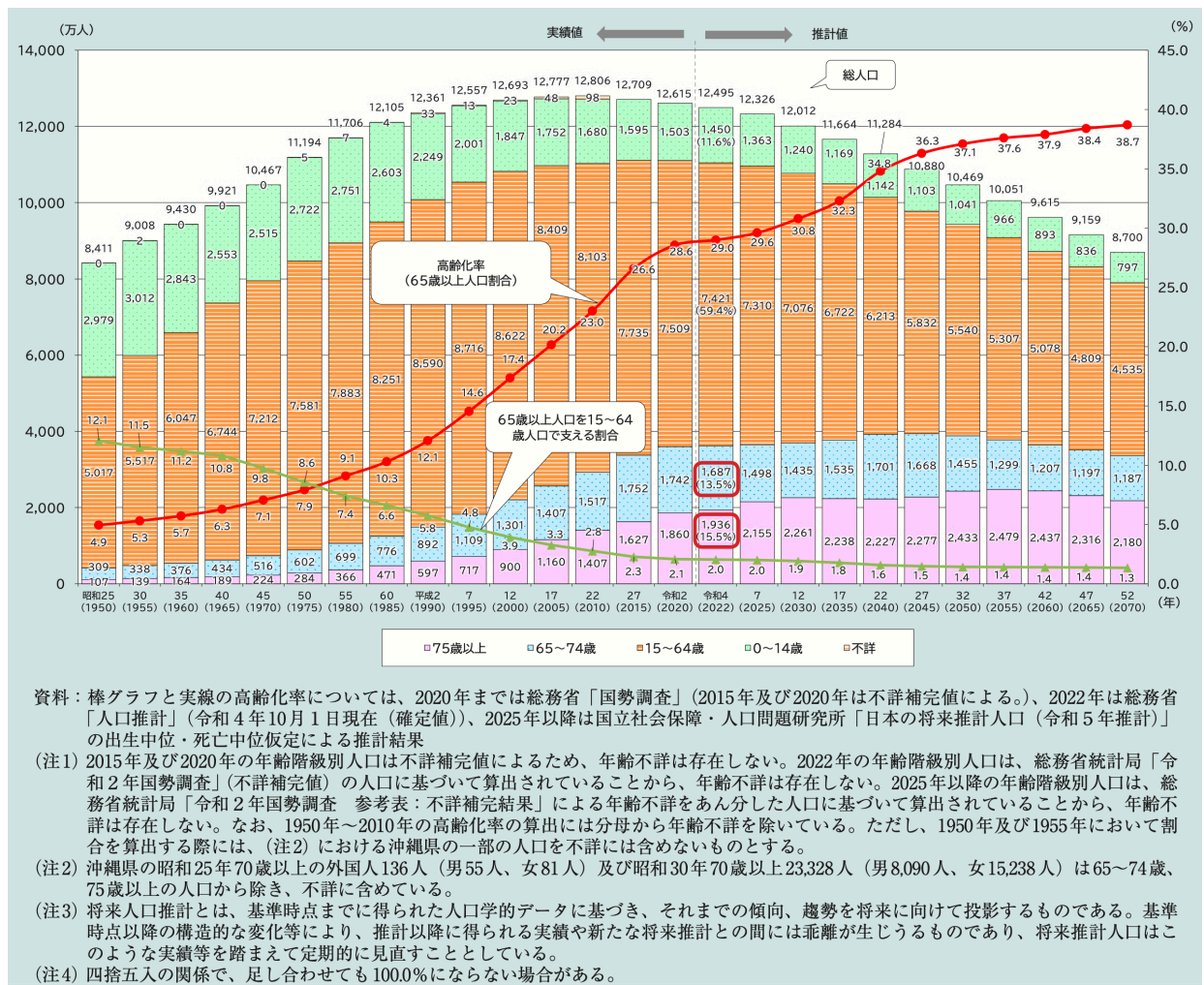


Fig. 1.1: Aging population trends and future estimates [2]

1.1.2 医療DX

DXの概念は、2004年にスウェーデンのウメオ大学のエリック・ストルターマン教授によって提唱された。この定義によると、「ICTの浸透が人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させること」とされている[5]。デジタル化の種類[6]をTable 1.1に示す。企業において考えると会社内の特定の工程における効率化のためにデジタルツールを導入するのが「デジタイゼーション」、自社内だけでなく外部環境やビジネス戦略も含めたプロセス全体をデジタル化するのが「デジタライゼーション」である。一方で、DXはデジタル技術の活用による新たな商品・サービスの提供、新たなビジネスモデルの開発を通して、社会制度や組織文化なども変革していくような取組みを指す概念である。

Table 1.1: Classification of digitization [6]

Digitization (デジタイゼーション)	既存の紙のプロセスを自動化するなど、物質的な情報をデジタル形式に変換すること。
Digitalization (デジタライゼーション)	組織のビジネスモデル全体を一新し、クライアントやパートナーに対してサービスを提供するより良い方法を構築すること。
Digital Transformation (デジタルトランスフォーメーション)	企業が外部エコシステム（顧客、市場）の劇的な変化に対応しつつ、内部エコシステム（組織、文化、従業員）の変革を牽引しながら、第3のプラットフォーム（クラウド、モビリティ、ビッグデータ/アナリティクス、ソーシャル技術）を利用して、新しい製品やサービス、新しいビジネスモデルを通して、ネットとリアルの両面での顧客エクスペリエンスの変革を図ることで価値を創出し、競争上の優位性を確立すること。

厚生労働省は、医療 DX を「保健・医療・介護の各段階（疾病の発症予防、受診、診察・治療・薬剤処方、診断書等の作成、診療報酬の請求、医療介護の連携によるケア、地域医療連携、研究開発など）において発生する情報やデータを、全体最適された基盤を通して、保健・医療や介護関係者の業務やシステム、データ保存の外部化・共通化・標準化を図り、国民自身の予防を促進し、より良質な医療やケアを受けられるように、社会や生活の形を変えること」と定義した [4]。

1.1.3 リハビリテーションにおける医療 DX の現状

リハビリテーション（以下、リハビリ）においても DX が必要であるとされている。川上は、必要である理由を3点挙げた [7]。1点目は、リハビリは予防、医療、介護の全ての場面で行われ、病院、在宅、介護施設というように行われる場所も刻々と変化していく。そのため、対象者の情報を切れ目なく利活用していくために、DX が必要である。2点目は、リハビリが多職種で行われる医療であるということである。医師、療法士といった医療従事者はもちろんのこと、特徴的なのが対象者自身も重要な役割を担っているということである。多くの人を介して行われる医療であるため、DX によって専門性の異なる人々が適切に情報を利用できる仕組みが必要である。3点目は、リハビリが個別性の高い医療であるということである。現状では医療従事者のスキルに依存しているところもあるため、DX に

よって標準化を経て、それを土台としてパーソナライズされた医療の実現が望まれている。

一方、里宇は「スマートリハビリテーション構想」を提唱した。従来のリハビリは多くの成果を上げてきたと評価されるが、1) 評価データが断片的・断片的で統合されていない、2) 評価・治療のサイクルが不十分、3) 治療が体系化されていない、4) 治療中のデータを活かしていない、5) 最重度例への対応が困難という課題を抱えていることを指摘した [8]。スマートリハビリテーション構想は、その解決策のひとつであり、個々の機器を単独ではなく、全体でその効果の最大化を考えていこうという発想から生まれた。この構想の全体像は先端のリハ機器から得られるデータをクラウド化・蓄積・統合し、高度にシステム化することによって評価し、そのうえで最適な治療をシームレスに提供するかたちで適切なトレーニングを実践するものである [9]。Fig. 1.2 に、スマートリハビリテーションの手順のイメージを示す。治療の前段階となる評価がポイントであり、この評価においては開発された装置を通じてアルゴリズムに基づく治療判断とリアルタイムでの活性度合や刺激反応の測定データなどのフィードバックを可能にする。

1.1.4 手指巧緻性に着目した医療 DX の現状と課題

手の機能について考えるうえで、カナダの脳神経外科医ペンフィールドのホムンクルスの図が有名である。手指と手に関係する大脳の運動野は全体の約 1/3 の領域を、感覚野は全体の約 1/4 の領域を占めている [10]。手指と手の表面積は、全身の表面積の約 1/10 にすぎないが、運動野と感覚野を含めた大脳の約 1/3 の領域が手指と手をコントロールするために使われている。また、逆に手を動かすことで脳の広い領域を活性化することができる。それゆえ、手は第 2 の脳と言われている。手は複雑で精巧な運動機能と繊細な感覚機能もっている。少しでも機能を失うと、日常生活あるいは仕事をするうえで大きな不便を感じる。状況に合わせて巧みに動作を調整する能力を巧緻性と呼び [11]、健康で自立した日



出所：未来医療 公開シンポジウム 日本医療研究開発機構等 配布資料 (2017. 3)

Fig. 1.2: Procedure in smart rehabilitation [9]

常生活を営むうえで要求される動作が多くある。巧緻とは、たくみでこまかいこと、精巧で緻密なことであり、手指の動作に関する手指巧緻動作は手先の器用さを必要とする [12]。手先の器用さが必要な場合として、飲み物を注いだ紙コップを持つこと、文字を書くこと、はしで食べ物をつまむなどがある。人間がこれらの動作を行う際、主に視覚と体性感覚などの感覚機能のフィードバックを必要とし [13]、手指巧緻性は認知機能と強く関連する身体機能でもある [14]。つまり手指巧緻性の評価とトレーニングによる維持・向上は、予防、医療、介護といったリハビリが必要な全ての場面において必要不可欠である。そこで筆者らの研究グループは把握に必要な手指巧緻性として、筋収縮を適切にコントロールして把握力を調整する能力を把握力調整能力と定義し、それを評価とトレーニングができるデバイス（以下、iWakka）を開発した [15, 16]。iWakka は、紙を丸めて筒状にした柔軟な「わか」の潰れ具合を評価したいという療法士のニーズを工学的に解釈し定量化したものである。そこで「わか」の代わりとなるという意味で iWakka と命名された [17]。この名称の i は Apple 社製の iPhone の i と同様に、1. individual：独特の・特有の（テーラーメイドリハビリ）、2. instruct：教える（みえるリハビリ）、3. inform：情報を提供する（定量的評価）、4. inspire：鼓舞する（やる気とモチベーションを上げ、患者の早期回復・退院に繋げる）の4つの意味が込められている。先行研究にて、トレーニングの観点ではロボット装置を手指に装着し把握を補助した研究 [18] がある。また、評価の観点では握力計による計測や小型ロードセルにより個々の指の力を計測した研究 [19] がある。しかし、500 g 以下の小さな把握力に着目し iWakka のように柔らかさ、すなわち弾性特性を有したデバイスを用いた評価とトレーニングを行う研究は少ない。この点において iWakka は新規性を有すると考えている。

澤田の報告によると、手指のリハビリを専門のひとつとする作業療法領域についても同様に、デジタルイゼーションやデジタルライゼーションまでは行われている印象はあるが、未だ DX までには到達していないと述べている [20]。作業療法は、人々の健康と幸福を促進するために医療、保健、福祉、教育、職業などの領域で行われる作業に焦点を当てた治療、指導、援助である。作業とは、対象となる人々にとって目的や価値を持つ生活行為のことと定義されている。作業療法の臨床分野は、脳性麻痺や知的障害などの発達期に障害のある人を対象とした発達障害領域、認知症や骨折などの老年期に障害のある人を対象とした老年期障害領域、脳卒中やパーキンソン病などの体に障害のある人を対象とした身体障害領域、統合失調症や躁うつ病などの心に障害のある人を対象とした精神領域の4つに分類される [21]。医療従事者を対象に iWakka のニーズの調査をしたところ、発達障害領域にお

ける発達障害児，老年期障害領域における高齢者，身体障害領域における脳卒中片麻痺患者（以下，脳卒中患者）において，ニーズが高いことが分かった。

発達障害児と手指巧緻性の関係

手指巧緻性が優れることは，生活の自立・学力の高さに関連するとされている [22]。そして，協調運動の困難さは「不器用」と表現される。この症状が生活年齢や技能の学習および使用の機会に応じて期待されるものよりも明らかに劣っており，日常生活動作（Activities of Daily Living：以下，ADL）を著明および持続的に妨げる程の重篤なレベルの場合，発達性協調運動障害（Developmental Coordination Disorder：以下，DCD）とされる [23, 24]。DCD は微細運動と粗大運動の両方の発達障害を特徴とする一般的な神経発達障害である [25]。Asonitou らは，発達性協調運動障害児は運動と認知の課題で低いレベルにあることを示した [26]。Waelvelde らは，発達性協調運動障害児はキャッチボールのスキルの発達に遅れがあり，健常児と比較して異なる運動戦略を用いていることを明らかにした [27]。

そしてDCDは，自閉症スペクトラム障害（Autism Spectrum Disorder：以下，ASD）との併存が認められており，ASDは社会的コミュニケーションおよび対人相互性反応の障害，興味の限局と常同的・反復的行動を特徴とする精神発達の障害である [28]。つまりASDにおいても基本的な運動制御の障害や，運動学習の異常パターン，および手を伸ばす動作の障害などが見られる。さらに年齢に応じた仲間との活動に参加する能力を妨げることにより，社会的にも二次的な影響を与えていると言われている [29]。

高齢者と手指巧緻性の関係

高齢化率が上昇を続けている我が国において，高齢者が病気にならないように取り組む予防医療の重要性が増している。その具体的な政策として，内閣府から誰もがより長く元気に活躍できる社会の実現のために「健康寿命延伸プラン」が策定され，主な取り組みのひとつとして認知症予防が挙げられている [30]。18～94歳の718名を対象に認知機能と手指巧緻性の検査を行ったところ，手指の巧緻動作の低下は認知機能の低下と関連することが明らかになっている [31]。加えて，手指巧緻性は自立した生活のために必要な遂行機能に関連することが示されている [32]。Wang らは，30日間の継続的な手指の運動が軽度認知障害（Mild Cognitive Impairment：以下，MCI）の緩和に効果があることを明らかにした [33]。また，Suzumura らによって手指のタッピングがMCIの判別に有用であることが

示唆された [34]. そこで筆者らの研究グループは、手指巧緻性と認知機能に着目し iWakka を活用した MCI のある高齢者の判別を行ったところ、iWakka より得られる評価変数は判別するための指標となる可能性を示した研究もある [35].

脳卒中患者と手指巧緻性の関係

厚生労働省発表の「令和 2 年患者調査の概況」によると日本国内の脳血管疾患の総患者数は約 174 万人とされており [36], 三大疾病の 1 つである. 脳血管疾患の多くは脳卒中であり, 高齢者で発症のリスクが高いため超高齢社会の日本では医療・介護制度に大きな負担をかけている. 脳卒中とは, 脳梗塞・脳出血・くも膜下出血を総称した用語である. 脳の血管を起点とし脳に障害を与えることで, 脳が管轄する機能である運動障害や思考を中心とした高次脳機能障害が生じる. 脳卒中によって生じた後遺症についてはリハビリを行うことで機能回復を目指す, その方法により回復度合いは異なる. つまり, 状況に合わせたリハビリの方法論の選定と提供が必要となる. 上肢機能障害に対する治療法として Constraint Induced Movement 療法 (以下, CI 療法) があり, 脳卒中治療ガイドラインではグレード A で推奨されている [37]. このグレードは, グレード A (行うよう強く勧められる), グレード B (行うよう勧められる), グレード C1 (行うことを考慮しても良いが, 十分な科学的根拠がない), グレード C2 (科学的根拠がないので勧められない), グレード D (行わないよう勧められる) に分類される. そこで筆者らの研究グループは, CI 療法と iWakka による治療を組み合わせた療法を CI+i 療法を開発し, iWakka の評価デバイスとしての有用性, およびトレーニングデバイスとしての有用性を明らかにした [38]. 加えて iWakka による介入前後の脳波を計測し, 運動皮質の活動を高められることを明らかにした [39].

1.1.5 機能的自立度評価スコアの予測に着目した医療 DX の現状と課題

予後予測が不可欠な理由として, 田中らは脳卒中の患者リハビリにおいてトレーニング開始時に機能回復のゴールを明確にすることは, 患者の家庭, および社会復帰のための適切な計画に必須であるとしている [40]. また正確な予測による目標設定を行い包括的にアプローチすることは脳卒中治療ガイドラインにおいてもグレード B で推奨されている. これらを踏まえたうえで, 脳卒中患者に対しての ADL の再獲得に向けたリハビリが実施される [41]. そして, ADL を数値化したスコアである機能的自立度評価スコア (Functional

Impairment Measurement score：以下，FIM スコア）[42, 43] は最も多用されている ADL スコアである [44].

FIM スコアは個人の身体的，心理的，社会的機能を調査する 18 項目の測定ツールである． Fig. 1.3 に FIM スコアの構成を示す． 運動に関する 13 項目と認知に関する 5 項目からなる． 1 つの項目に対して 1～7 点の 7 段階評価であり最低点が 18 点で最高点が 126 点である． このツールはリハビリまたは医療介入に対して患者の障害レベルと状態の変化を評価するために使用される [42, 43]. 点数の判定は医療従事者によって行われる． FIM スコアの各項目と点数は厳密に規定されており， 判定はマニュアルに則して行われる [45]. それによって判定員内， 判定員間の評価の誤差が抑えられることが先行研究によって示されている [46, 47].

近年の脳卒中の診療は初期治療を行う急性期病院と治療効果を拡大させる回復期リハビリ病院の連携がある． リハビリにおける保険制度では各病院へ支払われる診療報酬は， ADL の評価に直結している [48]. つまり， FIM のスコアに応じて診療報酬点数が支払われる仕組みであり， これはリハビリの成果主義を意味している． さらに 2020 年の診療報酬改定では， 求める成果の引き上げがなされ改定ごとに厳しさを増している． つまり病院にはリハビリの治療の質の向上が求められており， リハビリ病院の退院時の FIM スコアの正確な予測は目標設定， および適切な計画を立案するうえで重要でありニーズがある．

運動項目										認知項目							
セルフケア					排泄		移乗		移動	コミュニケーション		社会認識					
食事	整容	清拭	更衣（上半身）	更衣（下半身）	トイレ動作	排尿コントロール	排便コントロール	ベッド・椅子・車椅子	浴槽・シャワー	トイレ	歩行・車椅子	階段	理解（聴覚・視覚）	表出（音声・非音声）	社会的交流	問題解決	記憶
運動項目 計13～91点										認知項目 計5～35点							
合計 18～126点																	

Fig. 1.3: Functional Impairment Measurement score

愛知県弥富市の医療法人偕行会 偕行会リハビリ病院（以下、偕行会リハビリ病院）の回復期リハビリでは、脳血管疾患などの病気で急性期を脱しても、まだ医学的・社会的・心理的なサポートが必要な患者に対して、多くの専門職種がチームを組んで集中的なリハビリを実施している。そこでは退院時の FIM スコアの予測値を用いて患者へ退院時に獲得する ADL の目標を提示し、リハビリの方針の説明を行いたいというニーズがある。これまで同病院では iWakka を活用した研究が行われたが、把握力調整能力においても正確な予後予測におけるさらなる治療効果の向上が求められている。

1.2 本研究の目的

本研究の全体像を Fig. 1.4 に示す。医療 DX に向けて発達障害児、高齢者、脳卒中患者と医療従事者がそれぞれの立場で把握力調整能力のリハビリを実施するうえで、1) ユーザビリティが高く、モチベーションを維持しながら継続的に把握力調整能力の評価とトレーニングができるデバイスの開発、2) そのデバイスから得られたデータをリアルタイムでクラウドに保存し、医療従事者が閲覧できるシステムの開発、3) 医療従事者が、今後のリハビリ計画を適切に立案するための検討材料として必要となる対象の予後予測ができるモデルの開発が必要である。リハビリの質の向上を図り健康寿命を伸ばすことで、医療費の抑制と労働供給の増加につながると考えられる。

本研究の目的は上記の 1) ～3) の実現である。Table 1.2 に開発、対象、および有用性検証に分けて示す。

1) は発達障害児を対象にデバイスを開発し、把握力調整能力の改善と多面的な評価の可

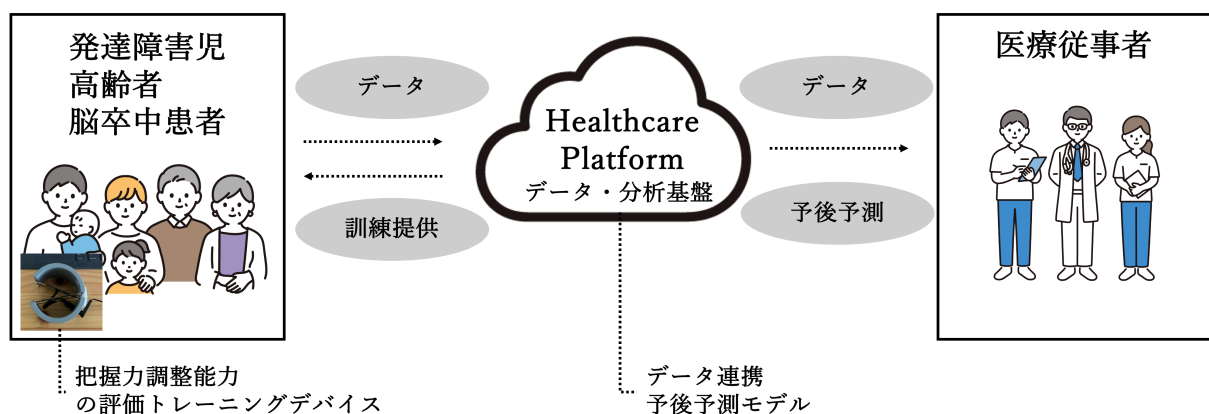


Fig. 1.4: Overview of the study

Table 1.2: Purpose of the study

	開発	対象	有用性検証
1)	把握力調整能力のトレーニングを提供し、その能力を定量的に評価できるデバイス	発達障害領域 ・発達障害児	把握力調整能力の改善と多面的な評価の可能性の確認
2)	把握力調整能力のデータをクラウドに保存し、医療従事者が閲覧できるシステム	老年期障害領域 ・健常高齢者	把握力調整能力と認知機能の改善の確認
3)	FIM スコアの予後予測ができるモデル	身体障害領域 ・脳卒中患者	要求予測精度を満たすことの確認

能性を確認することで有用性を検証する。2) は高齢者を対象にシステムを開発し、把握力調整能力と認知機能の改善を確認することで有用性を検証する。3) は脳卒中患者を対象にモデルを開発し、要求予測精度を満たすことの確認することで有用性を検証する。これらの開発は対象ごとに個別に行うが、それぞれの成果を組み合わせることで、医療 DX を実現することにつながる。

1.3 本研究の構成

本研究は6つの章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序章であり、本研究の背景、医療 DX の現状および手指巧緻性と機能的自立度評価スコアの予測に着目した医療 DX の現状と課題を説明し、本研究の目的を説明する。

第2章では、先行研究にて開発された把握力調整能力評価トレーニングデバイス iWakka のユーザビリティ向上のための iPad 版 iWakka の開発について述べる。具体的には、携帯性を向上させるために、タブレット型コンピュータ（Apple 社製、iPad）に対応した把握力調整能力の評価とトレーニングのためのハードウェアとソフトウェアを開発した。このソフトウェアは臨床現場のニーズに応えた機能を追加することでユーザビリティの向上を図った。それにより、臨床現場への導入や共同研究先の拡大にも繋がった。

第3章では、iPad 版 iWakka にゲーミフィケーションを導入したソフトウェア iWakka Game の開発について述べる。具体的には、自閉症児と発達性協調運動障害児を対象として臨床現場のニーズに基づいて iWakka Game を開発した。把握力調整能力の改善効果と多面的な評価の可能性を確認できたことから有用性を明らかにした。

第 4 章では、iWakka ヘルスケアシステムの開発について述べる。具体的には、第 2 章で開発した iPad 版 iWakka と第 3 章で開発した iWakka Game を組み合わせて、データをクラウド化することで、在宅での把握力調整能力と認知機能を改善させる目的のトレーニングを提供し、さらに医療従事者が日々の実施状況を確認できる iWakka ヘルスケアシステムを開発した。共通の情報基盤を通して高齢者と医療従事者が円滑にコミュニケーションをとり、介入前後において把握力調整能力、認知機能および QOL が向上したことから有用性を明らかにした。

第 5 章では、医療従事者が適切な目標設定と計画を立案するための FIM スコアの予後予測モデルの開発について述べる。具体的には、脳卒中患者を対象として入院時あるいは入院中のデータから退院時の FIM スコアを予測するための機械学習を用いたモデルを開発した。提案予測モデルの平均誤差が要求予測精度の 5 点以下を満たしたことから有用性を明らかにした。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめ、本研究で残された課題を述べるとともに、今後の展望について言及する。

第 2 章

把握力調整能力評価トレーニングデバイス iWakka のユーザビリティの向上

2.1 はじめに

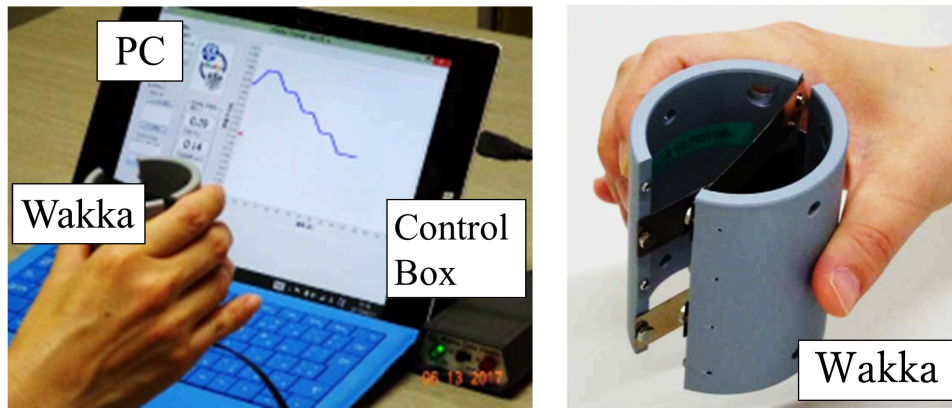
把握力調整能力の維持・向上のためには継続的な評価とトレーニングが欠かせない。脳卒中のリハビリにおいては、早期介入かつトレーニング時間が長い群において ADL に有意な改善が認められた [49]。65 歳以上の高齢者 309 名を対象とした調査では、運動を継続するためには運動を生活パターンに組みこむような行動プランの提示が重要であることが明らかになっている [50]。発達障害児を対象とした作業療法では、「楽しさ」「面白さ」を治療プログラムに織り込むことにより、対象児の持つ能力を最大限に引き出せるよう工夫することが重要であるとされている [51]。先行研究で開発された iWakka (以下, PC 版 iWakka) は把握力調整能力の評価とトレーニングにおいて有用性を示したが、ユーザビリティの観点からは改善の余地がある。そこで、すでに PC 版 iWakka を導入した臨床現場からの要求仕様に基づきユーザビリティを向上させた iPad 版 iWakka の開発について述べる。

2.2 PC 版 iWakka

PC 版 iWakka を Fig. 2.1 に示す。PC 版 iWakka は把握力計測システム、把握力調整能力の評価課題、およびその定量的評価のプログラムからなる [16]。把握力計測システムは把握力を計測する把握体 (以下, Wakka)、コントロールボックス、および Windows OS の PC から構成される。

2.2.1 把握力計測システム

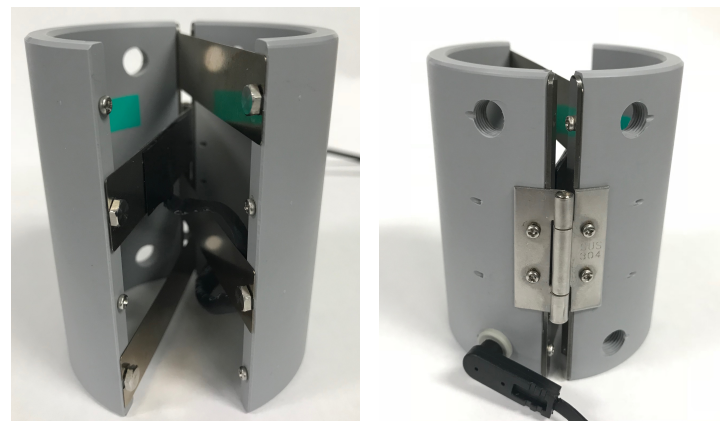
Wakka の詳細を Fig. 2.2 に示す。高さ 80 mm、重量は 112 g の円筒形で、板ばねを片持ち梁として使用した機構である。塩化ビニール (以下, 塩ビ) パイプの半割の片端部を蝶



(a) iWakka

(b) Wakka

Fig. 2.1: iWakka developed in previous studies [15, 16]



(a) Wakka (Front)

(b) Wakka (Back)



(c) Wakka (Top)

Fig. 2.2: Wakka details

板で固定し、さらに板ばねを 2 枚の塩ビパイプに交互にクロスするように取り付けてある。Wakka を把握しようとする時、加えた力に応じて板ばねがたわみ、塩ビパイプが開閉する構造になっている。Wakka を手指で把握すると、板ばねが変形して Wakka の幅が変化する

る。この変化する幅のことを変形量と呼ぶ。これにより、弾性体の特性を再現することができる。Wakka の変形量と反発力との関係は線形性を有する。ばね定数は $4.82 \times 10^2 \text{ N/m}$ である。Wakka に力を加えないときの直径は 65 mm だが、Wakka を 49.2 g の力で押すと 1 mm の変形量が生じることを意味する。板ばねがたわむことによって生じるひずみをひずみゲージが電気信号として検出し、把握力を計測している。Wakka とコントロールボックス、コントロールボックスと PC は USB ケーブルで接続され、PC の USB ポートからコントロールボックスに電源供給が行われる。サンプリング時間は 0.1 sec、力の計測範囲は 0 から 500 g、分解能は 1.6 g である。

Fig. 2.3 に、把握力計測システムで把握力調整能力の定量的評価をするためのソフトウェアである iWakka Viewer for PC を示す。計測された把握力の大きさによって赤色のポインタが上下に動き、青色の目標線は画面の右側から左側に動く。対象者は、この目標線に追従するように把握力を調整し赤色のポインタを上下に動かす。Fig. 2.4 に目標線を示す。目標線は一定値とランプ状の変化が組み合わさった時間的に変化するものである。

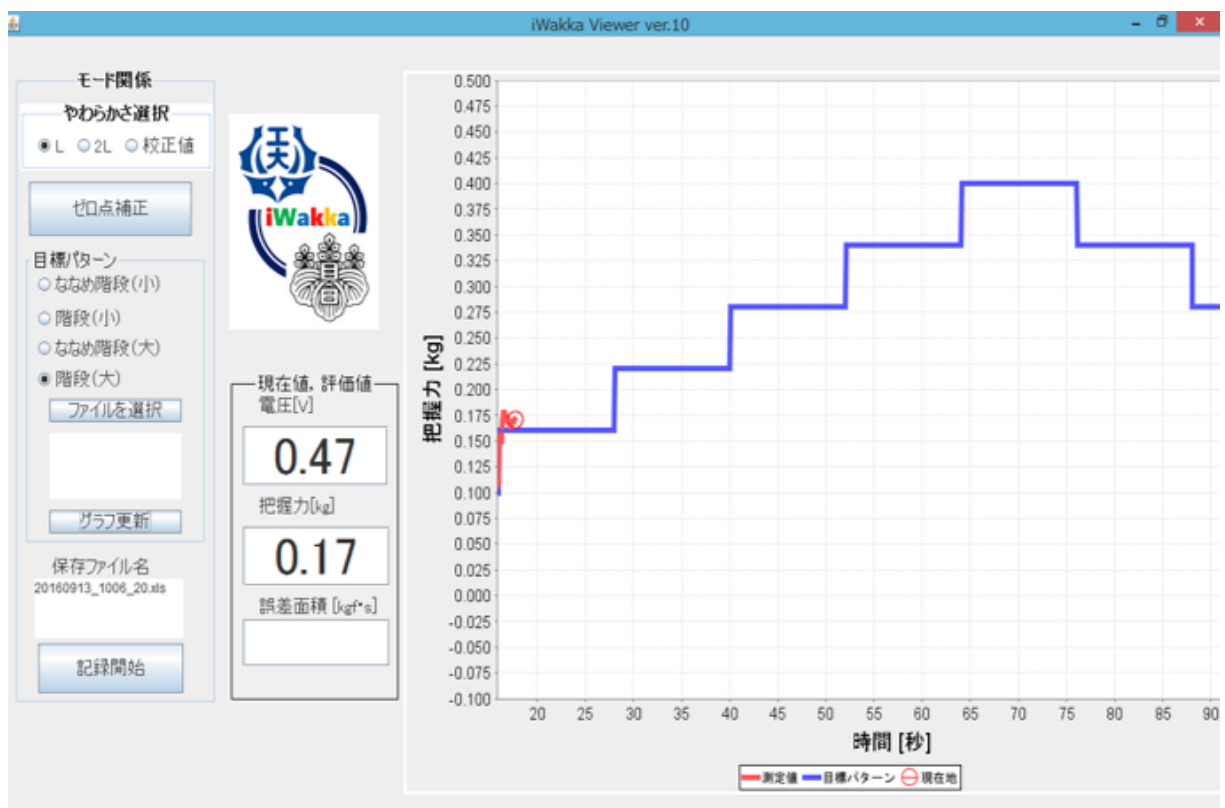
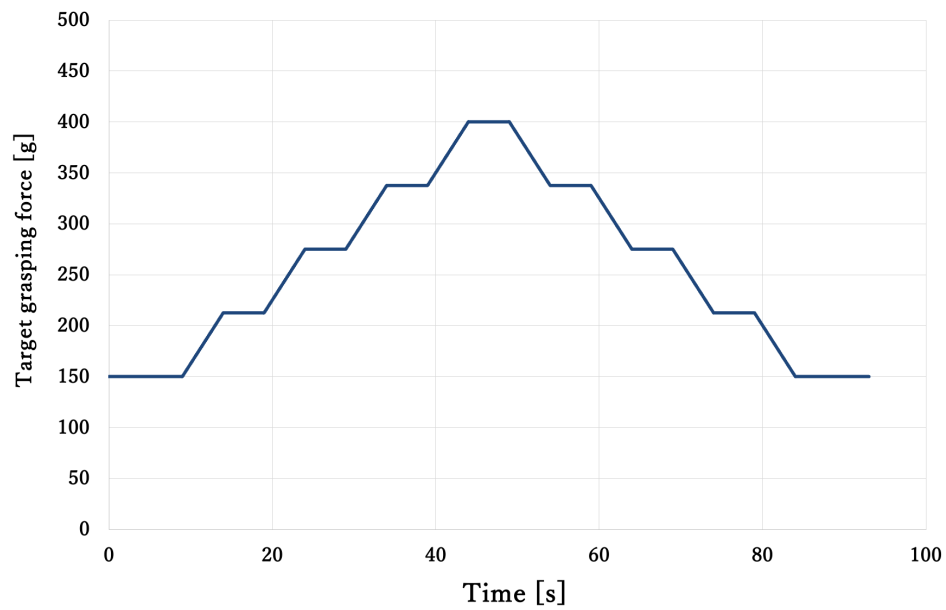
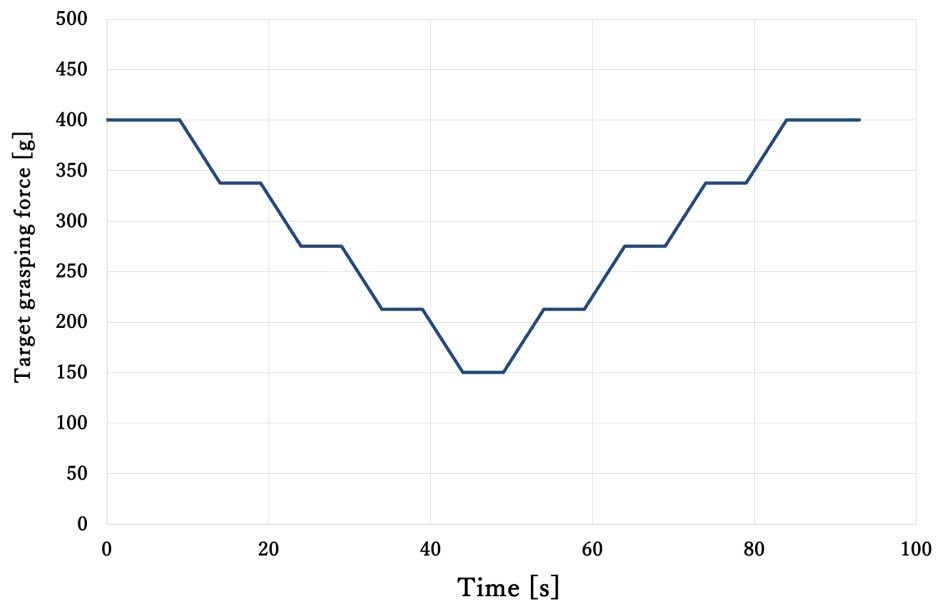


Fig. 2.3: iWakka Viewer for PC



(a) Task 1



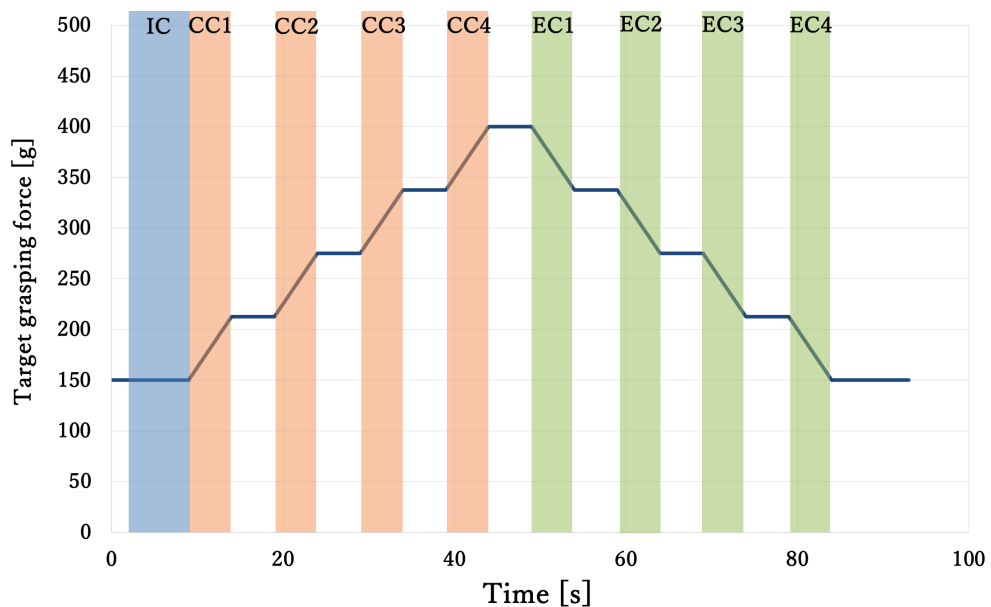
(b) Task 2

Fig. 2.4: iWakka evaluation tasks

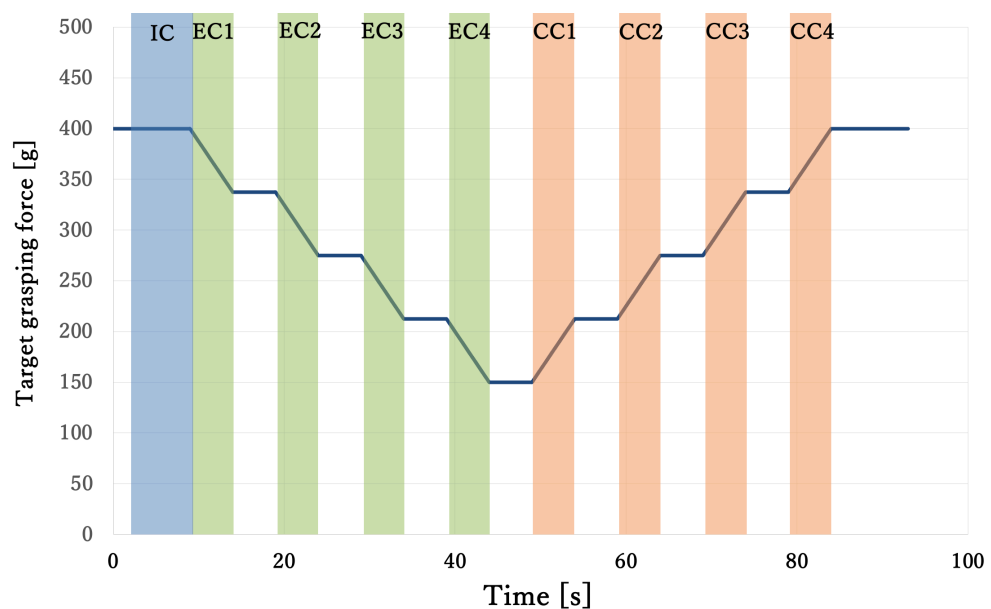
2.2.2 評価課題と定量的評価のプログラム

評価課題を達成するためには、物体を一定の把握力で保持する等尺性筋活動（Isometric muscle activity：以下、IC）、把握力を増加させながら把握する求心性筋活動（Concentric muscle activity：以下、CC）、把握力を減少させながら離す遠心性筋活動（Eccentric muscle activity：以下、EC）が必要となる。そこで把握動作における等尺性筋活動、求心性筋活

動, および遠心性筋活動のそれぞれにおける調整能力を個別に定量的に評価し, 求心性筋活動と遠心性筋活動においては, 目標把握力の大きさに応じて個別に評価する手法が考案された [38]. 目標把握力と評価区間を Fig. 2.5 に示す. 等尺性筋活動の調整能力の評価区間を IC, 求心性筋活動を 4 つに分けて目標把握力の小さい方から順に評価区間を CC1 から CC4, 遠心性筋活動を 4 つに分けて目標把握力の大きい方から順に評価区間を EC1 から EC4 と示す.



(a) Task 1



(b) Task 2

Fig. 2.5: iWakka evaluation sections

定量的評価の指標として、目標値と計測値の平均絶対誤差である $AGFscore$ が定義された。 $AGFscore$ は Eq. (2.1) によって算出される。

$$AGFscore_{(*)} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N |f_d(k) - f(k)| [g] \quad (2.1)$$

(*) は評価区間を示し、 $f(k)$ は把握力の計測値、 $f_d(k)$ は目標把握力である。 T は評価区間の時間であり、IC では 5 sec、それ以外では 3 sec である。 N は評価区間のデータ数であり、IC では 50 個、それ以外では 30 個である。 $AGFscore$ が小さいほど把握力調整能力が高いものとする。等尺性筋活動の調整能力の評価指標を AGF_{IC} 、求心性筋活動の調整能力の評価指標を $AGF_{CCi}(i = 1, \dots, 4)$ 、遠心性筋活動の調整能力の評価指標を $AGF_{ECi}(i = 1, \dots, 4)$ とする。これらの 9 区間の評価指標の値を示すことにより、把握力の大きさと筋活動の種類の関係性が明らかとなる。

2.2.3 先行研究

PC 版 iWakka (本項では以下、iWakka) を活用し把握力調整能力の評価とトレーニングに関する研究は多く行われている。金野らの iWakka の測定誤差の特性を調査した研究 [52] では、加算誤差と比例誤差は認められず、最小可検変化量の 95 % 信頼区間は利き手で 1.2 g、非利き手で 2.1 g であったことが明らかになった。佐藤らは筋収縮様式の違いによって把持力調整の難易度に違いがあるのかを調査した [53]。健常成人 27 名を対象とした実験を行ったところ、利き手・非利き手それぞれにおける求心性・遠心性収縮の $AGFscore$ を比較・検討したところ、有意な差は認められなかった。また、利き手・非利き手間の求心性収縮、遠心性収縮それぞれについても平均誤差値に有意な差はなかった。つまり、一方の手の運動障害の際、もう一方の手の把持力調整能力レベルが回復の指標となることが示唆された。地域在住高齢者 36 名を対象にした研究 [54] では、iWakka による計測を 2 回行い、そのデータの Bland-Altman 分析を行った。その結果、利き手と非利き手の両方で有意な固定バイアスが認められ、誤差の許容範囲は利き手で -2.8~4.4 g、非利き手で -2.6~3.9 g であった。精神科病院にて職場復帰のためのリワークプログラムに iWakka を活用した研究 [55] では、個人作業プログラムにおいて、iWakka によるトレーニングが集中力や注意力などの認知機能の評価とトレーニングになることを調査した。脳卒中患者を対象とした研究 [38] においては、CI 療法と iWakka による治療を組み合わせた CI+i 療法にて iWakka の評価デバイスとしての有用性、およびトレーニングデバイスとしての有用性を明らかにした。

加えて iWakka による介入前後の脳波を計測し、運動皮質の活動を高められることを明らかにした [39].

2.3 臨床現場からのニーズと要求仕様

リハビリにおいて大切なことは、改善した運動機能や認知機能を患者と共有するために記録として残すことと、実施中に患者の状態をリアルタイムに確認しながらトレーニングを実施することである。療法士は日頃の臨床業務中に改善内容を口頭で伝えることが多いが、口頭では分かりづらく改善内容を患者が理解することは難しい。そこで必要なのは評価内容の可視化であり、患者の状態の変化をリアルタイムで確認したいニーズがある。

昨今、日本は諸外国に例をみないスピードで高齢化が進行し、国民の医療や介護の需要がさらに増加することが見込まれているなかで地域包括ケアシステムという概念がある [56]。これは「施設や病院ではなく自分の住み慣れた地域で自宅で生活しましょう。」という考えである。この考えは障害があっても適切な支援を受けることにより在宅生活が可能になるということである。その必要な支援のひとつにリハビリが挙げられる。しかし、ここでの課題は必要な支援要素を適切に立案するための評価が十分に行い難いという点である。病院とは違い自宅でのリハビリとなるため、評価を行なう内容が大幅に制限されてしまう。そのため携帯性が高くどこでも使え、評価内容がリアルタイムで可視化され、その場で確認し支援内容を立案できるシステムが求められている。これらの観点から iWakka を臨床現場や在宅に導入していくための要求仕様を以下に示す。

仕様 1 携帯性の向上

臨床現場や在宅のどの部屋でも利用できるようにするために、タブレット型コンピュータに対応させること。

仕様 2 ユーザごとのデータ保存機能

ひとつのデバイスで複数名が使えるようにするために、ユーザ登録・ログイン機能を追加し、ユーザごとにデータを保存できるようにすること。

仕様 3 評価結果の確認機能

評価結果をグラフで可視化し、患者と療法士がリアルタイムで状況の変化を確認できるようにすること。

仕様 4 データの出力機能

療法士が評価結果を解析をしやすくするために、データを CSV 形式で出力できるようにすること。

仕様 5 操作性の向上

一目で使い方がわかるように、不要な表示要素を削除したり、より分かりやすい表現にしたりすること。

仕様 6 接続の無線化・自動化

接続の手間を省くために、コントロールボックスとタブレット型コンピュータの接続を無線化・自動化すること。

2.4 iPad 版 iWakka

2.4.1 把握力計測システム

要求仕様を満たすために把握力計測システムの構成要素である PC を Apple 社製の iPad に置き換え、iPad のソフトウェアを開発した。そして、iPad とコントロールボックスを無線で接続するために、コントロールボックスに Bluetooth Low Energy (以下、BLE) モジュールを搭載した。この BLE モジュールは有限会社浅草ギ研の BLESerial3[57] である。把握力計測システムのブロック図を Fig. 2.6 に示す。コントロールボックスはアンプ回路、マイコンボード、および BLE モジュールで構成される。コントロールボックスは Wakka のひずみゲージの電気信号を取得し、Bluetooth 経由で iPad に送信する。

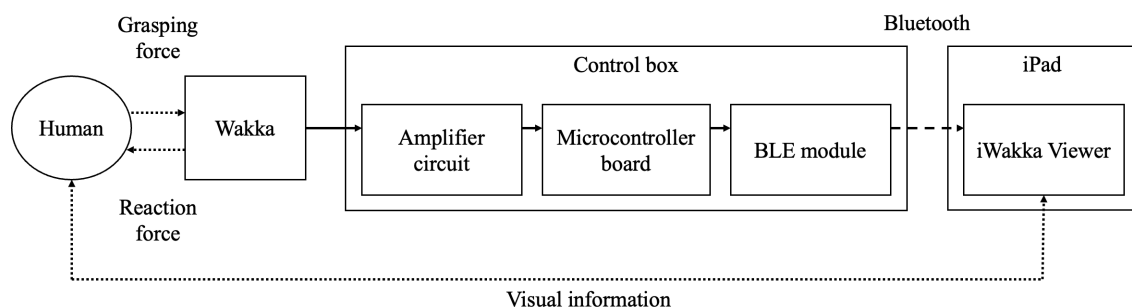
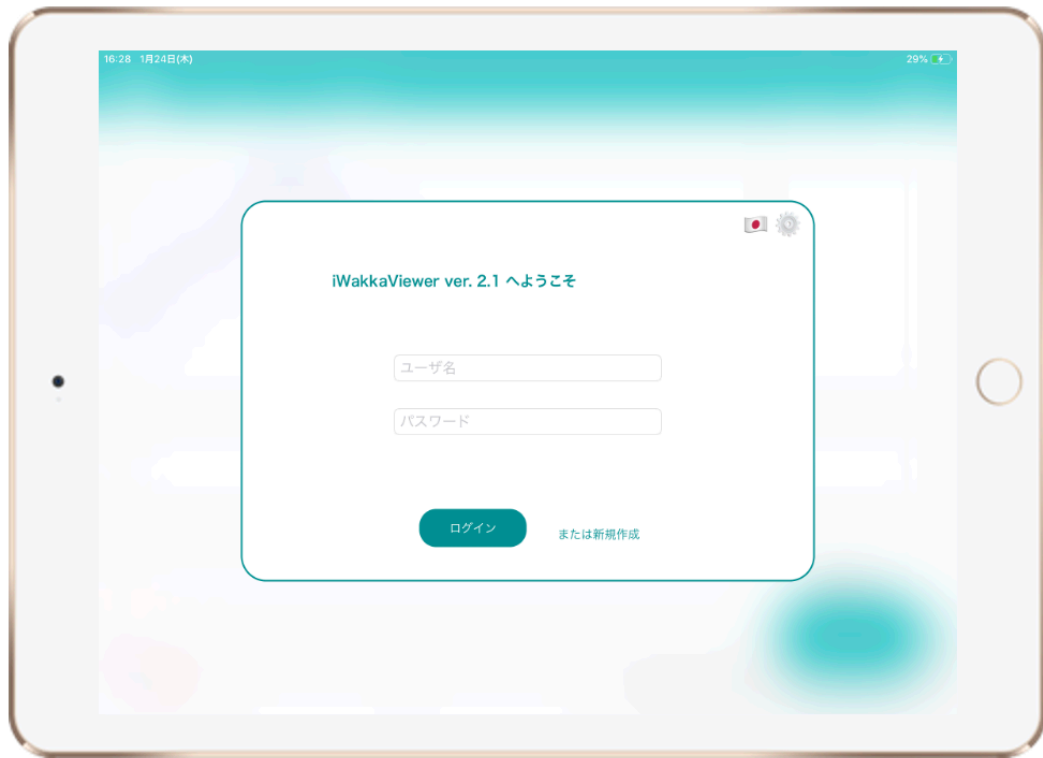


Fig. 2.6: Block diagram of grasping force measurement system

Fig. 2.7 に新たに開発したソフトウェアの iWakka Viewer for iPad[58] を示す。基本機能は PC 版 iWakka と同様であるが、コントロールボックスが送信した値を iPad が無線で受信し画面に表示するように変更した。加えて iWakka の評価とトレーニングを開始する前に、ユーザ登録・ログイン機能を追加した。Fig. 2.8 に評価結果の表示画面を示す。これらにより、ユーザごとにデータを保存でき評価結果を容易に確認できるようになった。そしてデータの出力機能を追加したり、電圧表示などの不要な要素の削除を通して操作性を向上させたり、起動時に Wakka との自動接続機能を追加したりしたことで、ユーザビリティを向上させた。

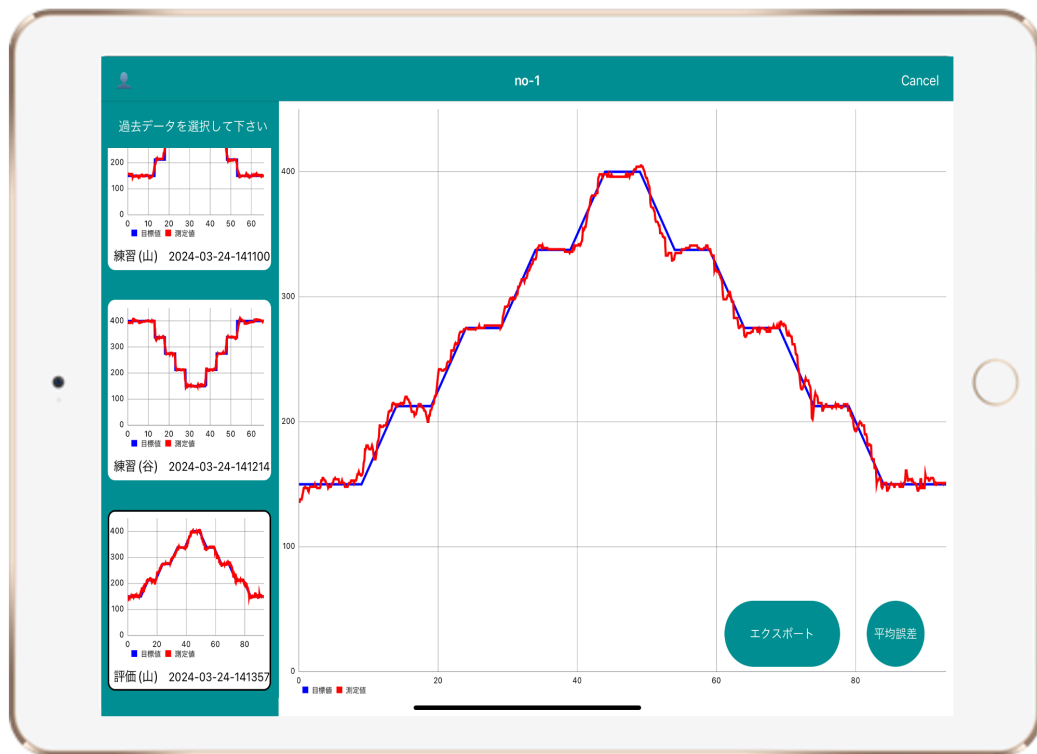


(a) Login view



(b) Task view

Fig. 2.7: iWakka Viewer for iPad



(a) Raw waveform



(b) AGF score by section

Fig. 2.8: iWakka evaluation results

2.5 おわりに

本章では iWakka のユーザビリティ向上のための開発を行った。そのために、まずは臨床現場からの要求仕様をまとめ、その仕様に基づいて iPad 版 iWakka を開発した。本章の成果を以下にまとめる。

1. 臨床現場からの要求仕様をまとめ、iWakka のユーザビリティ向上のための設計を行った。
2. iPad 版 iWakka を開発しユーザビリティを向上させた。先行研究で開発された PC 版 iWakka と iPad 版との比較を Table 2.1 に示す。

本章で述べたユーザビリティの向上によって、iPad 版 iWakka は、共同研究を行っている臨床現場の偕行会リハビリ病院にて軽度認知障害のある高齢者の判別の実験 [35] に活用された。そして千葉県立保健医療大学では、視覚遮断環境下での把握力調整能力と各指の役割分担の検討への活用につながった [59, 60]。今後はさらに多くの臨床現場への導入や共同研究を通して、把握力調整能力の評価とトレーニングに貢献することが期待される。

Table 2.1: Comparison of iWakka Viewer for PC and iPad

	PC 版 iWakka	iPad 版 iWakka
iWakka Viewer の環境	PC (Windows OS)	iPad (iPadOS)
コントロールボックスの接続	PC と有線接続	iPad と無線接続
コントロールボックスの認識	COM ポート	SSID (2 回目以降は自動認識)
ユーザごとのデータ保存	不可	可
評価結果の確認	不可	可
データの出力機能	可	可

第 3 章

iWakka へのゲーミフィケーションの導入と有用性検証

3.1 はじめに

発達障害児を対象とした手指巧緻性の評価とトレーニングの研究は多く行われている。評価において、Li らはペグボードにペグを差し込む課題などの微細運動課題における行動をモニタリングするために、マーカーレスの視覚と運動のトラッキングシステムを設計した [61]。発達性協調運動障害児は健常児と比較して手の運動速度はほとんど変わらなかったが、目標に焦点を合わせる速度は遅いことを発見した。Gonsalves らは 10～12 歳の発達性協調運動障害児が VR のゲームをプレイしているとき、手の進路速度が遅く手首の伸展が大きく肘の屈曲が大きいことを発見した [62]。トレーニングにおいて、Nintendo Wii を使ったトレーニングはモチベーションの観点から有用であると考えられる [63]。しかし、ゲーミフィケーションを導入しモチベーションを維持しながら手指巧緻性の特性の評価とトレーニングを調査した研究は少ない。

そこで本章では、ユーザビリティを向上させた iPad 版 iWakka（以下、iWakka）へのゲーミフィケーションの導入と自閉症児と発達性協調運動障害児を対象とした把握力調整能力の評価とトレーニングとその有用性検証について述べる。

3.2 臨床現場からのニーズと要求仕様

自閉症児と発達性協調運動障害児を対象とし、各臨床現場からのニーズと要求仕様を整理した。

3.2.1 自閉症児のための臨床現場

自閉症児に iWakka を適用するにあたり、自閉症診断、および治療センター Navicula のニーズとして、主にトレーニングの観点の要求仕様を以下に示す。Navicula はポーランドのウッチにある施設であり、自閉症患者へのリハビリサービス、教育の支援、社会的支援、家族に対する支援、障害レベルの判断などを行っている。

仕様 1 ゲーミフィケーションの導入

自閉症児が使い方を理解しやすく、モチベーションを維持できるようなゲーミフィケーションを導入すること。

仕様 2 難易度の異なる課題を追加

自閉症児のレベルに合わせた課題を提供することで、対象に適したトレーニングを行えるようにすること。

仕様 3 デバイスにカバーを追加

Wakka の内部に 4 枚の薄い板ばねがあるため、自閉症児のケガの防止とデバイスの破損防止のためにカバーを追加すること。

3.2.2 発達性協調運動障害児のための臨床現場

発達性協調運動障害児に iWakka を適用するにあたり、東京都立東部療育センターのニーズとして、主に評価の観点の要求仕様を以下に示す。東京都立東部療育センターは、重症心身障害児の医療と療育を総合的に行う施設であり、入所と地域の障害児の生活を支援している。

仕様 1 ゲーミフィケーションの導入

自閉症児と同様に、発達性協調運動障害児も使い方を理解しやすく、モチベーションを維持できるようなゲーミフィケーションを導入すること。

仕様 2 デバイスの小型化

手のサイズが小さい子どもにおいても、適切に把握ができるようにデバイスを小型化すること。

仕様 3 筋活動ごとの評価

IC, CC, EC ごとの特徴を定量的に評価すること。

3.3 iWakka Game の開発

Fig. 3.1 にゲーミフィケーションを導入した iWakka Game を示す。iWakka Game は、把握力の大きさによって上下する茶色の鳥を目標となる赤色の星の高さに合わせることでその星を獲得するゲームである。第 2 章で述べた iWakka の基本機能を継承しているが、使い方を理解しやすくモチベーションを維持できるように工夫した。

Table 3.1 に iWakka と iWakka Game の機能の比較を示す。把握力を茶色の鳥、目標を赤色の星を獲得することにしたことで、使い方を理解しやすくした。そして背景と BGM を追加することで、モチベーションを維持できるようにした。

把握力の調整が極端に困難な発達障害児において、星の獲得は困難となる。そこで鳥が上下に配置された雲に接触中は、画面の右側から左側に動く赤色の星が停止し、雲から離れると再開する機能を追加した。この機能を鳥を星に近づけやすくするという意味でアシ

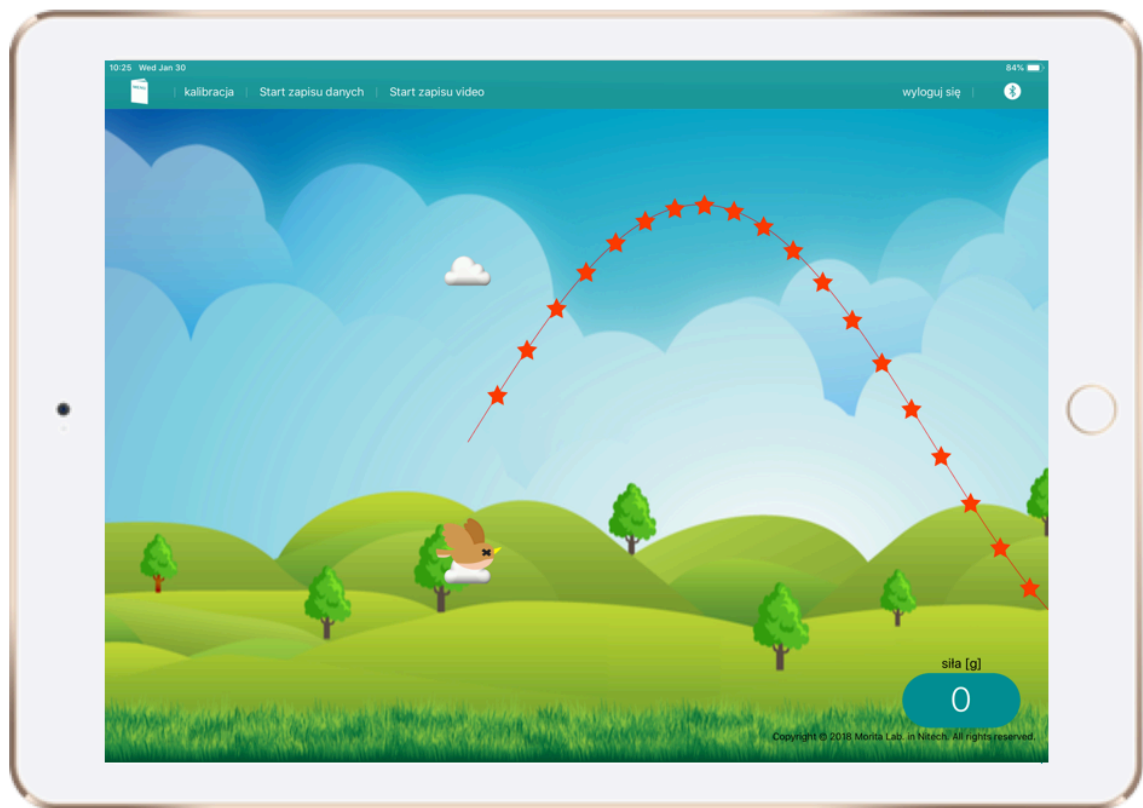


Fig. 3.1: iWakka Game

スト機能とした。Fig. 3.2 に鳥が雲に接触中の目標値の推移を示す。目標値は鳥が雲に接触を開始した時の値が継続される。

発達障害児の様々なレベルに合わせたトレーニングを行えるようにするために、3 種類のパラメータと 9 種類の目標値を設定できるようにした。3 種類のパラメータを以下、9 種類の目標波形を Table 3.2 に示す。

パラメータ 1 鳥と雲の距離

鳥と上下の雲の距離を変えることで、アシスト機能が有効になる目標値と把握力の誤差を調整できる。距離は 0 g から 300 g まで変更可能である。なお鳥と上の雲、および鳥と下の雲の距離は等しい。

Table 3.1: Comparison of iWakka and iWakka Game

	iWakka	iWakka Game
把握力	赤色のポインタ	茶色の鳥
目標	青色の線に追従	赤色の星の獲得
背景	なし	あり
BGM	なし	あり (ポップサウンド)
アシスト機能	なし	あり

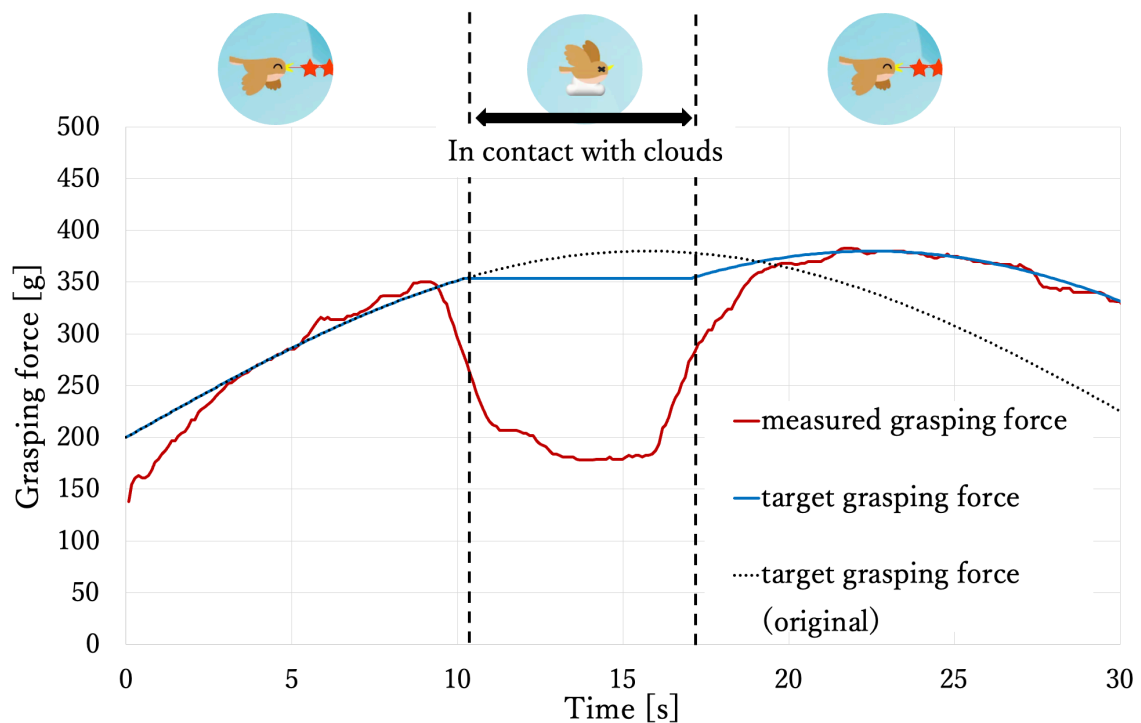


Fig. 3.2: Target force while the bird is in contact with clouds

パラメータ 2 把握力の評価とトレーニングの範囲

目標波形を上下にスライドさせることで、評価とトレーニングがしたい把握力の範囲を調整できる。範囲は-250 g から+250 g まで変更可能である。

パラメータ 3 画面の動く速さ

赤色の星の高さを決めるための目標波形と背景が画面の右側から左側に動く速さを変えることができる。ただし速さが 2 倍になった場合、目標波形の長さも 2 倍に延伸するため課題の合計時間は変わらない。1 倍から 5 倍まで変更可能である。また、延伸したことによって星と星の間隔が広がらないように、星の数を多くすることで調整している。

3.4 Wakka のカバーと小型 Wakka の開発

自閉症児の要求仕様 3 に基づき、Wakka のカバーを開発した。Fig. 3.3 にカバーを示す。厚手で硬めの生地を使うことと、自閉症児が簡単に外せないように布の境目を内側にする工夫がされている。

また、発達性協調運動障害児の要求仕様 2 に基づき、把握する部分の外径を 65 mm から 54 mm へ 83 % 小型化した Wakka (以下、小型 Wakka) を開発した。外径は、標準的な体型の中年男女と小学 6 年生の 12 歳男女の手首から中指の先までの長さの比率を考慮し、療法士と相談して決定した。前者の長さは 183.8 ± 10.0 mm[64] であり、後者の長さ $160.7 \pm$



Fig. 3.3: Device cover for safety

8.9 mm[65]である。Table 3.3 に小型 Wakka と Wakka の比較を示す。Wakka と同様に小型 Wakka のばね定数は一定であるため、変形量と反発力との関係は線形性を有する。ただしばね定数は $5.96 \times 10^2 \text{ N/m}$ であり、Wakka を 60.8 g の力で押すと 1 mm の変形量が生じることを意味する。

Table 3.2: Contents of tasks

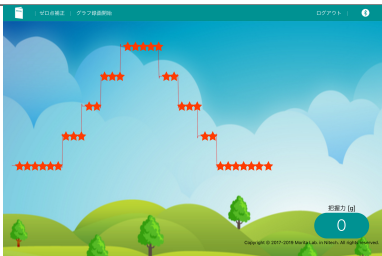
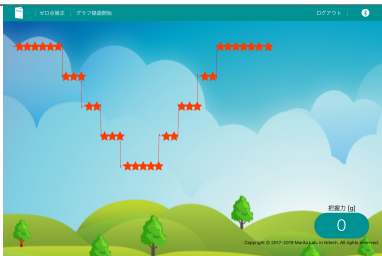

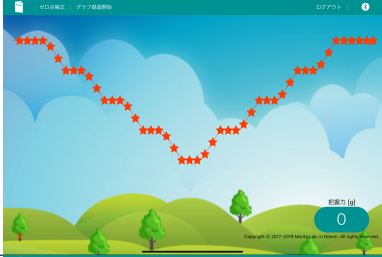
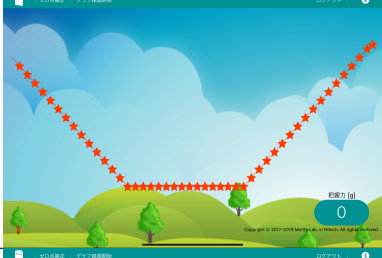
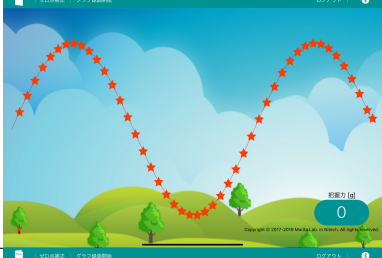
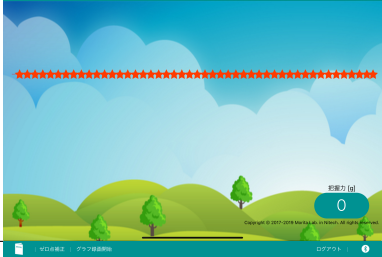
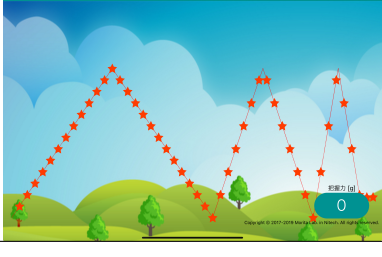
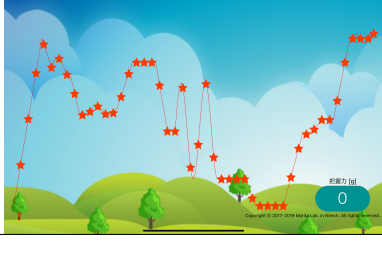
Task	Target waveform	Task	Target waveform
up stairs		down stairs	
mountain		valley	
slope		wave	
straight		triangle	
random			

Table 3.3: Comparison of the small-sized and original Wakka

	Small-sized Wakka	Wakka
Spring constant [N/m]	5.96×10^2	4.82×10^2
Outer diameter [mm]	54	65
Height [mm]	80	80
Weight [g]	81	112

3.5 自閉症児による有用性検証

3.5.1 定量的評価のプログラム

雲に接触中の時間を含めた目標値と把握力の平均絶対誤差を $AGFscore$ として評価した。 $AGFscore$ は Eq. (3.1) によって算出される。

$$AGFscore = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N |f_d(k) - f(k)| [g] \quad (3.1)$$

$f(k)$ は把握力の計測値、 $f_d(k)$ は目標値である。 T は評価区間の時間、 N は評価区間のデータ数であり、課題開始から課題終了までの全区間を示す。計測サンプリング時間は 0.1 sec である。ただし T と N は定数ではなく、鳥が雲に衝突するとアシスト機能により T と N は大きくなる。 $AGFscore$ が小さいほど把握力調整能力が高いことを意味する。加えて、星の獲得数と雲に接触中の時間の累積時間をアシスト時間として評価した。

3.5.2 実験方法

被験者の情報を Table 3.4 に示す。8 名（年齢 15 ± 3 歳、男性 8 名）のポーランド在住の自閉症児であり、自閉症（ASD）だけではなく、中度の知的障害も併発している。また、Subject 3 は、てんかんと視力障害、Subject 4 は、てんかんと筋肉と腱の拘縮を併発している。

Fig. 3.4 に iWakka によるトレーニングを行った被験者 1 人の様子を示す。実験場所は、Navicula 内であり、被験者は iWakka の置かれた机の前に座り、担当の医療従事者がそばで待機した。iWakka は利き手で行い、全員が右利きだった。担当の医療従事者は、被験者が Wakka をうまく把握できなかつたり、使い方を理解していなかつたりした場合に、手で把握を手助けした。トレーニング内容を Table 3.5 に示す。被験者は 7 種類のトレーニング

Table 3.4: Information on subjects with autism

被験者	年齢	性別	障害
1	13	男性	ASD, 中度の知的障害
2	11	男性	ASD, 中度の知的障害
3	19	男性	ASD, 中度の知的障害, てんかん, 視力障害
4	20	男性	ASD, 中度の知的障害, てんかん, 筋肉と腱の拘縮
5	12	男性	ASD, 中度の知的障害
6	15	男性	ASD, 中度の知的障害
7	14	男性	ASD, 中度の知的障害
8	16	男性	ASD, 中度の知的障害



Fig. 3.4: Child with autism using iWakka

を行い、約 11 分間を要した。設定パラメータの鳥と雲の距離は 100 g, 測定範囲は 0~400 g, 画面の右側から左側に動く速度は通常時を 1 倍とし、4 回目と 6 回目は 2 倍、5 回目は 3 倍、7 回目は 5 倍とした。被験者が疲れたり無関心になったりした場合は、トレーニングを続けずに終了した。このトレーニングを週に 1 回を 3 週間行った。 i 週間目 ($i = 1, 2, 3$) のトレーニングをセッション i とした。解析から除外する条件として、医療従事者が手で把握を手助けした場合とした。

3.5.3 実験結果

Subjects 1, 3, 7は, Wakka をうまく把握できなかつたり, 使い方を十分に理解できなかつたりしたことから, 医療従事者が手で被験者の把握の手助けを必要としたため, 結果から除外した. 7種類の課題におけるセッションごとの $AGFscore$ の平均を Fig. 3.5 に示す. セッション1からセッション3への変化から, Subjects 2, 4, 6, 8については, 把握力調整能力の向上がみられた.

特に改善がみられた Subject 2 について, ケーススタディとして説明する. Table 3.6 に, 各セッションの3番目の課題の結果を示す. $AGFscore$ は, セッション1の73.9 g からセッション3の21.2 g に減少した. 星の獲得数は, セッション2では23個だったがセッション

Table 3.5: Experimental contents of tasks

No.	Task	Speed [X]	Total number of stars
1	straight	1	47
2	slope	1	47
3	wave	1	47
4	random	2	93
5	triangle	3	155
6	mountain	2	93
7	random	5	233

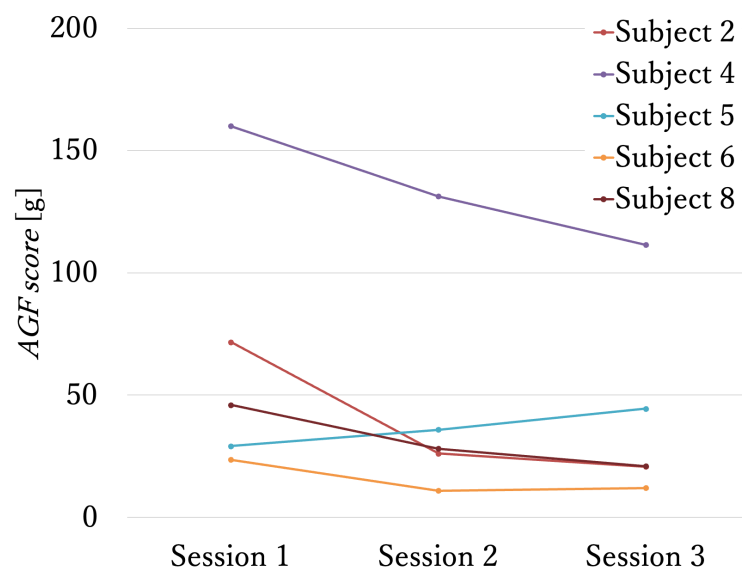


Fig. 3.5: Changes of $AGFscore$

Table 3.6: Results of the third task of Subject 2

Session	<i>AGFscore</i>	Assist time [s]	Number of stars acquired
1	73.9	24.2	-
2	38.7	8.4	23
3	21.2	0.8	33

3では33個に増加した。アシスト時間は、セッション1の24.2 secからセッション3の0.8 secに減少した。

医療従事者の意見として、従来のiWakkaと比較してiWakka Gameのインターフェースは分かりやすく魅力的になったと述べられた。また被験者は課題を終えた後に時折笑顔を見せ、もっと遊びたいとの声が上がった。しかし課題に興味を持てず気が散ってしまう被験者や星ではなく雲を獲得しようとする被験者もいた。被験者のスキルに比べて難易度が高い課題であった場合は、両手でWakkaを把握しようとしたり、すぐに興味を失ってしまったりする場合もあった。

3.6 発達性協調運動障害児による有用性検証

3.6.1 定量的評価のプログラム

発達性協調運動障害児の要求仕様3に基づき、IC、CC、ECごとの特徴を定量的に評価するための手法を考案した。Fig. 3.6に目標波形を示す。この目標波形はTable 3.2のmountainと同様であり、総時間は93 sec、星の総数は47個である。

筋活動ごとの特徴を定量的に評価したいという臨床現場のニーズから、目標波形をIC、CC、ECの区間と把握力の範囲に細分化した。ICは150 gで2回評価し、最初の評価は開始から3 sec後に行った。CCとECは4つの区間で評価した。各区間における把握力と目標値との平均絶対誤差を、Eq. (3.2)のように*AGFscore*として算出した。

$$AGFscore_{(*)} = \frac{1}{T_{(*)}} \sum_{k=1}^{N_{(*)}} |f_d(k) - f(k)| [g] \quad (3.2)$$

ここで、(*)は区間、 $f(k)$ は測定された把握力、 $f_d(k)$ は目標値を表す。 $T_{(*)}$ は区間にかかった時間、 $N_{(*)}$ は区間のデータ数を表す。 T_{IC1} は6 sec、 T_{IC2} は9 sec、CC区間とEC区間のそれぞれの T は5 secであり、 N_{IC1} は60、 N_{IC2} は90、CC区間とEC区間のそれぞれの

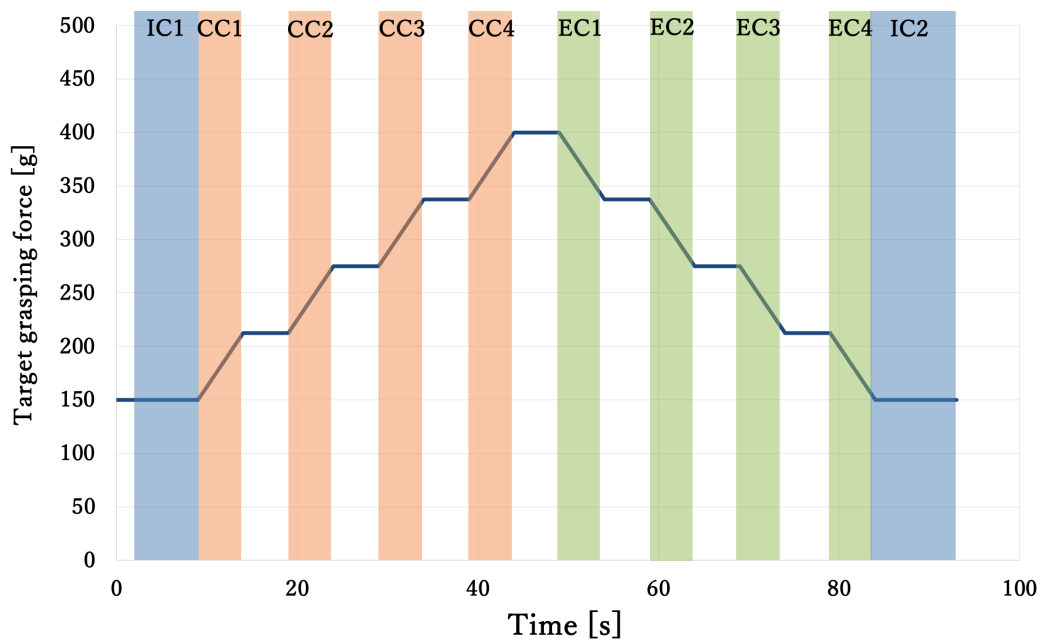


Fig. 3.6: Target waveforms and sections to be evaluated

N は 50 となる。ただし $T_{(*)}$ と $N_{(*)}$ は定数ではなく、鳥が雲に衝突中はアシスト機能により $T_{(*)}$ と $N_{(*)}$ は大きくなる。

一方、雲に接触中の期間 (以下、アシストあり期間) を $AGFscore$ に含むと、雲に接触していない期間 (以下、アシストなし期間) の把握力の調整が上手にできていたとしても $AGFscore$ は大きくなる可能性がある。そこで、目標値と把握力の誤差が小さい時の把握力調整能力を正確に評価するために、アシストなし期間のみで $AGFscore$ (以下、 $AGF_{ua}score$) を評価し、Eq. (3.2) を用いて算出した。なお $AGF_{ua}score$ の場合は、 $T_{(*)}$ と $N_{(*)}$ はアシスト期間を含まないため一定値である。さらに各区間のアシスト時間も評価した。 $AGF_{ua}score$ が小さい方がアシストなし期間での把握力調整能力が高いことを意味する。また、アシスト時間が 0 であった場合は、アシスト機能が必要なかったことを意味し、 $AGFscore$ と $AGF_{ua}score$ は等しくなる。加えて、星の獲得数と雲に接触中の時間の累積時間をアシスト時間として評価した。

3.6.2 実験方法

Table 3.7 に被験者 4 名の情報を示す。すべての被験者は発達性協調運動障害 (DCD) と診断されているか、DCD 疑いを対象とした。Subject 1 は、構音障害疑いを併発し、Subject 3 は、自閉症 (ASD) と注意欠陥多動性障害 (ADHD) も併発している。Movement Assessment

Table 3.7: Information on subjects with developmental coordination disorder

被験者	年齢	性別	障害	MABC-2 (手指巧緻性)
1	6	男性	DCD, 構音障害疑い	6
2	5	男性	DCD	6
3	7	男性	DCD, ASD, ADHD	10
4	9	男性	DCD 疑い	5

Battery for Children-Second Edition (以下, MABC-2) は, 3~16 歳までの小児, および青少年の運動能力における障害を評価するために設計されている [66]. 評価の項目は手指巧緻性, ボールスキル, バランスの 3 項目である. 各項目の最高得点は 19 点であり, 得点が高いほど能力が高いことを示す. ただし 3~6 歳, 7~10 歳, 11~16 歳によって評価内容が異なるため, 評価内容が異なる年齢群の被験者を比較することはできない. iWakka による評価は, 利き手で行った. 課題を実施するために必要となる 3 つのパラメータを決定するために, 予備実験を行った. その結果, 鳥と雲の距離は 100 g, 把握力の評価とトレーニングの範囲は 150~400 g, 画面の動く速度は 2.97 mm/s とした.

3.6.3 実験結果

Fig. 3.7 から Fig. 3.10 に Subjects 1, 2, 3, 4 の AGF_{score} と $AGF_{ua_{score}}$ をそれぞれ示す. Fig. 3.11 は全被験者のアシスト時間を示す. Fig. 3.7 から, すべての EC 区間における AGF_{score} と $AGF_{ua_{score}}$ は, それぞれの CC 区間よりも大きいことがわかる. これは, Subject 1 が把握力を増加させるよりも減少させながら把握力を調整することが苦手であったことを意味する. Fig. 3.11 から, Subject 1 が EC4 区間と IC2 区間でのみアシストを必要としたことがわかる. したがって, AGF_{score} と $AGF_{ua_{score}}$ は, EC4 区間と IC2 区間以外では同じであった. 一方, Subject 2 は CC1, CC2, CC3, EC1 の各区間でアシストが必要であった. これは, Subject 2 が把握力を減少させるよりも増加させながら把握力を調整することが苦手であったことを意味する. Fig. 3.8 から, CC1, CC2, CC3, EC1 の各区間における AGF_{score} は, それぞれ $AGF_{ua_{score}}$ よりも大きかった. つまり, Subject 2 はアシストがあればアシストなし期間でも把握力を調整することができた. IC 区間に着目すると, Subject 1 の IC2 区間における AGF_{score} は IC1 区間よりも大きく, アシスト時間

は EC4 区間と IC2 区間で発生していた。これは、把握力を低下させた後の 150 g での保持能力が低かったことを示している。Fig. 3.9 から、Subject 3 はすべての区間でアシストが不要であった。つまり、大きな誤差を生じることなく、適切に把握力を調整することができた。Subject 4 は、EC1 区間でのアシスト時間が 0.2 sec であるため、ほとんどアシストを必要としなかった。 $AGF_{ua}score$ は、EC1 区間での $AGFscore$ よりも 2.1 g 小さかった。

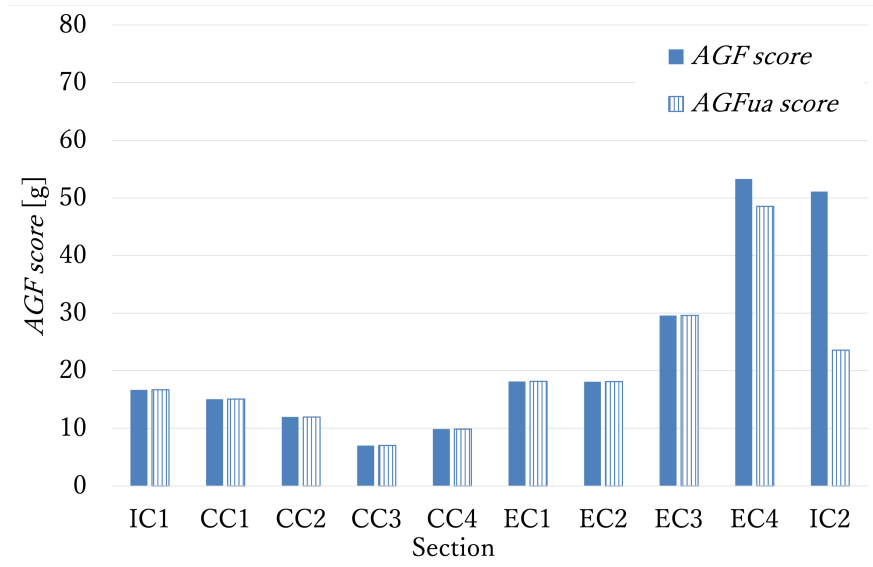


Fig. 3.7: $AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 1

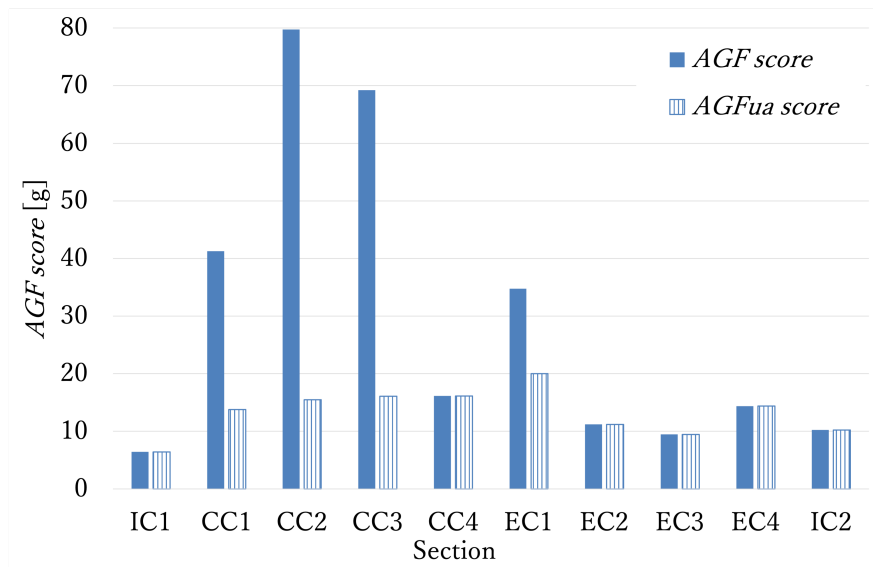


Fig. 3.8: $AGFscore$ and $AGF_{ua}score$ of Subject 2

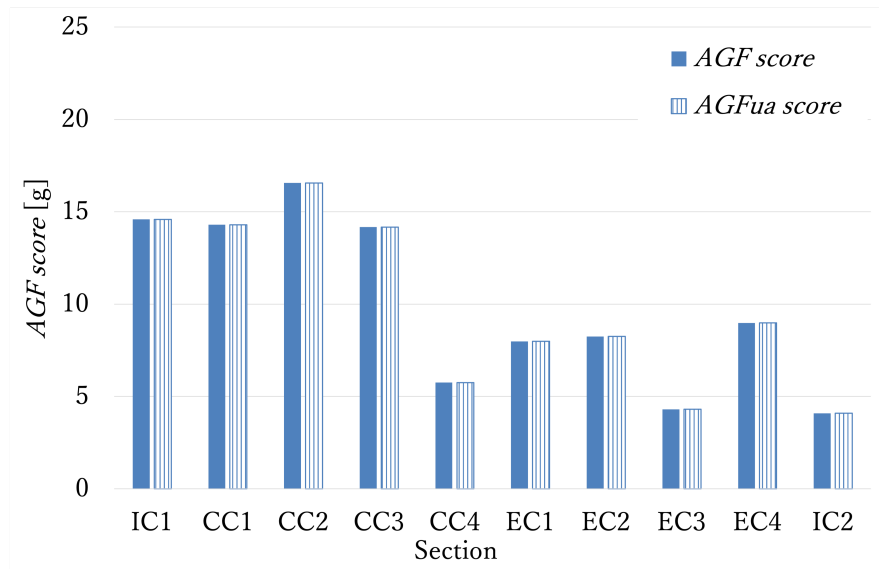


Fig. 3.9: AGF_{score} and $AGF_{ua,score}$ of Subject 3

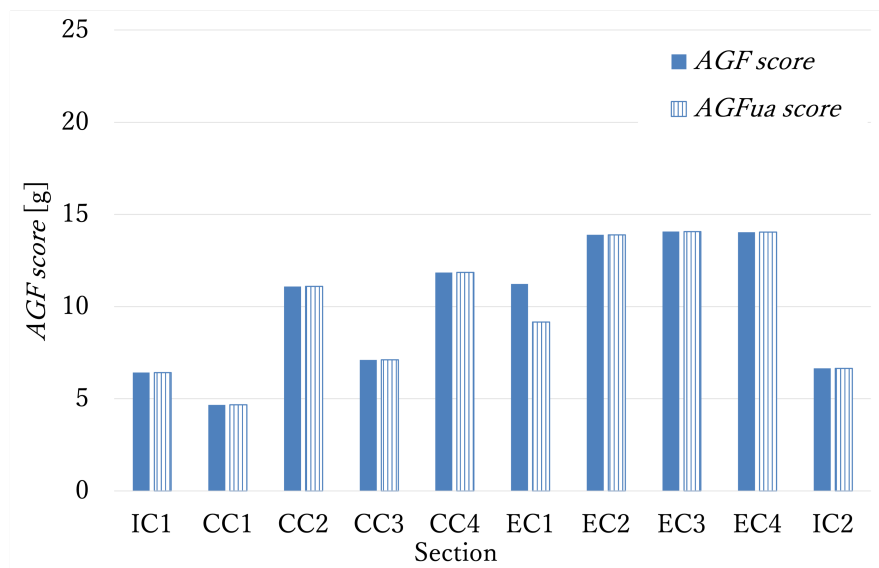


Fig. 3.10: AGF_{score} and $AGF_{ua,score}$ of Subject 4

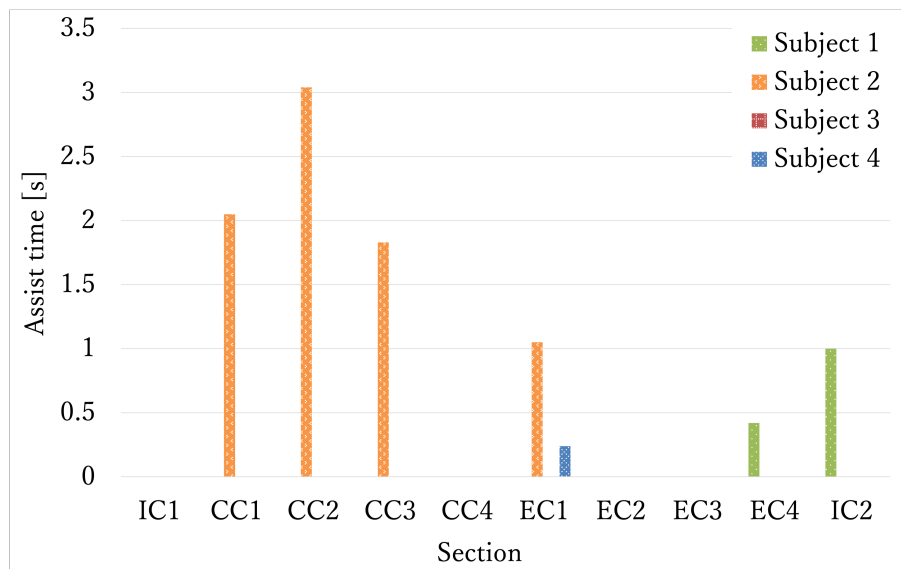


Fig. 3.11: Assist time of each section

Table 3.8 に取得した星の数を示す。Subject 1 と Subject 2 の獲得数は同じであった。しかし、Figs. 3.7, 3.8, 3.11 に示すように、把握力調整能力のうち得意とする筋活動が異なっていた。

3.7 考察

自閉症児においては、トレーニングを主な目的として有用性を検証した。今回の実験では 8 名中 5 名が iWakka の課題を遂行でき、そのうち 4 名が把握力調整能力の向上がみられたが、それぞれの被験者に適した難易度の課題の提供や、さらなる UI/UX の改善によるモチベーションの維持・向上に繋げる必要がある。

発達性協調運動障害児においては、評価を主な目的として有用性を検証した。筋活動の異なる区間を比較することで、把握力調整能力を相対的に評価することが可能であった。しか

Table 3.8: Star acquisition results

Subject	Number of stars acquired	Acquisition rate [%]
1	32	34.4
2	32	34.4
3	35	37.6
4	41	44.1

し $AGFscore$ ではアシストの効果を評価できないため、不十分であった。そこで $AGFscore$ に加えて $AGF_{ua}score$ とアシスト時間を用いることで、アシストの効果を評価することができた。年齢による違いを確認するために、MABC-2 の年齢の分類と同様に、3～6 歳の 2 名と 7～10 歳の 2 名の年齢差による比較を行った。3～6 歳の 2 名は、把握力の増加もしくは減少が苦手であり $AGFscore$ 、または $AGF_{ua}score$ が 20 g を超える区間があった。一方で 7～10 歳の 2 名は 20 g を超える区間はなかった。また、星の獲得数は 7～10 歳の 2 名の方が多かった。つまり被験者 4 名においては、年齢が高い方が、把握力調整能力が高いことが分かった。健常小児における把握力調整能力の発達的变化を調査した研究 [67] では、発達期の把握力調整能力は年齢とともに段階的に向上することが確認された。そして $AGFscore$ の結果より、4～6 歳まではばらつきが大きく把握力調整能力に幅があるが、8 から 9 歳までに収束し一旦プラトーに達すると考えられている。この結果は、発達性協調運動障害児においても同様であると考えられる。 $AGFscore$ を IC, CC, EC に細分化し、アシストを考慮することで、発達性協調運動障害児の一人ひとりの把握力調整能力の特徴を多面的に評価できた。具体的には、把握力の範囲ごとに「保持する」「把握する」「離す」の特性が異なり、それぞれの被験者ごとに苦手としていることを明らかにできた。不器用さがある未就学児、および就学児の把握力調整能力の発達的变化を確認したところ、定型発達児と比較して把握力調整能力の発達が緩徐であることが推察された研究 [68] がある。iWakka による把握力調整能力の評価により対象児が苦手とする把握力調整能力の筋活動を可視化できるため、療法士がより効果的なトレーニングを計画することにつながると考えられる。

これらより、iWakka Game のトレーニングデバイスとしての有用性と評価デバイスとしての有用性を示したことで、さらなる臨床現場へ導入・応用が期待される。

3.8 おわりに

本章では、Navicula と東京都立東部療育センターのニーズから、iPad 版 iWakka にゲーミフィケーションの導入を行なった。また、自閉症児と発達性協調運動障害児への有用性検証を行い有用であることを確認した。本章の成果を以下にまとめる。

1. Navicula と東京都立東部療育センターのニーズをヒアリングした。これにより自閉症児と発達性協調運動障害児への把握力調整能力の評価とトレーニングに必要な要素を明らかにした。

2. iPad 版 iWakka にゲーミフィケーションを導入した iWakka Game と小児向けのデバイスのカバーや小型 Wakka を開発した。そして、把握力調整能力の定量的評価のプログラムを考案した。
3. トレーニングを主な目的として自閉症患者への有用性検証を行い、把握力調整能力の改善を確認した。
4. 評価を主な目的として発達性協調運動障害児への有用性検証を行い、把握力調整能力の特徴を多面的に評価した。

第 4 章

iWakka ヘルスケアシステムの開発と有用性検証

4.1 はじめに

厚生労働省では可能な限り住み慣れた地域で生活をしている高齢者（以下、地域在住高齢者）が、自分らしい暮らしを人生の最期まで続けることができるよう、地域包括ケアシステムの構築を推進している [69]。そのためには社会保障制度や公的サービスに加えて、高齢者自身が認知課題と運動を同時に行うコグニサイズなどの日常生活で取り組めることを積極的に取り組み、継続することが重要であり [70]、在宅で容易にトレーニングできるシステムが求められている。Kampmeijer らの文献調査によると、高齢者の健康増進や一次予防と ICT やスマートデバイスの活用には関連性があり、効果的に活用するためにはモチベーションとサポートが影響すると報告されている [71]。福井らの研究によると、週 1 回 90 分（全 12 回）の教室にて、タブレット型アプリケーションを使用した認知・上下肢の運動トレーニングプログラムの介入が、高齢者の認知・身体機能の維持・向上につながり、ライフスタイルが改善することが示唆された [72]。また、地域住民が脳機能トレーニングツールをタブレット端末で 1 ヶ月間実施したところ、認知機能の向上と気分の改善や疲労感の軽減が認められた [73]。つまりタブレット端末を用いたトレーニングが認知機能の向上に寄与する可能性が示されている。他には高齢者の在宅での手指巧緻性のトレーニングが複雑な手指巧緻性の課題のパフォーマンスと遂行機能を改善できることを示した研究がある [74]。しかし在宅でのタブレット端末を用いた把握力調整能力のトレーニングが認知機能へ与える効果を調査した研究は少ない。

そこで本章では、把握力調整能力と認知機能を改善させる目的でトレーニングを提供する iWakka ヘルスケアシステムの開発と、地域在住高齢者に対する有用性を検証について述べる。iWakka ヘルスケアシステムは、第 2 章、第 3 章で述べた iPad 版 iWakka とゲーミフィケーションを導入した iWakka Game を活用し、日々の把握力調整能力のトレーニングの提供と、その学習の変化をモニタするためにソフトウェア部分を開発する。有用性の

検証とは、本研究の仮説である把握力調整能力の継続的なトレーニングが、把握力調整能力と認知機能を改善させられることを検証することである。

4.2 iWakka ヘルスケアシステム

高齢者が在宅で把握力調整能力の評価とトレーニングができる課題を行い、その課題のデータをサーバに保存することで、療法士が実施状況を確認できる iWakka ヘルスケアシステムを開発した。

4.2.1 課題の実施方法

Fig. 4.1 に 1 日の課題の流れを示す。ユーザはログインし、カレンダーから本日の欄をタップし、iPad とコントロールボックスを接続する。課題は 6 種類であり、1 回目は iPad 版 iWakka の課題（以下、線課題）、2 回目から 6 回目は iWakka Game の課題（以下、星課題）である。ユーザは課題を行った後、自己評価を 4 択（できた、まあまあできた、あまりできなかった、できなかった）、感想を 4 択（楽しかった、頑張った、難しかった、疲れた）から選択する。この 1 日あたり約 10 分間のトレーニングを 30 日間連続で行う。サーバには、線課題の把握力の時系列データ、星課題の星の獲得数、自己評価、感想のデータが保存される。医療従事者は、そのデータから課題が問題なく実施されているかどうかを日々確認する。ただしユーザへのフィードバックは行わない。

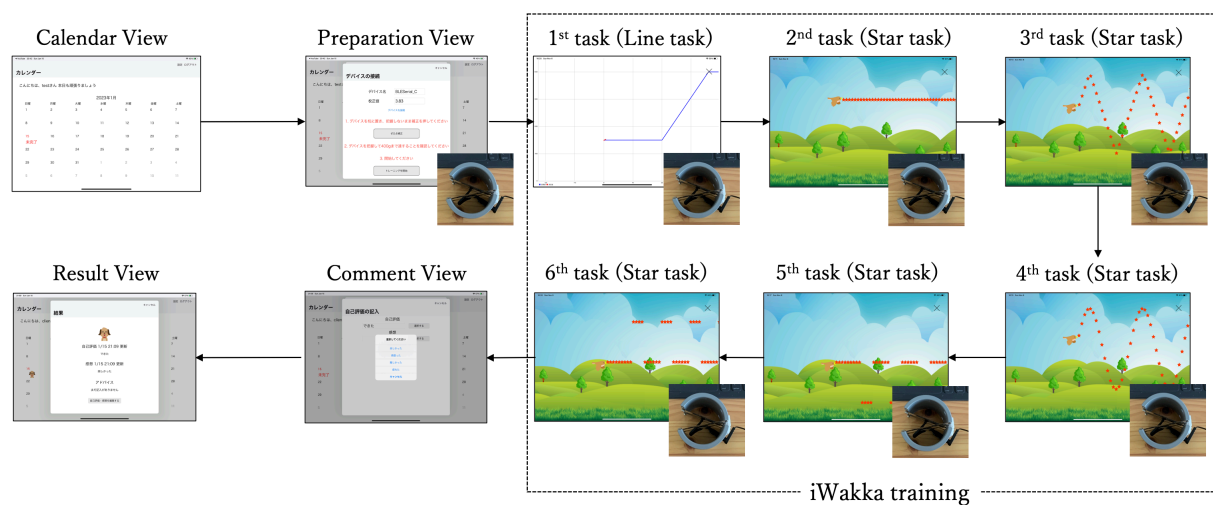


Fig. 4.1: Flow of daily tasks

4.2.2 課題の内容

Fig. 4.2 に線課題の目標線を示す。台形形状であり、日々の把握力調整能力の変化を定量的に評価するために 30 日間同じ目標線とする。評価指標は、目標値と計測値の平均絶対誤差である *AGFscore* とする。

課題の設定にあたり難しくしすぎないことと、ユーザーに達成感を多く感じさせるために課題は細かく設定することが推奨されている [75]。そこで 1 日あたり 5 回の星課題の星の配置パターンがすべて異なり、高さが一定なもの、正弦波や矩形波のように変化するものなどを 21 個用意した。星の総数は 1 課題あたり 93 個であり 1 sec 間隔で配置した。5 日間を 1 セットとして、1 セットを終えるごとに難易度を上げた。隣り合う星の高さの差の平均値を星変化量と定義した。星変化量が大きいほど 1 sec あたりの把握力の調整量がより大きくなるため課題の難易度が高い。Table 4.1 にセットごとの 5 回の星課題の名称、Table 4.2 から Table 4.7 に星課題の内容と星変化量を示す。課題の名称の数字の部分は、大きい方が難易度が高い。達成感を与えるために星の平均獲得率が 90 % 以上になるように、予備実験の結果に基づいて星変化量を調整した。

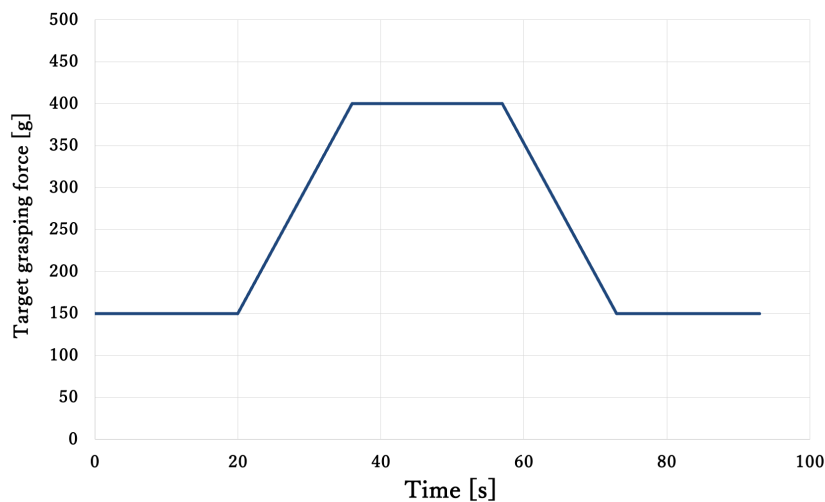


Fig. 4.2: 1st task of daily tasks

Table 4.1: 5 star tasks per set

Set	2nd task	3rd task	4th task	5th task	6th task
1	straight 1	wave 1	triangle 1	pulse up 1	mountain 1
2	straight 2	wave 1	mountain 2	pulse up 1	pulse down 1
3	straight 3	wave 2	triangle 1	valley 1	pulse up 2
4	straight 2	mountain 2	wave 3	valley 2	pulse down 2
5	straight 3	triangle 3	valley 3	pulse down 3	pulse up 3
6	straight 1	triangle 5	wave 5	pulse down 3	pulse up 3

4.3 実験方法

4.3.1 対象者

地域在住高齢者 17 名を対象とした。ただし、30 日間のうち 3 日間以上実施しなかった 3 名の被験者のデータを解析対象から除いた。その結果、地域在住高齢者 14 名（年齢 72.1 ± 5.2 歳，男性 2 名，女性 12 名）となった。その被験者を Table 4.8 に示す。検定力分析ソフトの G*Power[76] を用いて必要なサンプル数を計算したところ 12 名であったので、必要なサンプル数を満足している。ただし、効果量を 0.8，有意水準を 0.05，検定力を 0.8 として計算した。健常の基準は、日常生活が自立していることと適切に時間管理をして物事を遂行可能な方のみとするために、Clinical Dementia Rating[77]（以下，CDR）の結果が 0 点であることとした。加えて、抑うつ症状がない基準として Beck depression inventory-II[78]（以下，BDI-2）が 10 点以内であることとした。本研究を実施するにあたり、全被験者に対して、事前に書面にて同意を得た。また、名古屋工業大学生命倫理審査委員会において承認を得たうえで実施した（承認番号: 2021-25）。

Table 4.2: Contents(straight) of star task


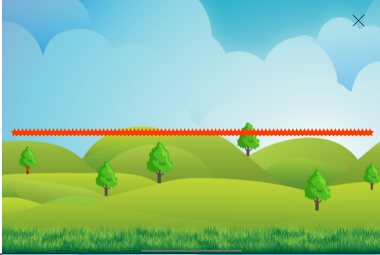

Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
straight 1		300	300	0.0 \pm 0.0
straight 2		200	200	0.0 \pm 0.0
straight 3		100	100	0.0 \pm 0.0

Table 4.3: Contents(mountain and valley) of star task

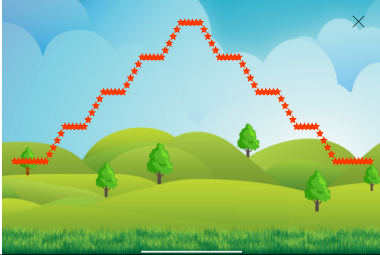
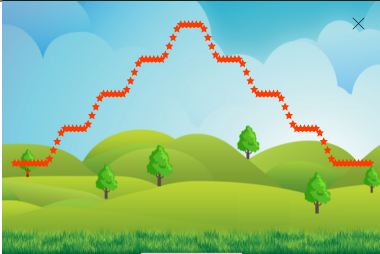
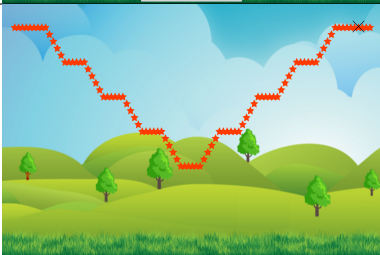
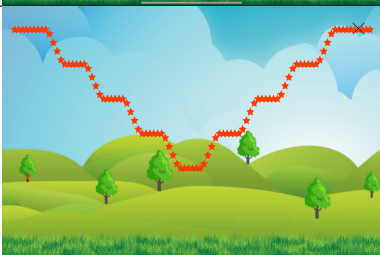
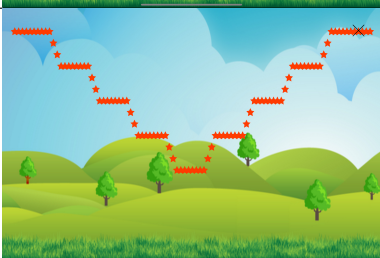
Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
mountain 1		400	150	5.4 \pm 6.2
mountain 2		400	150	5.4 \pm 6.7
valley 1		400	150	5.4 \pm 6.2
valley 2		400	150	5.4 \pm 6.7
valley 3		400	150	5.4 \pm 9.2

Table 4.4: Contents(wave) of star task


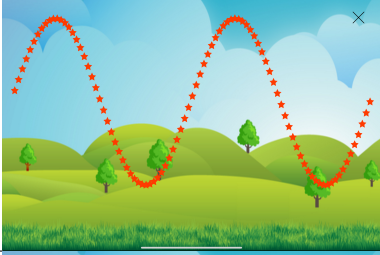
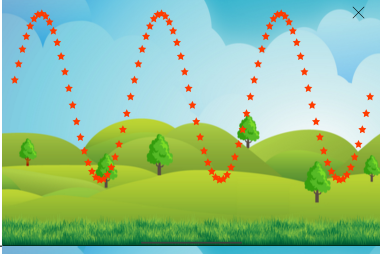
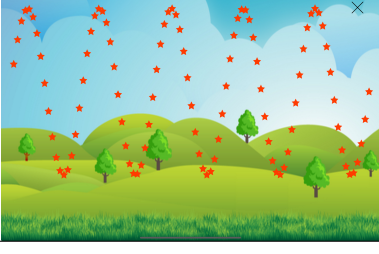
Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
wave 1		400	100	6.5 ± 3.1
wave 2		400	100	12.9 ± 6.3
wave 3		400	100	19.3 ± 9.4
wave 5		400	100	32.1 ± 15.6

Table 4.5: Contents(triangle) of star task

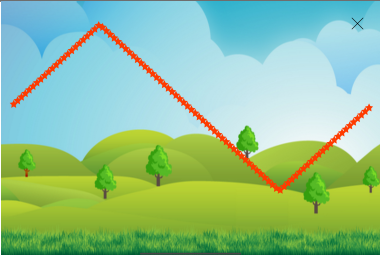
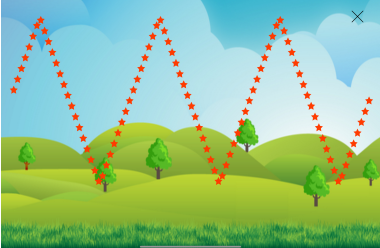
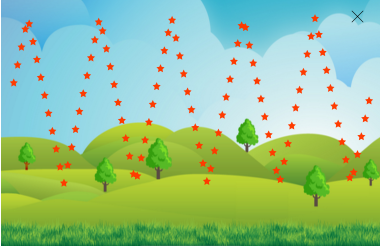
Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
triangle 1		400	100	6.4 ± 0.5
triangle 3		399	101	18.7 ± 2.4
triangle 5		398	102	30.5 ± 5.9

Table 4.6: Contents(pulse up) of star task


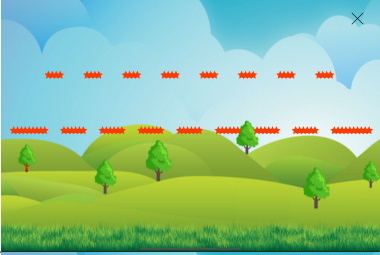
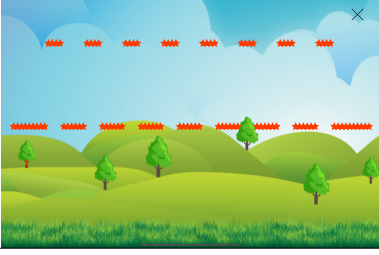
Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
pulse up 1		250	200	8.6 ± 19.0
pulse up 2		300	200	17.2 ± 37.9
pulse up 3		350	200	25.8 ± 56.9

Table 4.7: Contents(pulse down) of star task




Star task	Target waveform	Amount of change in height of adjacent stars [g]		
		Maximum value	Minimum value	Mean \pm SD
pulse down 1		200	150	8.6 ± 19.0
pulse down 2		200	100	17.2 ± 37.9
pulse down 3		200	50	25.8 ± 56.9

Table 4.8: Information on older subjects

被験者	年齢	性別	教育歴
1	68	女性	12
2	73	男性	12
3	73	女性	16
4	68	女性	16
5	64	女性	16
6	68	女性	16
7	71	男性	12
8	71	女性	12
9	77	女性	12
10	74	女性	14
11	70	女性	12
12	71	女性	12
13	86	女性	12
14	75	女性	12

4.3.2 手順

30 日間の介入の前後に認知機能評価と QOL 評価を行った。介入の 1 日目から 30 日目は、iWakka ヘルスケアシステムの課題を行った。課題を実施するユーザは被験者であり、実施場所は被験者の自宅とした。データを確認する医療従事者は、実務経験 19 年の作業療法士が行なった。なお介入前後にて Wakka の実際の把握力と表示している把握力が一致していることを確認することで、再現性に問題がないことを確認した。

4.3.3 評価項目

総合的な認知機能を評価するために HDS-R[79] と MMSE[80] を行った。それぞれの満点は 30 点である。認知機能の評価として、総合的なもののほか、個別評価として遂行機能、注意機能、記憶機能の評価がある。遂行機能の評価として FAB[81] を行った。FAB の満点は 18 点である。注意機能の評価として TMT-A と TMT-B[82] を行った。TMT の得点は課題を完了するまでの所要時間であるため、小さい方が良い。記憶機能の評価としてレイ図形の模写と 3 分遅延 [83] を行った。レイ図形のそれぞれの満点は 36 点である。QOL の評価として QOL-AD[84] を行った。QOL-AD の満点は 52 点である。把握力調整能力の評価は、iWakka ヘルスケアシステムの線課題を用いた。課題は利き手により行い、利き手の判断に Edinburgh Handedness Inventory[85] を用いた。

4.3.4 分析方法

30 日間の介入による変化を確認するために、認知機能評価と QOL 評価については介入前後の平均値と標準偏差を用いた。把握力調整能力は、1 セット目と 6 セット目の 5 日間平均 *AGFscore* の平均値と標準偏差を用いた。対応ありの Wilcoxon 符号付順位検定を行い、有意差を確認した。有意水準は 0.05 とした。また、認知機能と把握力調整能力の関連性を確認するために、相関係数を用いた。有意水準は 0.05 とした。時間経過における把握力調整能力の変化を被験者ごとに定量化して比較することを目的として、5 日間平均 *AGFscore* の推移から、運動学習の過程を調査した。中村は、運動学習とは各種運動技能を獲得する過程を示し、その遂行の変化を表した学習曲線は、大略 4 型（負の加速曲線、正の加速曲線、S 字形曲線、直線）に分類されると報告した [86]。西谷らは、iWakka による把握力調整時の運動学習の定量化と加齢との関係性を調査した [87]。若年健常者（年齢 27.6 ± 2.90

歳, 男性 3 名, 女性 5 名) において, iWakka による運動学習を指数関数的減衰の近似曲線にて定量化した. そして, 加齢に伴い学習後の運動の正確さが低下することを明らかにした. 本研究では, 1 日あたりの $AGFscore$ の変動による影響を少なくするために, セットごとに運動学習を定量化する. このセット番号を n ($n = 1, 2, \dots, 6$), 各セットの $AGFscore$ の平均を $y_{AGF}(n)$ とし, Eq. (4.1) の近似式とした.

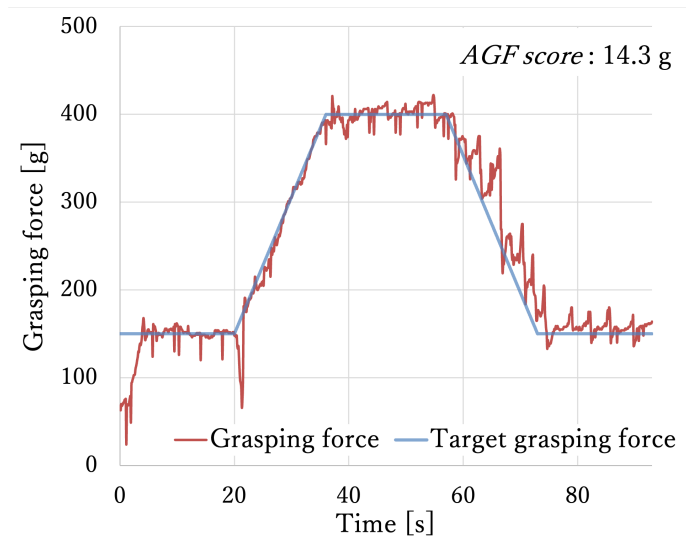
$$y_{AGF}(n) = a * e^{-\frac{1}{b}(n-1)} + c \quad (4.1)$$

ただし, a は $AGFscore$ の改善量, $b (> 0)$ は運動学習の速さであり, $n = b + 1$ の時, 改善量の約 63.2 % に達する. c は運動学習の最終値, すなわち学習後の $AGFscore$ を示す.

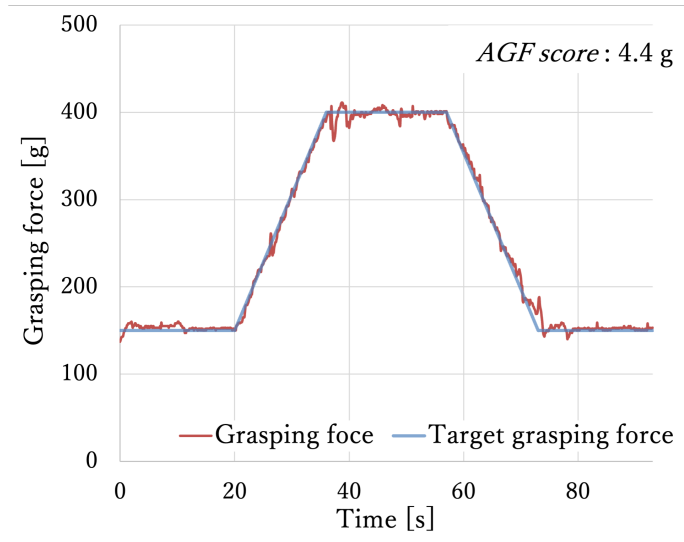
4.4 実験結果

4.4.1 把握力調整能力の変化

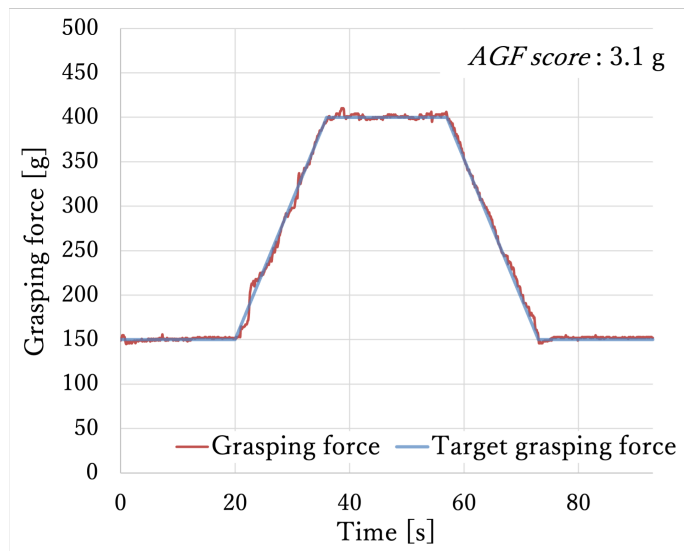
把握力調整能力は 30 日間の線課題の $AGFscore$ により確認する. Fig. 4.3 に Subject 12 の 1 日目, 15 日目, および 30 日目の線課題の把握力の時間変化の典型例を示す. トレーニングの繰り返しにより, 把握力を目標線に追従できるようになっている. Fig. 4.4 に全被験者の日々の $AGFscore$ の平均値と標準偏差を示す. 日数の経過に伴い, $AGFscore$ が減少するとともに, 標準偏差も減少している. よって, 30 日経過後には, 把握力調整能力が改善され, 被験者間の把握力調整能力の差が小さくなった. 1 セット目と 6 セット目の $AGFscore$ の平均値と標準偏差は, それぞれ 9.0 ± 4.8 g と 3.8 ± 1.0 g であった. 対応ありの Wilcoxon の符号付順位検定を行った結果, 有意差 ($p < 0.01$) が認められた. また, 6 セット目と 1 セット目の $AGFscore$ の変化と介入前後の QOL-AD の変化の相関係数は, -0.57 ($p < 0.05$) であり, 相関があった. 星課題について, Fig. 4.5 に全被験者の日々の星の獲得数の平均値と標準偏差を示す. 予備実験と同じように星の獲得数の平均獲得率は, 難易度によらず 90 % 以上となった. 1 日目から 15 日目にかけて星の獲得数は徐々に増加した. 16 日目から 30 日目は標準偏差が減少したことから, 被験者間の星の獲得数の差が小さくなった.



(a) 1st day



(b) 15th day



(c) 30th day

Fig. 4.3: Typical example of changes in grasping force of Subject 12

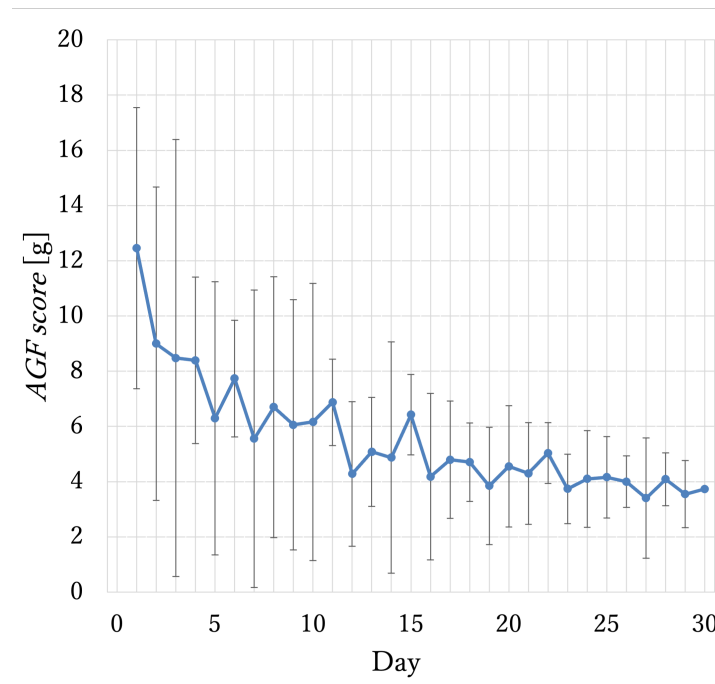
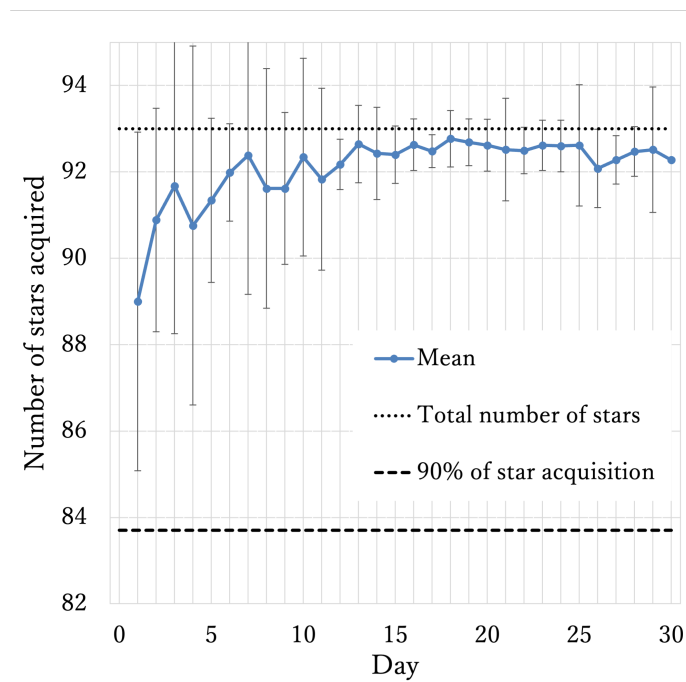
Fig. 4.4: Mean and standard deviation of daily *AGF* scores

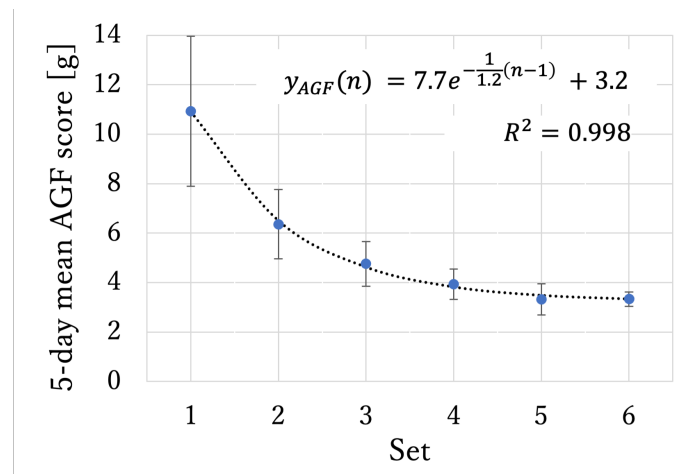
Fig. 4.5: Mean and standard deviation of daily numbers of stars acquired

4.4.2 把握力調整能力の運動学習

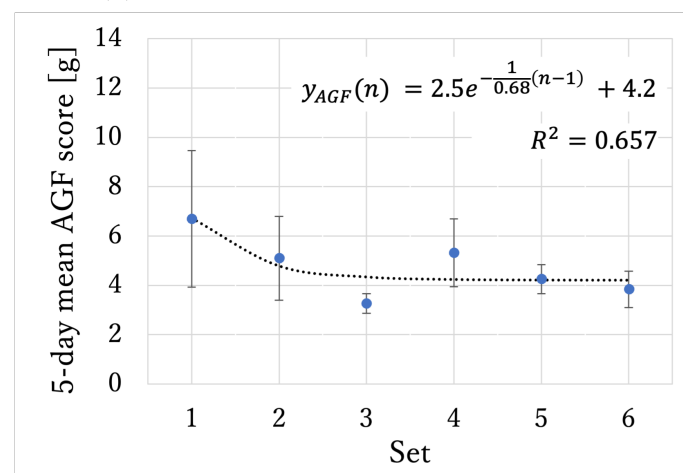
Eq. (4.1) により運動学習を定量化したところ、14 名中 11 名の決定係数が 0.6 以上となり、指数関数的減衰を表す近似曲線で運動学習を定量化できた。決定係数が最も大きい結

果と小さい結果を Fig. 4.6 に示す. パラメータ a , b , c の平均値と標準偏差は, それぞれ 6.8 ± 5.6 g, 1.6 ± 2.1 セット, 3.0 ± 2.5 g であった. 運動学習の初期値 $a + c$ と, 改善量 a の相関係数は 0.89 ($p < 0.01$) であり, 強い相関があった. つまり 1 日目の把握力調整能力と 30 日間の改善量には関係があることが分かった. また, 介入前のレイ図形の 3 分遅延とパラメータ a , b , c の相関係数は, それぞれ 0.65 , 0.66 , -0.62 ($p < 0.05$) であり, 相関があった.

次に, 指数関数的減衰ではなかった 3 名についての時間変化を調査した. その結果を Fig. 4.7 に示す. Fig. 4.7a の 1 名は線形近似にて決定係数が 0.6 以上となり, 単調減少だった. 残り 2 名は 1 セット目から 6 セット目にかけて AGF score が増加と減少を繰り返しながら, 徐々に減少した. 3 名の 1 セット目と 6 セット目の AGF score の差分は 2.9 g, 2.5 g, 2.9 g であった. 3 名とも指数関数的減衰を表す場合の運動学習のパラメータである改善量 a の



(a) Highest coefficient of determination



(b) Lowest coefficient of determination

Fig. 4.6: Two examples of motor learning (representing exponential decay)

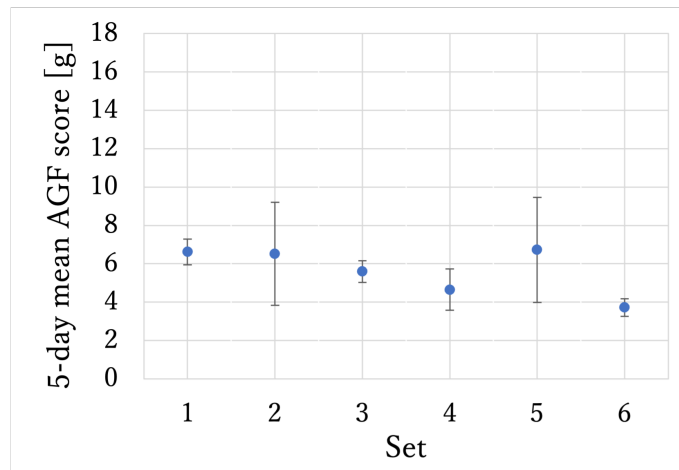
平均値±標準偏差以内であった。6 セット目の *AGFscore* は 3.6 g, 3.5 g, 3.7 g であった。3 名とも最終値 *c* の平均値±標準偏差以内であった。つまり運動学習の過程に個人差はあるものの、全被験者において運動学習が進み、把握力調整能力が改善した。

4.4.3 認知機能評価と QOL 評価

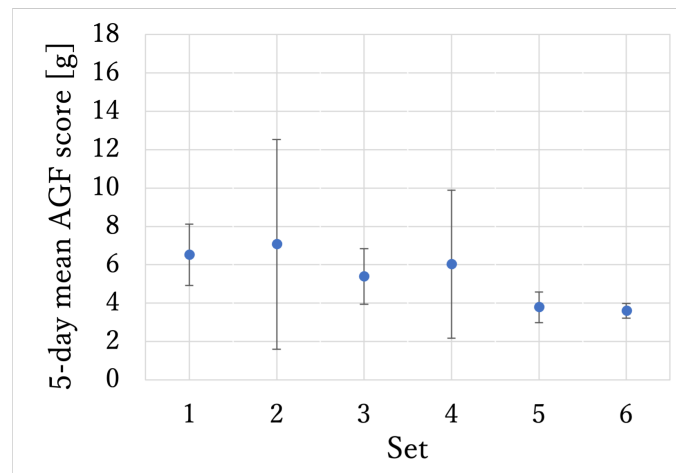
Table 4.9 と Fig. 4.8 から Fig. 4.12 に被験者の介入前後の認知機能評価と QOL 評価の結果を示す。全被験者において、介入前後の HDS-R, MMSE は満点であった。被験者と若年健常者の認知機能評価の比較を行うために、TMT-A, TMT-B, レイ図形の 3 分遅延は、勝浦らの研究 [88] から若年健常者（年齢 25.0 ± 3.0 歳，男性 41 名，女性 39 名）の結果を記載した。満点の場合に認知機能に問題がないと判断する評価、もしくは被験者がすでに満点の評価である HDS-R, MMSE, FAB, レイ図形の模写は若年健常者との比較の対象外とした。被験者の介入前後の各評価結果について、対応ありの Wilcoxon 符号付順位検定を行った結果、FAB, TMT-B, レイ図形の 3 分遅延と QOL-AD において有意差が認められた。一方、TMT-A とレイ図形の模写においては、有意差が認められなかったが、TMT-A は有意な傾向 ($p = 0.065$) があった。

Table 4.9: Cognitive function and QOL assessment before and after intervention

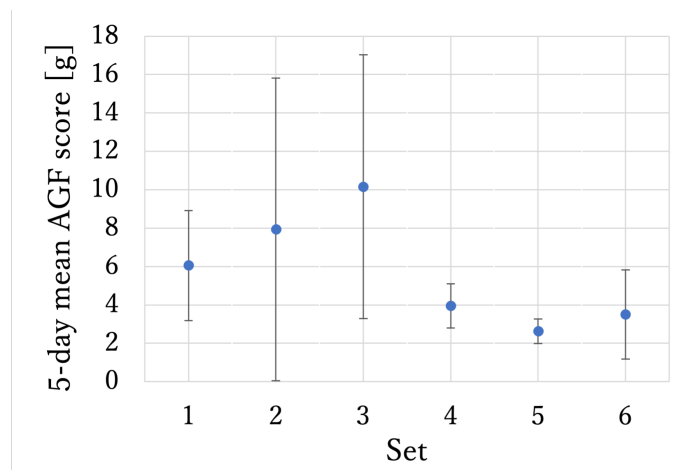
Measure	Before (Mean ± SD)	After (Mean ± SD)	p value	Healthy Young[88] (Mean ± SD)
HDS-R	30.0 ± 0.0	30.0 ± 0.0	-	-
MMSE	30.0 ± 0.0	30.0 ± 0.0	-	-
FAB	16.9 ± 0.83	17.9 ± 0.36	0.0035	-
TMT-A	30.9 ± 9.2	27.5 ± 4.9	0.065	22.7 ± 6.1
TMT-B	125 ± 51	69.6 ± 14	0.0015	45.5 ± 12.9
Rey complex figure test (copy)	35.7 ± 0.73	36.0 ± 0.0	0.16	-
Rey complex figure test (3-minute)	16.6 ± 3.5	23.6 ± 3.5	0.00012	26.2 ± 4.8
QOL-AD	41.1 ± 4.4	42.6 ± 5.2	0.035	-



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 4.7: Three examples of motor learning (not representing exponential decay)

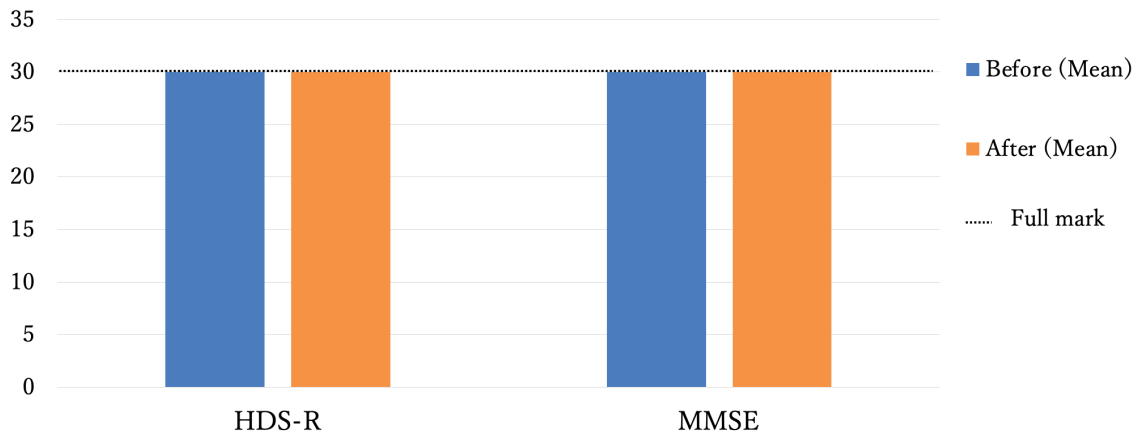


Fig. 4.8: HDS-R and MMSE before and after intervention

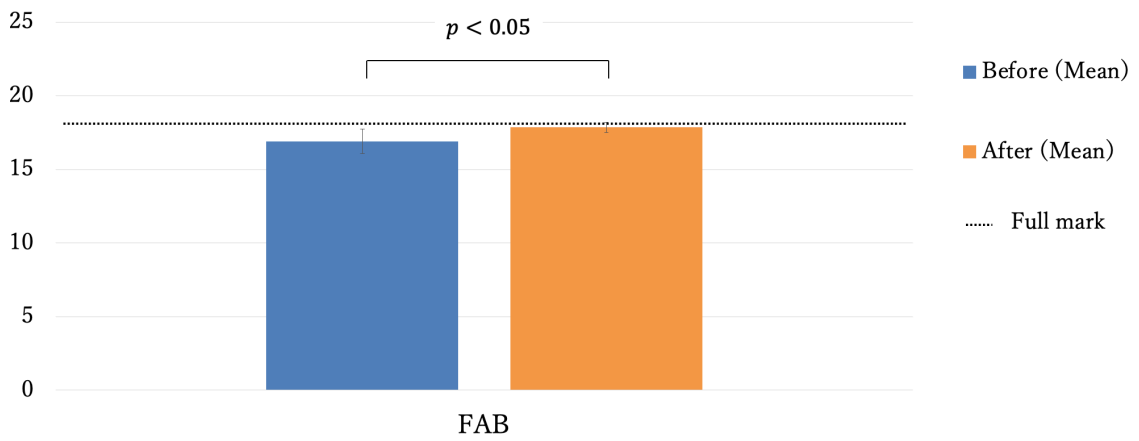


Fig. 4.9: FAB before and after intervention

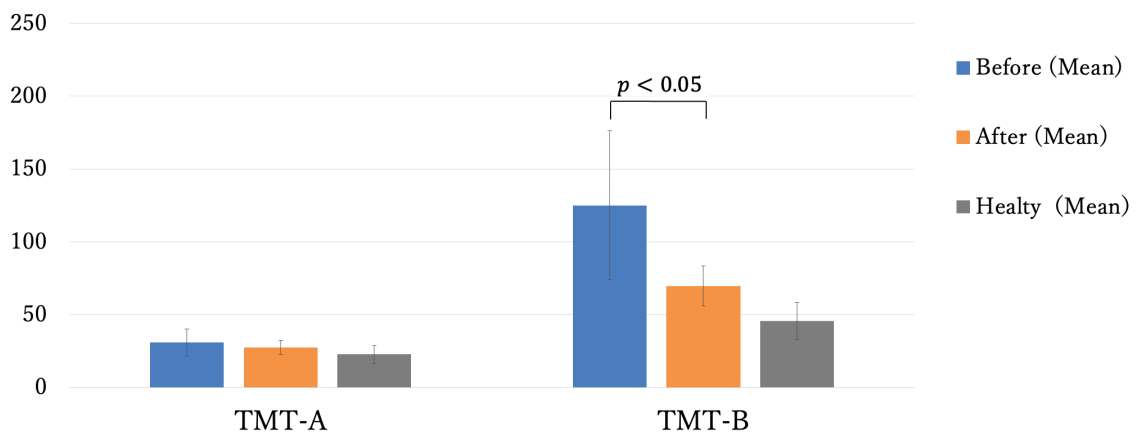


Fig. 4.10: TMT-A and TMT-A before and after intervention

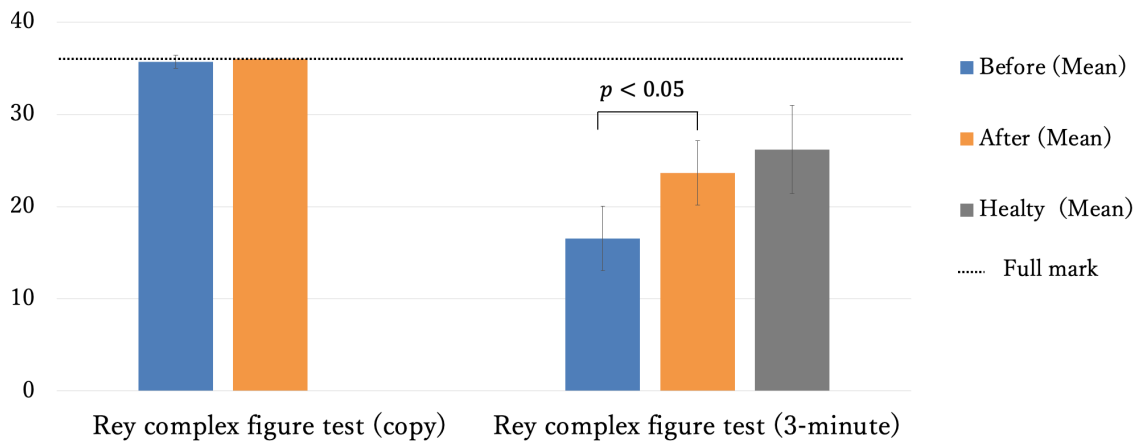


Fig. 4.11: Rey complex figure test (copy and 3-minute) before and after intervention

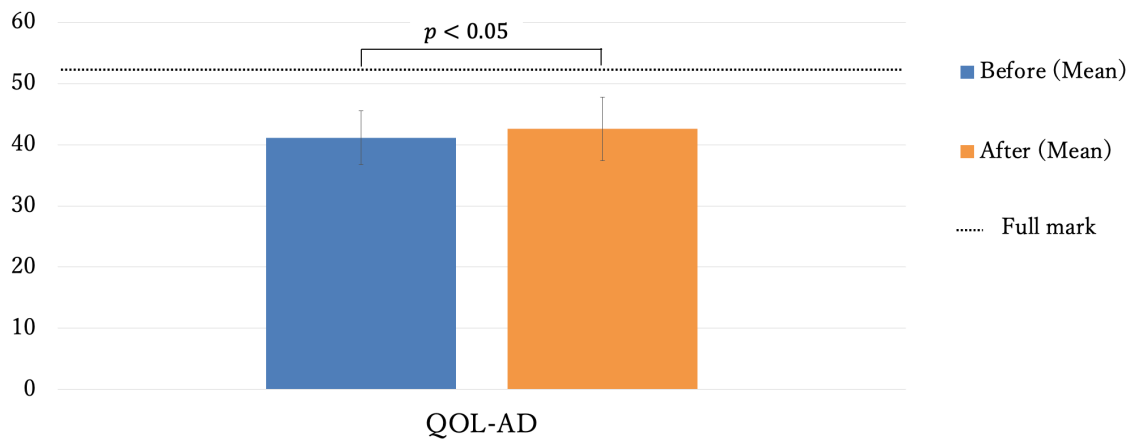


Fig. 4.12: QOL-AD before and after intervention

4.5 考察

把握力調整能力の変化、運動学習、認知機能評価、およびQOL評価について考察を順番に行う。最初に把握力調整能力の変化について考察する。iWakkaヘルスケアシステムによる30日間の介入により、 $AGFscore$ が有意に減少したことから、把握力調整能力が改善したといえる。金野らの研究によると、65歳以上の健常高齢者において利き手の $AGFscore$ は 8.9 ± 4.2 gであった[89]ことから、1セット目の $AGFscore$ は同程度であったが、6セット目の $AGFscore$ は被験者の方が小さい。これは30日間の介入により健常高齢者の平均よりも能力が向上したと考えることができる。6セット目と1セット目の $AGFscore$ の変化と介入前後のQOL-ADの変化に相関があった。物を把握したり箸を使ったりするなどのADLにおいて手指巧緻性は欠かせない。ADLとQOLには関連性があることから[90]、把握力調整能力の改善が、結果としてQOLの改善へつながったと推察する。

次に運動学習について考察する。指数関数的減衰を表した11名については、介入前のレイ図形の3分遅延と運動学習の3つのそれぞれのパラメータに相関があり、介入前の記憶機能が良い方が、 $AGFscore$ の改善量大きいこと、運動学習が緩やかであること、介入後の $AGFscore$ が小さいことを示す。つまり介入前の記憶機能は、30日間の運動学習の過程に影響を与えていた。これは学習の基礎には記憶がある[86]との報告と一致している。一方で3名については、指数関数的減衰はみられなかった。3名ともにセットによっては5日間平均 $AGFscore$ の標準偏差が大きくなる場合があり、把握力をうまく調整できない日があったことがわかる。ただし介入前後の認知機能に改善がみられたことから、日々の把握力調整能力のトレーニングが、認知機能に良い影響を与えたと考えられる。

最後に認知機能評価とQOL評価について考察する。遂行機能において、介入前後でFABは有意に改善した。Seolら[91]の研究によると、在宅での手指巧緻性のトレーニングは、高齢者において、前頭前野の活性化に有意差あり、遂行機能を改善する可能性が示された。FABは前頭葉機能の評価であり、本研究と結果と一致している。注意機能は、介入前後でTMT-Aは有意な傾向があり、TMT-Bは有意に改善した。介入後、TMT-Aは被験者の平均値が若年健常者の平均値±標準偏差以内になり、TMT-Bは平均値±標準偏差の2倍以内になった。注意機能の向上は転倒の発生率を減少させ、敷居やカーペットでの躓きによる転倒の予防につながる[92]ことが期待される。しかし、本研究では生活動作、および歩行の評価はしていないため、今後さらなる検証が必要である。記憶機能は、被験者の介入前後のレイ図形の3分遅延での有意差が認められていることに加えて、介入後に被験者の平

均値が若年健常者の平均値±標準偏差以内になった。iWakka の視覚追従運動に着目し認知機能判別に活用できた研究 [35] とあわせると、iWakka は認知機能を刺激する可能性が示唆された。

村田らの地域在住の高齢者の運動習慣の研究 [93] によると、運動習慣有り群は無し群に比べて、身体機能、認知機能、主体的健康感や生活満足度などの心理機能が有意に良好な値を示した。これらの知見は、運動を定期的に行うことは高齢者の健康増進に結びついていることが示されている。坂本らのアルツハイマー患者の手指機能に関する研究 [94] では、粗大動作よりも手指機能による課題遂行機能が低下すると報告している。iWakka ヘルスケアシステムは、散歩やゴルフなどの粗大運動ではカバーしにくい手指の把握力調整能力の定期的な介入により、高齢者の健康増進に寄与できることが示唆された。ただし、本研究の限界として、介入後の把握力調整能力と認知機能の改善の持続効果は確認できていない。今後の研究で介入後のフォローアップを行うことで、持続効果を確認する必要がある。そして、認知機能評価における慣れへの影響を完全に除外できていないことも挙げられる。本研究では評価の間隔は 30 日以上であるため、影響は少ないと考えられるが、脳内の変化を確認することで、より正確な評価ができると考えられる。

本実験に支障をきたすようなトラブルはなかったが、ケーブルの接続不良、コントロールボックスの不良、誤ってログアウトしてしまい再度ログインできなかったケースがあった。そのため Wakka とコントロールボックスの一体化によりケーブルやコントロールボックスの不良を減らしたり、ログインの顔認証化によりパスワードの入力をなくしたりすることによるユーザビリティの向上が求められている。そして軽度認知障害のある高齢者に対して iWakka ヘルスケアシステムによるトレーニングを実施することで、把握力調整能力と認知機能の改善につながるかどうかを調査する必要がある。戸嶋らの研究では軽度認知障害のある高齢者の判別をするための iWakka の課題を考案し、判別アルゴリズムを構築した [35]。iWakka の課題を目的にあわせて考案し把握力調整能力による認知機能の判別、および改善に繋げることで、誰もがより長く元気に活躍できる社会の実現に貢献できると考えている。

4.6 おわりに

本章では、iWakka ヘルスケアシステムを開発し地域在住高齢者を対象とした在宅での有用性を検証した。介入前後において把握力調整能力、認知機能、および QOL が向上する可

能性が示された。本章の成果を以下にまとめる。

1. iWakka を用いて在宅での把握力調整能力と認知機能を改善させる目的で地域在住高齢者にトレーニングを提供し、さらに医療従事者が日々の実施状況を確認できる iWakka ヘルスケアシステムを開発した。
2. 地域在住高齢者 14 名を対象に在宅で 30 日間の介入研究を行い、把握力調整能力と認知機能の変化を調査し、有用性を検証した。
3. 把握力調整能力と認知機能と QOL に有意な改善があった。また 30 日間の運動学習の変化は、11 名において指数関数的減衰を表す近似曲線にて定量化できた。そして介入前の記憶機能は運動学習の過程に影響を与えることを明らかにした。

これらの結果から、iWakka は高齢者を対象とした認知症の早期発見のための認知機能判別への活用 [35] だけではなく、認知機能の改善への活用が期待される。今後は、軽度認知障害のある高齢者を対象とした介入研究を行うことで、早期介入による認知機能の改善効果について検証する必要がある。また、iWakka ヘルスケアシステムの対象者を拡大し、高齢者のみならず、障害者やリハビリを必要とする人々に対しても活用できるようにすることが今後の課題である。脳卒中後の上肢片麻痺者を対象とした関連研究において、療法士が毎朝ウェブ上にて日常生活での麻痺手の使用、および自主トレーニングについて数種類提案し、対象者が、就寝までの時間を利用して実施し、実施状況（感想と自己評価）を選択式で報告する Tele Rehabilitation System を開発した。18 日間連続で実施したところ、対象者からの聞き取りより「物事へ挑戦をする意識ができた。」と麻痺手の使用に対する意識に貢献できた感想が聴取された [95]。麻痺手の使用を増やすことにより、機能回復を促進することができると考えられる。そこで iWakka ヘルスケアシステムにおいて、iWakka によるトレーニングに加えて麻痺手の使用頻度を高めるための自主トレーニングの提案を行うことで、機能回復につながるかどうかを検証する必要がある。

第 5 章

FIM スコアの予後予測モデルの開発と有用性検証

5.1 はじめに

運動機能のリハビリのためには、適切な目標設定とそこから逆算した計画が重要である。著者らが注目している把握力調整能力も同様であり、現時点での把握力調整能力の評価とトレーニングだけではなく、目標設定とそこから逆算した iWakka の課題の実施がリハビリの効果向上につながると考えている。脳卒中患者を対象とした退院時の FIM スコアを予測する多くの研究が行われている。徳永ら [96] は、重回帰分析において年齢で 2 群、入院時 FIM スコアで 3 群、計 6 群に層別化して予測することにより、層別化しない場合に比べて退院時の FIM スコアの実測値と予測値の相関が大きいことを示している。相関係数は前者が 0.893、後者が 0.863 であった。また日本リハビリ・データベースに登録されている患者データ 2542 症例を用いて、対象患者の疾患を脳梗塞・脳出血・くも膜下出血に絞り込んだ後に、FIM スコアの運動項目の利得を目的変数とした重回帰分析において、年齢、性別、発症から入院までの日数などの 8 つの要因を層別化することで、予測精度を高められることも明らかになっている [97]。小山ら [98] は、入院時と 2 から 6 週間後の 2 回の FIM スコアを対数曲線にあてはめ係数を計算し、その後退院までの FIM スコアの経過を予測した。対象 111 症例の FIM 運動項目の合計について検証されたところ相関係数は 0.89 であった。

また機械学習を活用した予後予測や治療提案に関する研究も行われている。磯部らはリハビリを支援する医療 AI システムを開発した [99]。提案したシステムは、実際の時系列医療記録をマトリックスまたは画像に積み上げ、機械学習により患者のアウトカムのパターンを認識し、類似する患者の統計情報を出力し、推定された FIM スコアの利得と確率を組み合わせて最適な治療方法を提案するソフトウェアである。このように機械学習を活用したりハビリの支援は増えてはきたが、事例は少ない。また著者が調査したところ、脳血管疾患に関わる様々な疾患の入院時の情報から退院時の FIM スコアを機械学習により予測し、評価を行った研究は少ない。

iWakka を活用している偕行会リハビリ病院では退院時の FIM スコアの予測値を用いて患者へ退院時に獲得する ADL の目標を提示し、リハビリの方針の説明を行いたいというニーズがある。それを実現するためには偕行会リハビリ病院の状況を鑑み、実測値と予測値の平均絶対誤差（以下、平均誤差）は 5 点以下が許容範囲だと考えた。

筆者らの研究グループでは、CI 療法と iWakka による治療を組み合わせた CI+i 療法を開発し、脳卒中片麻痺患者 10 名に CI+i 療法を適用した [38]。CI+i 療法のトレーニング効果を検証することで iWakka によるトレーニングの有用性と、CI+i 療法における経過観察に iWakka を導入することで iWakka による評価の有用性を明らかにした。18 日間の CI+i 療法を通して、 AGF_{score} 、簡易上肢機能検査である STEF (Simple Test for Evaluating Hand Function)、および上肢機能についての FMA (Fugl-Meyer Assessment) において有意な改善が認められたことから、トレーニングデバイスとしての有用性を確認した。また経過観察において被験者の求心性筋活動と遠心性筋活動の比較から脳卒中患者が苦手とする筋活動を明らかにしたことから、評価デバイスとしての有用性を確認した。そして CI 療法のさらなる効果向上のためには予後予測が必要である。

そこで本章では、要求予測精度を平均誤差が 5 点以下とし、脳血管疾患に関わる様々な疾患の入院時の情報から退院時の FIM スコアを予測するための手法と有用性検証について述べる。

5.2 提案手法

脳卒中を発症した場合の回復段階は急性期、回復期、維持期に分かれる。急性期は、発症から約 2 週間までの期間であり、身体機能の低下防止のためのリハビリが行われる。回復期は、急性期の後から約 3 ヶ月から 6 ヶ月までの期間であり、最も回復が見込まれるため身体機能の回復や日常生活に必要な動作の改善のためのリハビリが行われる。維持期は、回復期の後の期間であり、患者の自宅や施設で自立した生活をできるようにするものである。予測対象とするリハビリ病院は回復期のリハビリを行う偕行会リハビリ病院である。本研究では、回復期リハビリ病院に入院中の脳卒中患者を対象として、入院時あるいは入院中のデータから、退院時の FIM スコアを予測する。回復期リハビリ病院の入院対象者は脳血管疾患や整形外科疾患、および廃用症候群である。病院の役割として ADL の向上により安全に在宅で生活できるように支援することが求められている。入院期間の制限が設けられており、最大入院可能日数は 180 日である。しかし、すべての対象者で一律 180 日に

定められているわけではなく、疾患、および必要条件の有無により上限日数は異なる。一般的に機能回復においては、脳卒中発症直後から一定期間は顕著に回復が認められる。Lee らの研究 [100] によると発症から 3 ヶ月で 48 %から 91 %の神経学的障害と機能的障害の改善がみられ、下肢を除くと 6 ヶ月後まで継続的な回復が見られると報告している。また Langhorne ら [101] も同様に、6 ヶ月間はリハビリにより可塑的な変化、および機能改善を認め、日常生活の変化があることを示している。しかし機能回復は個人差などにより異なり、6 ヶ月未満で回復が停滞状態（以下、プラトー）に達する場合がある。回復期リハビリ病院では入院期間中に ADL がプラトーになった時点で退院となる。そのため本論文では、退院時とは回復がプラトーに達した時と同義であるとする。

5.2.1 予測対象のリハビリ病院と患者データ

予測対象とするリハビリ病院は回復期のリハビリを行う偕行会リハビリ病院である。患者の電子カルテ情報として、1) 入院時に計測する基礎データ、2) 入院期間中に複数回計測する検査データ、3) 日々の様子を記述した文章を管理している。基礎データと検査データの項目数を合わせると、おおよそ 90 項目となる。そのうち臨床現場の経験に基づき予測において重要であると考えられた 66 項目を用いて、退院時の FIM スコアを予測する。66 項目の内容として Table 5.1 から Table 5.3 に基礎データ、Table 5.4 から Table 5.7 に検査データからなる。Table 5.6 の項目にある SIAS は、脳卒中機能障害評価セットであり機能項目別に 0 点から 3 点、あるいは 5 点満点で評価する [102]。今後データを解析するために、それぞれのデータに対して 55 項目の量的変数と 11 項目のカテゴリ変数に分けて示している。Table 5.2, Table 5.3, Table 5.7 のカテゴリ変数については分類基準も記載している。ただし疾患名は Table 5.8, Table 5.9 に示す。以降の予測精度の検証実験では、偕行会リハビリ病院の 2016 年から収集された約 3 年分の電子カルテから得られたデータ 1100 件により行う。それぞれの患者において入院時に計測され、その後約 1 ヶ月おきに検査データは更新されている。患者数は 314 名であり、検査データの項目について入院中に 1 人あたり平均 3.5 回計測し、標準偏差は 1.5 回である。また入院中の様々な時点から退院時の FIM スコアの予測において精度を向上させるために、発症から計測までの経過日数を FIM スコアの予測のためのデータとして用いる。なお、本研究は偕行会リハビリ病院の倫理審査会の承認を得て実施されたものである（承認番号：2021-1）。

Table 5.1: Basic data 1 of the subjects

項目	内容	平均値 ± 標準偏差
入院時年齢	入院時における年齢	69.8 ± 14.6
ADL(mRS)[103]	発症前の生活状態の程度 (7段階評価であり, 0は症状なし, 5は重度障害を意味する.)	0.68 ± 1.0
同居人数	同居している人数 (0は独居)	1.79 ± 1.4

Table 5.2: Basic data 2 of the subjects

項目	内容
疾患名	主な疾患名 (114 種類)
性別	性別 0：女性 (481 件) 1：男性 (619 件)
トースト分類	脳神経疾患の原因病態の分類 1：アテローム血栓性脳梗塞 (338 件) 2：心原性脳塞栓 (153 件) 3：ラクナ梗塞 (100 件) 4：その他の原因による脳梗塞 (18 件) 5：脳出血 (375 件) 6：くも膜下出血 (39 件) 7：脳静脈塞栓 (0 件) 8：非脳卒中疾患 (77 件)
病巣の部位	病巣の部位 1：右大脳 (330 件) 2：左大脳 (431 件) 3：小脳 (45 件) 4：脳幹 (118 件) 5：脊髄 (4 件) 6：大脳びまん性 (39 件) 7：多発性 (106 件) 8：その他 (27 件)
病巣の大きさ	病巣の大きさ 1：5cm 以下 (170 件) 2：5cm 以下と動脈分岐領域レベルの間 (640 件) 3：動脈分岐領域レベル (105 件) 4：その他 (多発など) (177 件)

Table 5.3: Basic data 3 of the subjects

項目	内容
手術	急性期治療として手術の有無 0：無（919 件） 1：有（181 件）
HD 有無	慢性腎不全合併による透析治療の有無 0：無（1042 件） 1：有（58 件）
気切/O2	転院時に気管切開状態，酸素療法状態の有無 0：無（1046 件） 1：有（48 件）
利き手	利き手 1：右利き（1047 件） 2：左利き（53 件）

Table 5.4: Inspection data 1-1 of the subjects

項目	内容	平均値 ± 標準偏差
経過日数	発症日から計測までの経過日数	78.5 ± 46.5
FIM 運動項目 1	セルフケア (食事)	5.4 ± 1.7
FIM 運動項目 2	セルフケア (整容)	5.4 ± 1.7
FIM 運動項目 3	セルフケア (清拭)	4.2 ± 1.8
FIM 運動項目 4	セルフケア (更衣上半身)	5.1 ± 2.1
FIM 運動項目 5	セルフケア (更衣下半身)	4.7 ± 2.3
FIM 運動項目 6	セルフケア (トイレ動作)	4.9 ± 2.1
FIM 運動項目 7	排泄 (排尿コントロール)	5.2 ± 2.4
FIM 運動項目 8	排泄 (排便コントロール)	5.4 ± 2.1
FIM 運動項目 9	移乗 (ベッド・椅子・車椅子)	5.3 ± 1.7
FIM 運動項目 10	移乗 (トイレ)	5.2 ± 1.7
FIM 運動項目 11	移乗 (浴槽・シャワー)	4.1 ± 1.7
FIM 運動項目 12	移動 (歩行・車椅子)	3.9 ± 2.5
FIM 運動項目 13	移動 (階段)	3.2 ± 2.3
FIM 認知項目 1	コミュニケーション (理解 (聴覚・視覚))	5.3 ± 1.6
FIM 認知項目 2	コミュニケーション (表出 (音声・非音声))	5.2 ± 1.7
FIM 認知項目 3	社会認識 (社会的交流)	5.9 ± 1.6
FIM 認知項目 4	社会認識 (問題解決)	4.3 ± 2.0
FIM 認知項目 5	社会認識 (記憶)	4.6 ± 2.0
FIM 運動項目合計	FIM スコア (運動項目) の合計	61.6 ± 22.5
FIM 認知項目合計	FIM スコア (認知項目) の合計	25.2 ± 7.9
FIM 合計	FIM スコアの合計	86.9 ± 28.4

Table 5.5: Inspection data 1-2 of the subjects

項目	内容	平均値 ± 標準偏差
嚥下能力グレード	藤島のグレード による嚥下の 能力 [104] (10 種類)	8.8 ± 2.1
非麻痺側握力	非麻痺側の握力 [kg]	21.2 ± 11.8
麻痺側握力	麻痺側の握力 [kg]	13.4 ± 20.2
MMSE	ミニメンタルテスト (Mini Mental State Examination Test) [80]	21.5 ± 7.9
MNA (栄養)	簡易栄養状態評価 スクリーニング の点数 [105]	7.6 ± 2.4
看護必要度 A 項目	看護師による処置等の 必要性を評価する尺度 (モニタリング および処置等) [106]	0.1 ± 0.3
看護必要度 B 項目	看護師による処置等の 必要性を評価する尺度 (患者の状況等)	4.3 ± 4.2

Table 5.6: Inspection data 1-3 of the subjects

項目	内容	平均値 ± 標準偏差
SIAS1	運動機能（上肢近位）	3.6 ± 1.6
SIAS2	運動機能（上肢遠位）	3.5 ± 1.7
SIAS3	運動機能（下肢近位（股））	3.9 ± 1.3
SIAS4	運動機能（下肢近位（膝））	4.0 ± 1.2
SIAS5	運動機能（下肢遠位）	3.6 ± 1.5
SIAS6	筋緊張（上肢筋緊張）	2.4 ± 0.8
SIAS7	筋緊張（下肢筋緊張）	2.5 ± 0.7
SIAS8	筋緊張（上肢腱反射）	2.3 ± 0.8
SIAS9	筋緊張（下肢反射）	2.2 ± 0.8
SIAS10	感覚（上肢感覚）	2.2 ± 0.8
SIAS11	感覚（下肢感覚）	2.3 ± 0.8
SIAS12	感覚（上肢位置覚）	2.3 ± 0.8
SIAS13	感覚（下肢位置覚）	2.3 ± 0.8
SIAS14	関節可動域, 疼痛 （上肢関節可動域）	2.7 ± 0.6
SIAS15	関節可動域, 疼痛 （下肢関節可動域）	2.3 ± 0.6
SIAS16	関節可動域, 疼痛 （疼痛）	2.8 ± 0.5
SIAS17	体幹機能（垂直性）	2.7 ± 0.6
SIAS18	体幹機能（腹筋）	2.8 ± 0.5
SIAS19	高次脳機能 （視空間認知）	2.7 ± 0.6
SIAS20	高次脳機能（言語）	2.7 ± 0.6
SIAS21	健側機能（握力）	2.2 ± 0.7
SIAS22	健側機能 （健側大腿四頭筋力）	2.2 ± 0.8
SIAS 合計	SIAS の合計	60.4 ± 12.0

Table 5.7: Inspection data 2 of the subjects

項目	内容
失語の有無	失語の状態 0：失語なし（853 件） 1：軽度失語症（123 件） 2：重度感覚性失語症（95 件） 3：重度運動性失語症（29 件） 4：全失語（0 件）
視空間障害	SIAS における視空間評価と同様 0：15cm 以上（46 件） 1：5cm 以上（53 件） 2：3cm 以上（120 件） 3：3cm 未満（878 件）

Table 5.8: Numerated disease name 1-1 of the subjects

疾患名	数値	件数	疾患名	数値	件数	疾患名	数値	件数
脳出血	0	15	脳外傷	1	4	左脳外傷	2	3
左小脳出血	3	3	左放線冠塞栓	4	1	左大脳脳出血	5	2
左後頭葉脳梗塞	6	2	右放線冠脳梗塞	7	2	右被殻出血	8	31
脳幹梗塞	9	11	左被殻出血	10	60	左大脳脳梗塞	11	16
左橋梗塞	12	15	外傷性 SAH	13	24	尾状核出血	14	4
多発塞栓	15	18	脳塞栓	16	2	右大脳脳梗塞	17	23
左放線冠梗塞	18	48	左放線冠ラクナ	19	9	小脳梗塞	20	11
左前頭葉脳出血	21	7	右 MCA 塞栓	22	46	SAH	23	34
左後頭頂出血	24	4	左 MCA 梗塞	25	22	VA 塞栓	26	2
MCA 脳塞栓	27	3	脳腫瘍	28	3	左 ACA 梗塞	29	3
脳梗塞	30	3	左被殻梗塞	31	6	両側脳塞栓	32	6
脳炎	33	4	左大脳ラクナ	34	9	ラクナ梗塞	35	9
視床出血	36	15	右放線冠梗塞	37	38	橋梗塞	38	35
左頭頂葉出血	39	6	左視床梗塞	40	12	右 MCA 梗塞	41	14
左多発塞栓	42	4	髄膜炎	43	3	多発脳梗塞	44	7
左視床出血	45	57	放線冠脳梗塞	46	10	左前頭葉塞栓	47	2
左大脳脳塞栓	48	11	左大脳塞栓	49	2	左側頭葉梗塞	50	4
左側頭葉出血	51	4	右視床出血	52	56	多発脳塞栓	53	15
左内包梗塞	54	16	右被殻梗塞	55	5	被殻出血	56	13
左 MCA 塞栓	57	10	右延髄梗塞	58	3	左皮質下出血	59	4
VA 多発梗塞	60	5	多発出血	61	4	右 MCA 脳塞栓	62	4
右前頭葉梗塞	63	9	くも膜下出血	64	5	急性硬膜下血腫	65	13
小脳出血	66	20	右頭頂葉出血	67	6	右内包梗塞	68	12
左側頭葉塞栓	69	3	右脳幹梗塞	70	3	延髄梗塞	71	6
左大脳梗塞	72	6	左 PCA 梗塞	73	5	左基底核梗塞	74	5
右大脳塞栓	75	5	左 ACA 脳塞栓	76	6	右大脳血栓	77	3
右大脳脳出血	78	6	視床梗塞	79	4	左内包ラクナ	80	6

Fig. 5.1 に 1100 件分の発症から計測までの経過日数のヒストグラムを示す。30 日以下、60 日以下、90 日以下、120 日以下、150 日以下、および 180 日以下はそれぞれ全体の 17 %、43 %、65 %、82 %、92 %、および 97 %である。以上のデータは、匿名化された状態で受け取り、データを保存している計算機はインターネットには接続せずに管理した。

Table 5.9: Numerated disease name 1-2 of the subjects

疾患名	数値	件数	疾患名	数値	件数	疾患名	数値	件数
脳幹出血	81	7	左後頭葉脳出血	82	7	左大脳出血	83	4
左ワレンベルグ	84	5	MCA 梗塞	85	16	皮質下出血	86	5
脳挫傷	87	6	橋出血	88	12	右放線冠ラクナ	89	7
右橋梗塞	90	9	ウエルニッケ	91	5	両小脳梗塞	92	2
ACA 梗塞	93	4	頸髄損傷	94	4	左脳梗塞	95	2
心原性塞栓	96	3	左放線冠脳出血	97	4	右内包血栓症	98	3
硬膜下出血	99	3	延髄出血	100	4	右小脳出血	101	2
右 ACA 梗塞	102	3	多発梗塞	103	3	多発小脳梗塞	104	3
左前頭葉出血	105	2	右側頭葉出血	106	3	右橋出血	107	5
右前脳出血	108	3	右大脳ラクナ	109	2	左多発脳梗塞	110	4
硬膜下血腫	111	5	右大脳出血	112	3	左脳挫傷	113	3

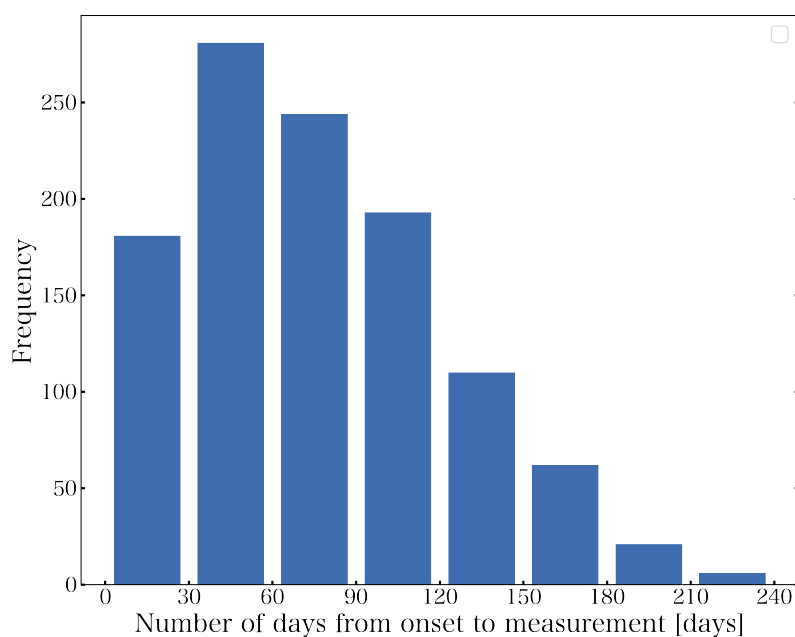


Fig. 5.1: Histogram of days since onset

5.2.2 退院時の FIM スコアの予測手法

Fig. 5.2 に、機械学習を導入することによって退院時の FIM スコアの予後予測をするモデル（以下、提案予測モデル）を示す。このモデルは、オートエンコーダのエンコード部（以下、次元圧縮部）と 4 層人工ニューラルネットワーク（以下、予測部）からなる。66 項目の入院時あるいは入院中に得られたデータを入力とし、退院時の FIM スコアを出力

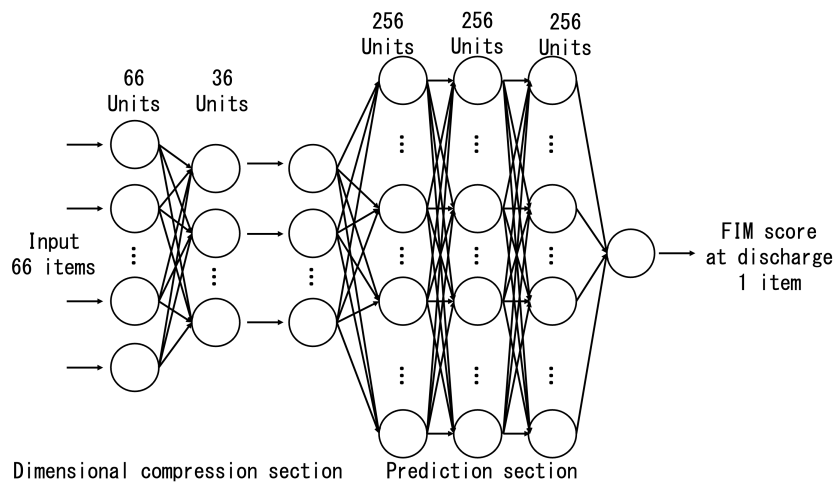


Fig. 5.2: Proposed prediction model

とした。ただし数値化する必要のある 11 項目のカテゴリ変数についてはカテゴリに番号を付与し、その番号をそのままの値として解釈する Ordinal encoding を行った。Min-Max Normalization により正規化をした後に次元圧縮部を導入することで、66 項目のデータの次元を削減、および圧縮し入力データの質を高めた。そしてエンコードされた 36 項目の値を入力として、再度正規化し、予測部により最小値 0、最大値 1 で表現された退院時の FIM スコアを予測した。最後に非正規化を行い、退院時の FIM スコアの予測値を出力した。

5.2.3 次元圧縮部と予測部の構造

オートエンコーダは入力層、中間層、出力層の 3 層からなり、それぞれのユニット数は 66, 36, 66 である。それぞれの層において Batch Normalization[107]、活性化関数による活性化が行われる。中間層の活性化関数は Relu とし、出力層はシグモイド関数とする。オートエンコーダの特性上、入力層と出力層のデータは同じであり、前節で述べた正規化された入力データである。これによって圧縮された特徴量が中間層の出力として得られる。

予測部は、入力層、3 層の中間層、出力層からなり、それぞれのユニット数は、36, 256, 256, 256, 1 である。それぞれの層において正規化、活性化関数による活性化が行われる。中間層、出力層ともに活性化関数は Relu とする。入力は次元圧縮部により得られた値を正規化した値であり、出力層は最小値 0、最大値 1 で表現された退院時の FIM スコアである。なお、正規化の手法である Min-Max Normalization のパラメータは学習データの最小値と最大値から決定している。

5.2.4 次元圧縮部と予測部の学習

次元圧縮部と予測部の学習方法は同様である。学習は確率的勾配降下法により行い、損失関数は回帰モデルで一般的に用いられる平均二乗誤差とした。本研究では、mini-batch のサイズを 128 とし、それぞれの mini-batch において誤差逆伝播法で求められた平均二乗誤差の勾配に基づいて Adam によってパラメータを最適化した。なおパラメータ調整は 20000 回を上限とする。連続で 1000 回にわたり評価データの平均二乗誤差に変化が見られなかった場合、過学習を防ぐために学習を終了した。

5.2.5 次元圧縮部と予測部の評価

学習、および評価のためにデータを分割する。全データである 1100 件を 5 分割し、80 % のデータを学習データ、20 % のデータを評価データとした。そして分割に起因する偏りを防ぐために、評価に用いるデータを入れ替えることで 5 回繰り返し行った。さらにこのプロセスを 10 回行った。これにより 50 個の提案予測モデルが生成される。それぞれの提案予測モデルに対して、評価データの入力データを用いて FIM スコアを予測し、評価データの退院時の FIM スコアの実測値と予測値との平均誤差を求める。平均誤差は、 N を評価データの数、 $C_0(n)$ を退院時の FIM スコアの実測値、 $C_p(n)$ を予測値とすると、Eq. (5.1) で求められる。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |C_0(n) - C_p(n)| \quad (5.1)$$

プログラミング言語として Python、機械学習ライブラリとして Keras [108] を用いた。前者はデータの前処理に用い、後者は提案予測モデルの構築、学習、および評価に用いた。本論文で記述した以外のパラメータはデフォルトとした。

5.3 提案予測モデルの予測精度の検証実験

前章で説明した提案予測モデルの予測精度について検証実験を行った。50 個の提案予測モデルの平均誤差の平均値は 3.63 点であり、平均平方二乗誤差の平均値は 6.60 点であった。誤差が 5 点以下となる累積相対度数は 80.0 % であり、15 点以上は 3.81 % であった。それぞれのモデルに対して評価データは全データの 20 % にあたる 220 件存在し、50 個のモデ

ルに対しては11000件となる。評価データ11000件と誤差が5点以下を正答例とした8949件のデータについて、それぞれの入力項目の平均値の差を前者に対する割合で比較した。大きい順に看護必要度 A 項目が14.5%、看護必要度 B 項目が11.0%であった。差の割合は小さいため、特定の項目が正当例に偏っていないと考えられる。

そして提案予測モデルにおいて欠かすことのできない重要な項目を確認するために、入力項目のうち1項目の値を0として予測した。Table 5.10に、0とした入力項目とその平均誤差の結果を示す。入院時の年齢の値を0として予測した場合の平均誤差の平均値は9.08点となり最も大きくなった。

Tables 5.11, 5.12に、疾患ごとの全件の評価データにおける5点以下になった件数の割

Table 5.10: One input item set to 0 and its mean error

入力項目	平均誤差	入力項目	平均誤差	入力項目	平均誤差
入院時年齢	9.08	FIM 運動項目 8	6.44	FIM 認知項目 3	6.41
SIAS14	6.12	SIAS21	6.02	FIM 認知項目 5	5.74
FIM 認知項目 4	5.73	MMSE	5.66	SIAS15	5.65
FIM 運動項目 7	5.48	嚥下能力グレード	5.47	SIAS17	5.46
FIM 認知項目 1	5.33	FIM 運動項目 3	5.31	SIAS8	5.19
SIAS9	5.05	SIAS10	5.04	FIM 運動項目 1	4.9
SIAS 合計	4.88	SIAS19	4.87	FIM 認知項目 2	4.85
SIAS20	4.84	性別	4.83	SIAS22	4.82
SIAS11	4.76	SIAS18	4.76	利き手	4.74
SIAS5	4.74	経過日数	4.72	FIM 運動項目 11	4.69
SIAS7	4.69	SIAS6	4.66	FIM 合計	4.64
FIM 運動項目 10	4.64	FIM 認知項目合計	4.63	SIAS13	4.58
トースト分類 1	4.58	SIAS16	4.52	SIAS3	4.51
SIAS1	4.41	ADL(mRS)	4.4	FIM 運動項目 2	4.4
SIAS12	4.35	SIAS2	4.34	FIM 運動項目 4	4.3
疾患名	4.3	病巣の大きさ	4.19	FIM 運動項目 12	4.16
病巣の部位	4.16	MNA(栄養)	4.08	FIM 運動項目 9	4.07
FIM 運動項目 13	3.96	FIM 運動項目 6	3.96	FIM 運動項目 5	3.93
手術	3.91	SIAS4	3.9	同居人数	3.88
看護必要度 B 項目	3.85	非麻痺側握力	3.81	FIM 運動項目合計	3.73
失語の有無	3.69	視空間障害	3.65	気切/O2	3.59
HD 有無	3.58	麻痺側握力	3.54	看護必要度 A 項目	3.52

Table 5.11: Prediction accuracy by disease 1

疾患名	割合 [%]	疾患名	割合 [%]	疾患名	割合 [%]
左脳外傷	100	左小脳出血	100	左大脳脳出血	100
左後頭葉脳梗塞	100	右放線冠脳梗塞	100	VA 塞栓	100
MCA 脳塞栓	100	左大脳塞栓	100	右被殻梗塞	100
右延髄梗塞	100	右 MCA 脳塞栓	100	右前頭葉梗塞	100
右脳幹梗塞	100	右大脳血栓	100	視床梗塞	100
左内包ラクナ	100	両小脳梗塞	100	ACA 梗塞	100
左大脳梗塞	98	右大脳塞栓	98	左放線冠脳出血	98
左前頭葉脳出血	97	多発小脳梗塞	97	左基底核梗塞	96
左放線冠ラクナ	96	多発出血	95	左 ACA 脳塞栓	95
左前頭葉出血	95	くも膜下出血	94	皮質下出血	94
脳腫瘍	93	左 ACA 梗塞	93	脳梗塞	93
左頭頂葉出血	93	髄膜炎	93	右 ACA 梗塞	93
多発梗塞	93	右内包梗塞	92	ウエルニッケ	92
右頭頂葉出血	92	右 MCA 梗塞	91	脳幹出血	91
脳出血	90	左側頭葉塞栓	90	左ワレンベルグ	90
右放線冠ラクナ	90	左内包梗塞	89	小脳出血	88
橋出血	88	被殻出血	88	MCA 梗塞	88
右視床出血	87	右内包血栓症	87	右放線冠梗塞	86
左 PCA 梗塞	86	急性硬膜下血腫	85	左後頭頂出血	85
両側脳塞栓	85	左多発塞栓	85	右小脳出血	85
右橋出血	84	左視床梗塞	83	延髄梗塞	83
左橋梗塞	83	VA 多発梗塞	82	右 MCA 塞栓	82
左後頭葉脳出血	81	外傷性 SAH	81	右被殻出血	80
橋梗塞	80	左放線冠梗塞	80	左被殻出血	80
脳外傷	80	多発塞栓	80	左側頭葉出血	80
硬膜下出血	80	延髄出血	80	右大脳ラクナ	80

合を示す。左脳外傷、左小脳出血など 18 疾患にて、すべて 5 点以下となった。1100 件のデータにおいて件数が多い上位 3 疾患は、左被殻出血の 60 件、左視床出血の 57 件、右視床出血の 56 件であった。これらの疾患において、5 点以下の割合はそれぞれ 80 %、76 %、87 %であった。

実験にあたり手法の違いによる影響も確認した。次元圧縮部としてオートエンコーダの代わりに主成分分析を用いた場合と次元圧縮部の中間層を 2 層とした場合の平均誤差の平

Table 5.12: Prediction accuracy by disease 2

疾患名	割合 [%]	疾患名	割合 [%]	疾患名	割合 [%]
左被殻梗塞	78	視床出血	78	ラクナ梗塞	78
脳炎	78	左多発脳梗塞	78	左視床出血	76
多発脳塞栓	76	左大脳脳塞栓	75	小脳梗塞	75
右橋梗塞	74	右大脳脳梗塞	74	左 MCA 梗塞	74
右側頭葉出血	73	左大脳出血	72	左大脳脳梗塞	72
多発脳梗塞	70	左前頭葉塞栓	70	放線冠脳梗塞	69
右大脳脳出血	68	硬膜下血腫	68	左皮質下出血	68
頸髄損傷	68	SAH	67	左 MCA 塞栓	67
左大脳ラクナ	63	脳幹梗塞	62	左放線冠塞栓	60
脳挫傷	57	左脳梗塞	55	右大脳出血	47
左側頭葉梗塞	45	左脳挫傷	30	心原性塞栓	27
尾状核出血	25	右前脳出血	13	脳塞栓	10

均値は、それぞれ 3.96 点、3.88 点であった。平均平方二乗誤差の平均値は、それぞれ 7.12 点、6.90 点であり、精度の向上はみられなかった。そして次元圧縮後の次元数が与える影響を確認するために、次元数を 20 から 40 まで 4 刻みで予測を行なったところ、36 が最も平均誤差の平均値が小さかった。

以降では、提案手法と 2 つの他手法との比較を行った。1 つ目は関連研究でもよく行われている重回帰分析によるモデル（以下、重回帰モデル）との予測精度の比較を行った。2 つ目は次元圧縮部を除いた予測部のみ（以下、単独予測部モデル）との予測精度の比較を行った。次元圧縮部が予測前の前処理として精度向上に寄与しているかどうかを検証した。なお単独予測部モデルは提案予測モデルの予測部と構造、学習方法、および評価方法は同様であるが、入力 は 66 項目である。

5.3.1 重回帰モデルとの比較

多重共線性を考慮し分散拡大係数の値が 10 未満となるように入力項目数を調整した後に予測を行なった。重回帰モデルの平均誤差の平均値は 9.62 点であり、平均平方二乗誤差の平均値は 12.9 点であった。以降では 50 個の平均誤差に対して、重回帰モデルと提案予測モデルとの比較を行う。まず、シャピロ・ウィルク検定により両群ともに正規性は認められなかった。そこで、対応ありのノンパラメトリック検定であるウィルコクソン符号付順

位検定を行った。Fig. 5.3 に重回帰モデルと提案予測モデルの平均誤差の比較結果を示す。有意確率が $p = 7.56 \times 10^{-10}$ ($p < 0.01$) であることから、提案予測モデルとの有意差が認められ提案予測モデルによる精度の向上を確認した。

評価データ 11000 件について 1 件ずつ重回帰モデルと提案予測モデルで予測した。Fig. 5.4 に 11000 件分の実測値と予測値の予測誤差の絶対値のヒストグラムを示す。重回帰分析では 15 点以上の誤差となる可能性が 20.0 % と高かった。提案予測モデルでは、誤差が小さくなるにつれて予測度数が増加しており、1 点以下となる場合は重回帰モデルの 3.8 倍であった。

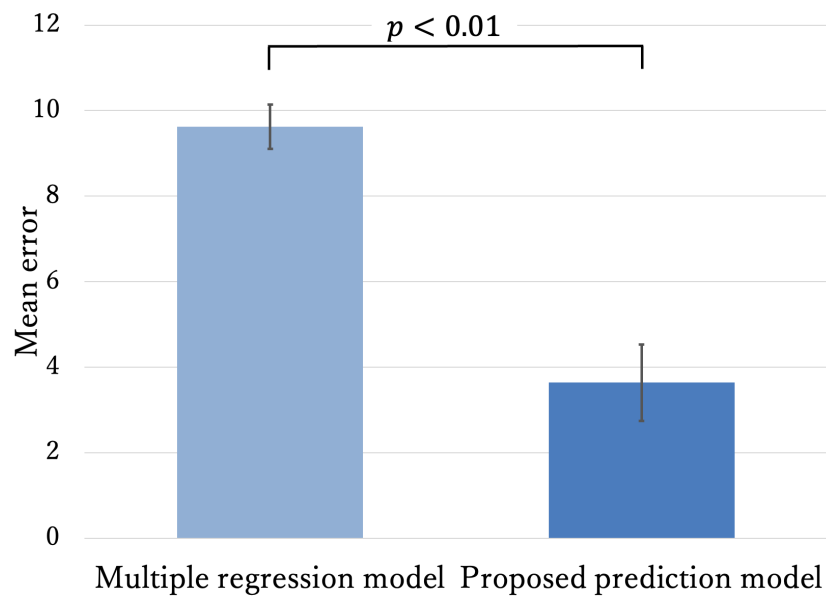


Fig. 5.3: Comparison between multiple regression analysis and proposed prediction model

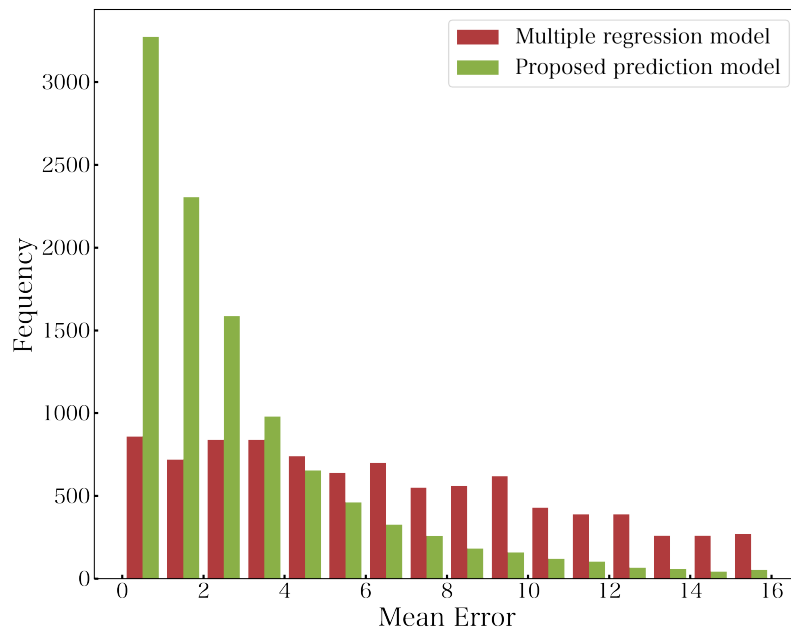


Fig. 5.4: Histogram of errors in multiple regression analysis and proposed prediction model

5.3.2 単独予測部モデルとの比較

単独予測部モデルの平均誤差の平均値は 4.28 点であり、平均平方二乗誤差の平均値は 7.48 点であった。さらに提案予測モデルとのニューラルネットワークの層数による違いを考慮し、単独予測部モデルに中間層を 1 層増やした場合のモデルにて実験を行った。平均誤差の平均値は 5.04 点、平均平方二乗誤差の平均値は 8.30 点であり、層数が性能に与える影響は小さいことを確認した。Fig. 5.5 に単独予測部モデルと提案予測モデルの平均誤差の比較結果を示す。有意確率が $p = 4.18 \times 10^{-4}$ ($p < 0.01$) であることから、提案予測モデルとの有意差が認められ次元圧縮部が予測精度の向上に寄与していることを確認した。

Fig. 5.6 に単独予測部モデルと提案予測モデルの予測誤差の絶対値のヒストグラム、Fig. 5.7 に累積度数を示す。提案予測モデルは単独予測部モデルに比べて誤差が 1 点以下となる累積相対度数が 6.8 % 高く、5 点以下となる度数が 4.8 % 高かった。また 15 点以上となる度数は 0.65 % 低かった。予測前に次元圧縮部により入力データを圧縮された特徴量にエンコードすることは退院時の FIM スコアの予測に対しても有効であることが考えられる。

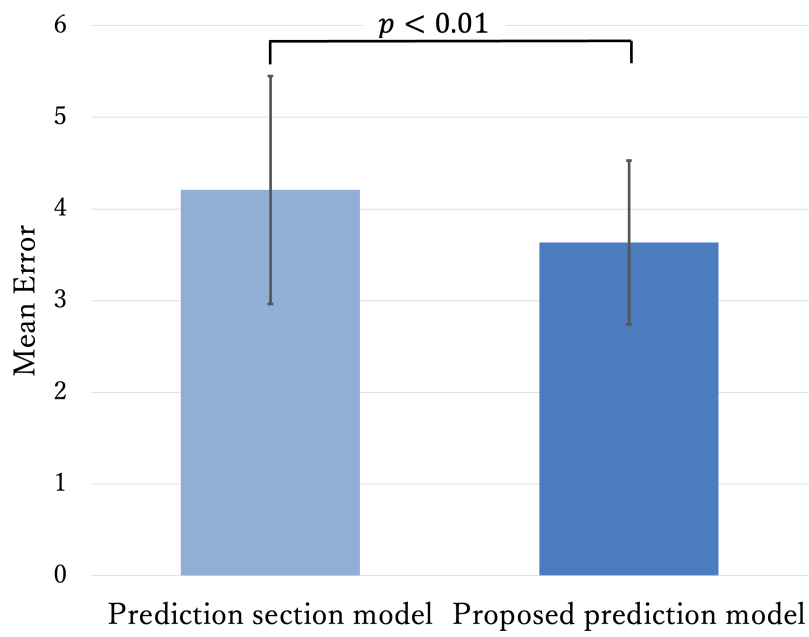


Fig. 5.5: Comparison between single predictor and proposed prediction model

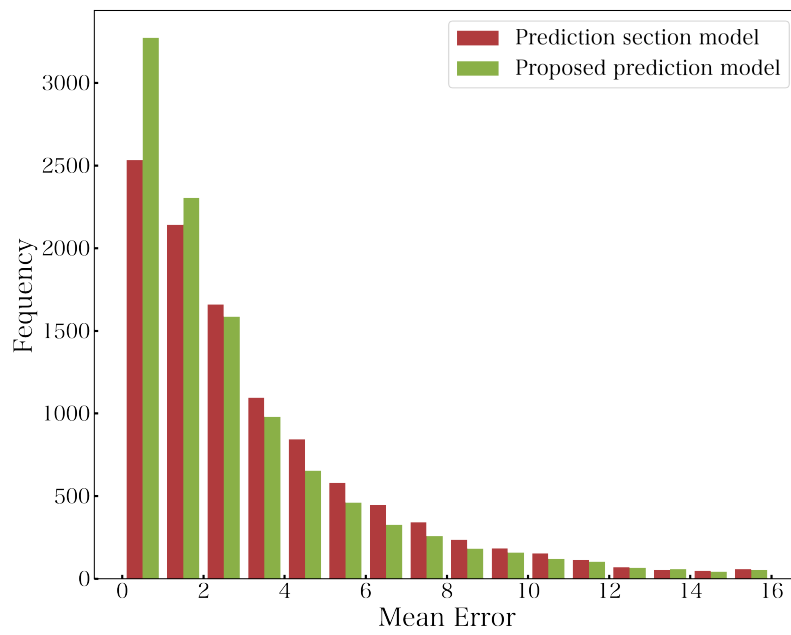


Fig. 5.6: Histogram of errors in single predictor and proposed prediction model

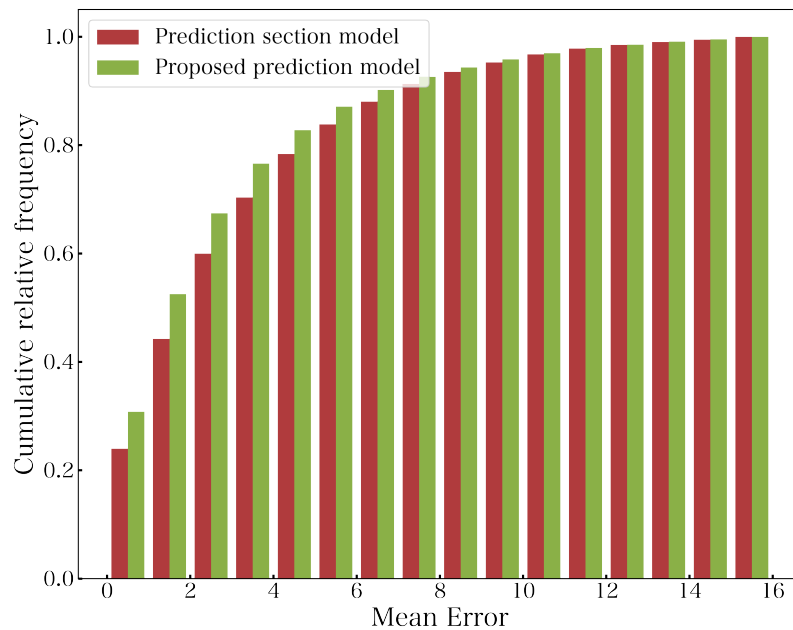


Fig. 5.7: Comparison of cumulative frequency between single predictor and proposed prediction model

5.4 考察

提案予測モデルの平均誤差は3.63点となり要求予測精度の5点以下を満たしたことから、提案予測モデルは、入院時あるいは入院中に患者の退院時のプラトーに達しているFIMスコアを予測することに有用であると考えられる。実験では重回帰モデルと単独予測部モデルを行ったが、提案予測モデルはこれらのモデルに比べて有意に予測精度が向上した。加えて、前述した2つの他手法以外の代表的な回帰手法であるサポートベクトルレグレッション、ランダムフォレストによる予測を行った。平均誤差の平均値は、それぞれ6.98点、5.01点であった。また平均平方二乗誤差の平均値は、それぞれ9.20点、8.28点であった。つまり、提案予測モデルは他の回帰手法に比べても優れた予測精度を持つことが確認された。

提案予測モデルにおいて欠かすことのできない最も重要な項目は、入院時の年齢であった。先行研究でも天井効果がある入院時のFIMスコアが108から126点の患者を除けば、高齢者では若年者より有意にFIMスコアの利得が低いことが明らかになっている[109]。また、疾患ごとの全件の評価データにおける5点以下になった件数の割合を確認したところ、左脳外傷、左小脳出血など18疾患において、5点以下となる件数が100%であった。その疾患は1100件中では件数が少ないものもあるため、学習データ量の偏りではなく特定

の疾患において予後予測しやすい可能性が示唆された。

今後の課題は3つある。1つ目は、本論文のデータで予測が大きく外れる場合を解析することで予測精度を向上させることである。提案予測モデルでは、誤差が15点以上となる場合が3.81%であり、大きく予測を外してしまう可能性がある。その条件を明らかにすることで提案予測モデルによる予測が適用可能かどうかを判定するためのフィルタリング、FIM スコアを項目ごとに予測した後に合計とするなどのモデルの再構築、損失関数やハイパーパラメータの再検討も考えられる。他には、本研究ではカテゴリ変数を入力値とするために Ordinal encoding を行ったが、数値的な意味はもたない。そこで、One-Hot Encoding などを活用し数値的な意味を持たせずにカテゴリ変数を数値化する手法による予測精度の改善の検討も必要である。2つ目は、提案予測モデルの臨床現場への導入である。医療従事者が実際に活用することで、CI+i 療法の効果の向上を目指す。そのためには開発された提案予測モデルの利便性の向上のためのユーザインターフェースの開発と、より実際のニーズに基づき、モデルの学習に対して退院が近い患者のデータを使わないことなどの制約を加えることや、学習データと評価データに同じ被験者のデータが含まれないようにするなどの改善が必要である。以上の課題を解決することで正確な予測による適切な目標設定、および計画の立案につながりリハビリの治療の質の向上につながると考えられる。3つ目は、他症例への適用可能性を検証することである。本研究では、脳卒中患者のアウトカムである FIM スコアを用いて提案予測モデルを構築したが、発達障害児を対象とした場合、運動能力における障害を評価するための MABC-2[66] をアウトカムとし、軽度認知障害のある高齢者を対象とした場合、総合的な認知機能を評価するための HDS-R[79] や MMSE[80] をアウトカムとすることで、提案予測モデルを構築することで適用範囲を拡大できないかどうかを検証する必要がある。

5.5 おわりに

本章では、退院時の FIM スコアを予測するための提案予測モデルを構築し、その有用性を検証した。本章の成果を以下にまとめる。

1. 機械学習の導入によって入院時あるいは入院中のデータから退院時の FIM スコアを予測するために次元圧縮部と予測部の組み合わせによる手法を提案した。
2. 提案予測モデルの平均誤差は 3.63 点となり要求予測精度の 5 点以下を満たしたこと

から有用性を明らかにした。さらに、他の手法との比較により回復期リハビリ病院の患者を対象とした退院時の FIM スコアの予測に対して、次元圧縮部と予測部を組み合わせた提案予測モデルが有用であることが明らかになった。

3. 次元圧縮部を除いた予測部のみによる予測モデルとの比較から、次元圧縮部により平均誤差を 4.28 点から 3.63 点に減少させられることが分かった。

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では医療 DX の実現に向け、まずは iWakka のユーザビリティの向上とゲーミフィケーションの導入を通して、iWakka による評価とトレーニングができる病院、研究機関、そして症例の幅を広げた。さらにデータをクラウド化することで対象者と医療従事者が日々の実施状況を確認できる iWakka ヘルスケアシステムを開発し、地域在住高齢者に対する有用性検証を行った。また、手指巧緻性の向上のためには適切な目標設定とそこから逆算した計画が重要である。そのために必要となる予後予測をするためのモデルを開発して有用性検証を行った。各章のまとめを以下にまとめる。

6.1.1 第 2 章のまとめ

iWakka の臨床現場への導入や医工連携の共同研究の促進を目的としてユーザビリティ向上のための開発を行なった。

1. 臨床現場からの要求仕様をまとめ、iWakka のユーザビリティ向上のための設計を行った。
2. 要求仕様を満たした iPad 版 iWakka を開発し、ユーザビリティを向上させた。
3. 共同研究先の偕行会リハビリテーション病院での軽度認知機能低下高齢者の判別への活用や、千葉県立保健医療大学での視覚遮断環境下での把握力調整能力と各指の役割分担の検討への活用につながった。

6.1.2 第 3 章のまとめ

iWakka の発達障害児への適用範囲の拡大を目的としてゲーミフィケーションを導入し自閉症児と発達性協調運動障害児への有用性検証を行なった。

1. ポーランドの自閉症診断、および治療センターと東京都立東部療育センターのニーズをヒアリングした。これにより自閉症児と発達性協調運動障害児への把握力調整能力の評価とトレーニングを実施するための要求仕様を明らかにした。
2. iPad 版 iWakka にゲーミフィケーションを導入した iWakka Game と難易度の異なる複数の課題を開発した。そして、デバイスのカバーや小型 Wakka を開発し、安全性と利便性を向上させた。また把握力調整能力を多面的に評価するための評価手法を提案した。
3. トレーニングを主な目的として自閉症患者への適用可能性検証を行い、把握力調整能力の改善を確認した。
4. 評価を主な目的として発達性協調運動障害児への適用可能性検証を行い、把握力調整能力の特徴を多面的に評価できることを確認した。

6.1.3 第 4 章のまとめ

地域在住高齢者の把握力調整能力と認知機能の改善を目的として iWakka ヘルスケアシステムの開発と有用性検証を行なった。

1. iWakka を用いて在宅での把握力調整能力と認知機能を改善させる目的で新たなトレーニングを提供し、さらに医療従事者が日々の実施状況を確認できる iWakka ヘルスケアシステムを開発した。
2. 地域在住高齢者 14 名を対象に在宅で 30 日間の介入研究を行い、把握力調整能力と認知機能、および QOL の変化を調査し、すべてにおいて有意な改善を確認することで、有用性を検証した。
3. 30 日間の把握力調整能力に対する運動学習の変化は、11 名において指数関数的減衰を表す近似曲線にて定量化できた。そして介入前の記憶機能が運動学習の過程に影響を与えることを明らかにした。

6.1.4 第5章のまとめ

医療従事者が適切な目標設定とそこから逆算した計画を立案するために必要な退院時の FIM スコアの予測を目的として提案予測モデルの構築と有用性検証を行なった。

1. 機械学習の導入によって入院時あるいは入院中のデータから退院時の FIM スコアを予測するために次元圧縮部と予測部の組み合わせによる手法を提案した。
2. 提案予測モデルの平均誤差は 3.63 点であり、要求予測精度である 5 点以下を満たしたことから有用性を明らかにした。また従来法である重回帰分析との比較結果により、機械学習が有用であることが明らかになった。
3. 次元圧縮部を除いた予測部のみによる予測モデルとの比較から、次元圧縮部により平均誤差を 4.28 点から 3.63 点に減少させられることが分かった。

6.2 今後の課題と将来の展望

6.2.1 将来の医療 DX

Fig. 6.1 に筆者が考える将来の手指巧緻性のリハビリにおける医療 DX のイメージを示す。リハビリは予防、医療、介護の全ての場面で行われる。まず対象者は住まいにてヘルスケアプラットフォームを通して iWakka による把握力調整能力の評価とトレーニングを行う。そのトレーニング内容は、パーソナライズされたものであり対象者に合わせた課題が提供される。日々の課題の実施を通して運動機能や認知機能の低下の可能性が確認された場合は、医療機関へ受診する。医療従事者は、適切な診断とトレーニング計画を立案する。その計画を支援するために、これまでの診断データをもとにヘルスケアプラットフォームを通して予後予測の結果を取得する。また、リハビリの機会を増やすために、住まいだけでなく介護施設でもリハビリを受けられるようにし、専門性の異なる人々がヘルスケアプラットフォームから適切に情報を利用できるようにする。そして、ヘルスケアプラットフォームに蓄積されるデータに、iWakka のデータだけではなくものをつまむ動作であるピンチ力の調整能力のトレーニング評価デバイスや活動量計などのデータも加えることでより効果の高いリハビリが実現できると考えている。

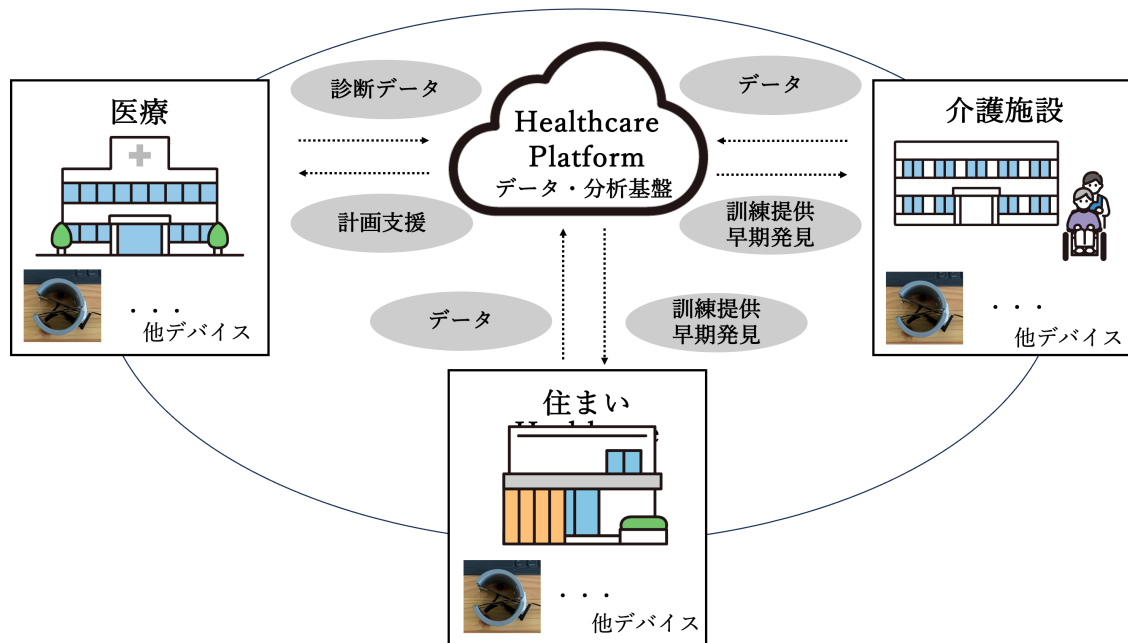


Fig. 6.1: Medical DX in the future rehabilitation

6.2.2 医療 DX と今後の課題

本研究では、リハビリの臨床現場のニーズに基づいて iPad 版 iWakka, iWakka Game を開発し、それらを組み合わせた iWakka ヘルスケアシステムを開発した。iWakka ヘルスケアシステムではデータをクラウドに保存することで、対象者が住まいにおいて把握力調整能力の評価とトレーニングを可能にした。そして地域在住高齢者を対象にした有用性検証を行った結果、把握力調整能力と認知機能の改善が認められた。加えて、脳卒中患者を対象とした退院時の FIM スコアを予測するための提案予測モデルを構築し、有用であることを確認した。これらの研究を通して、把握力調整能力に着目した医療 DX の実現に向けた一歩を踏み出した。

超少子高齢化により生産年齢人口は減少の一途をたどるため、医療 DX による医療費の削減や医療従事者の負担軽減が求められている。iWakka ヘルスケアシステムと予後予測モデルの統合やパーキンニズムやフィジカルフレイルなどに適用範囲を拡大することで、医療 DX の実現に向けたさらなる貢献が可能と考える。そして iWakka ヘルスケアシステムのトレーニングを継続するためのモチベーションを維持するために、難易度を星変化量だけではなく他の指標からも難易度を定義し適切な目標設定を行うことが重要である。他にはすでに認知機能が低下している高齢者や、iWakka Game での適用可能性が示された発達障害児などの他の症例に対しても有用性検証を行う必要がある。第 4 章では、認知機能の

改善を目的として iWakka ヘルスケアシステムを開発したが、先行研究では、認知症の早期発見のために軽度認知障害のある高齢者の判別をするための判別アルゴリズムを構築 [35] し特許を取得 [110] したものがあつた。住まいにおいても早期発見ができるように、その判定アルゴリズムを iWakka ヘルスケアシステムに統合することも考えられる。

6.2.3 iWakka と今後の課題

知の拠点あいち重点研究プロジェクトにて「多感覚 ICT を用いたフレイル予防・回復支援システムの研究開発」を研究テーマとするプロジェクトがある [111]。筆者も参画しているこのプロジェクトでは、フレイルの予防とフレイルからの回復を目指すことを目的として多感覚 ICT を用いたフレイル予防・回復支援システムの研究開発が進んでいる。そのひとつのフレイル検査・回復支援デバイス研究開発の一環として、iWakka のコントロールボックスとデバイスを一体化した All-in-One Wakka の開発を進めている。また、様々な感覚を刺激するために、触覚提示をする Touch Wakka、嗅覚提示をする Smell Wakka などのさらなる発展につなげるような研究も進んでいる。iWakka ヘルスケアシステムの効果を多面的に検証する研究も進んでいる。その検証では、活動量計から得られるデータを評価データとして追加し、介入あり群となし群による比較が行われる予定である。iWakka はこれまで片手で行われてきたが、両手による協調運動の評価とトレーニングする課題も考案中である。その応用として、認知機能の低下とその協調運動の変化の関連性を調査することで、認知機能の低下の判別に応用できる可能性があると考えている。

6.3 リハビリ難民

リハビリを受けることを希望してもリハビリを受けられない「リハビリ難民」が急増しており、200 万人にのぼると言われている。その理由のひとつとして、自身に効果のあるリハビリ支援機器を見つけられていないという課題がある。そこで筆者は起業家育成プロジェクト Tongali 主催ビジネスプランコンテスト 2019 にて、対象となる症例、研究機関、ものづくり企業、医療従事者をつなぎ、リハビリ支援機器を効率よく見つけるためのネットワークの構築や、その機器が存在しないのであれば自ら開発できるソーシャルものづくりネットワーク RehaNe を提案した。現時点で社会実装までには至っていないが、医療 DX を実現するためのアプローチとして、必要なものであると考えている。

6.4 最後に

手は第 2 の脳と言われており [10], 手指巧緻性は認知機能と強く関連する身体機能 [14] である. そして把握に必要な手指巧緻性として把握力調整能力がある. 超少子高齢社会となった我が国では, 把握力調整能力の維持・向上の重要性が増していくものと考えている. 国民の健康増進や切れ目のない質の高い医療の提供のために必要な医療 DX の実現に向け, 把握力調整能力と機能的自立度評価スコアの予測に着目した本研究の取り組みが今後も継続されることを期待している.

参考文献

- [1] 総務省統計局, 人口推計 (令和5年(2023年)7月確定値、令和5年(2023年)12月概算値), <http://www.stat.go.jp/data/jinsui/new.html> (参照 2024-05-19).
- [2] 内閣府, 令和5年版高齢社会白書,
<https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/gaiyou/pdf/1s1s.pdf> (参照 2024-05-19).
- [3] 厚生労働省, 令和3(2021)年度国民医療費の概況,
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/21/dl/kekka.pdf> (参照 2024-05-19).
- [4] 厚生労働省, 「医療DX令和ビジョン2030」厚生労働省推進チーム,
https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/other-isei_210261_00003.html (参照 2024-05-19).
- [5] Stolterman E., Croon Fors A., Information technology and the good life, *Information Systems Research Relevant Theory and Informed Practice*, 143, pp. 687-692, 2004.
- [6] 内閣官房, 世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画(令和2年7月17日閣議決定),
<https://cio.go.jp/node/2413> (参照 2024-05-19).
- [7] 川上途行, リハビリテーションチームにもたらすDX効果とは～現状の課題と未来像～, *リハビリテーション医療DX研究*, 1(1), pp. 8-10, 2023.
- [8] 里宇明元, 高齢者リハビリテーションの新展開 3. スマートリハプロジェクト, *Geriatric Medicine*, 57(1), pp. 33-36, 2019.
- [9] 後藤博, スマートリハ構想、安心できる暮らしの支えへー効果的なりハビリテーション医療の提供体制を目指すー,
<https://www.dlri.co.jp/pdf/ld/2019/wt1908b.pdf> (参照 2024-05-19).

- [10] 酒井昭典, 善家雄吉, 目貫邦隆, 山中芳亮, 田島貴文, 岡田祥明, 手の外傷後のリハビリテーション, *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, 54(8), pp. 601-608, 2017.
- [11] 大築立志, 「たくみ」の科学, 朝倉書店, 1988.
- [12] 高橋美登梨, 大枝近子, 佐藤悦子, 手指の巧緻性に関わる生活動作について—使い手および動作に対する意識の調査から, *目白大学総合科学研究*, 7, pp. 29-39, 2011.
- [13] 矢部京之助, 大築立志, 笠井達哉, 入門運動神経生理学—ヒトの運動の巧みさを探る, 市村出版, pp.364-371, 2003.
- [14] Abe T., Soma Y., Kitano N., Jindo T., Sato A., Tsunoda K., Tsuji T., Okura T., Change in hand dexterity and habitual gait speed reflects cognitive decline over time in healthy older adults: a longitudinal study. *Journal of Physical Therapy Science*, 29(10), pp. 1737–1741, 2017.
- [15] 森田良文, 中嶋伸吾, 佐藤徳孝, 矢崎潔, 把握力調整能力の定量的評価システム, *日本福祉工学会誌*, 18(2), pp.5-10, 2016.
- [16] 山崎一徳, 北山佳央里, 中嶋伸吾, 佐藤徳孝, 森田良文, 鵜飼裕之, 桜井亨, 久保田怜, 矢崎潔, 小森健司, 田口真哉, 把握動作における感覚運動統合機能の定量的評価のための計測デバイスの開発, *日本福祉工学会誌*, 16(1), pp. 20-25, 2014.
- [17] 森田良文, 矢崎潔, 桜井亨, みんなによるみんなのためのリハビリ支援機器の開発のためには, 第32回ライフサポート学会大会, 第16回日本生活支援工学会大会, 日本機械学会 福祉工学シンポジウム2016 (LIFE2016) 論文集, 2A2-C04, pp. 196-198, 2016.
- [18] Takahashi C.D., Der-Yeghiaian L., Le V.H., Cramer S.C., A robotic device for hand motor therapy after stroke, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 17-20, 2005.
- [19] Devon L., Job G., Melissa K., Nassif R., Megan C., DESIGN OF A CUSTOM LOAD CELL TO MEASURE INDIVIDUAL FINGER FORCES, *Biomedical Sciences Instrumentation*, 56, pp. 178-183. 2020.

- [20] 澤田辰徳, 作業療法領域における DX の現状, リハビリテーション医療 DX 研究 1(2), pp. 37-40, 2023.
- [21] 福意武史, 作業療法と医療福祉, 川崎医療福祉学会誌, 21, pp. 389-399, 2012.
- [22] 川端博子, 田中美幸, 鳴海多恵子, 手指の巧緻性と生活の自立・学力の関係, 一般社団法人日本家政学会研究発表要旨集, 61, p. 41, 2009.
- [23] American Psychiatric Association, Diagnostic and Statistical Manual of Mental disorders, Fifth Edition, American Psychiatric Publishing, pp. 74-77, 2013.
- [24] American Psychiatric Association(日本精神神経学会・日本語版用語監修), DSM-5 精神疾患の診断・統計マニュアル, 医学書院, 2014.
- [25] Derikx D.F.A.A., Schoemaker M.M., The Nature of Coordination and Control Problems in Children with Developmental Coordination Disorder during Ball Catching: A Systematic Review, Human Movement Science, 74, pp. 102688, 2020.
- [26] Asonitou K., Koutsouki D., Kourtessis T., Charitou S., Motor and cognitive performance differences between children with and without developmental coordination disorder (DCD), Research in Developmental Disabilities, 33(4), pp. 996-1005, 2012.
- [27] Van Waelvelde H., De Weerdt W., De Cock P., Smits-Engelsman B.C.M., Peersman W, Ball Catching Performance in Children with Developmental Coordination Disorder, Adapted Physical Activity Quarterly, 21(4), pp. 348-363, 2004..
- [28] 傳田健三, 自閉スペクトラム症 (ASD) の特性理解, 心身医学, 57(1), p. 19-26, 2017.
- [29] Sacrey K., Germani T., Bryson S., Zwaigenbaum L., Reaching and grasping in autism spectrum disorder: A review of recent literature, Frontiers in Neurology, 5(6), 2014.
- [30] 内閣府, 平成 31 年第 5 回経済財政諮問会議,
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/minutes/2019/0410/agenda.html> (参照 2024-05-19).
- [31] 坪井章雄, 門間正彦, 河野豊, 中村洋一, 新井光男, 林隆司, 大貫学, 健常者における手指巧緻動作と認知機能の関連, 厚生指標, 60, pp. 10-16, 2013.

- [32] Kobayashi-Cuya K.E., Sakurai R., Sakuma N., Suzuki H., Yasunaga M., Ogawa S., Takebayashi T., Fujiwara Y., Hand dexterity, not handgrip strength, is associated with executive function in Japanese community-dwelling older adults: a cross-sectional study, *BMC Geriatrics*, 18(192), pp. 1–8, 2018.
- [33] Jing W., Jun X., Mian L., Dongmei R., Yuan L., Yue H., Yiling A., Shujuan L., Finger exercise alleviates mild cognitive impairment of older persons: A community-based randomized trial, *Geriatric Nursing*, 47, pp. 42–46, 2022.
- [34] Suzumura S., Osawa A., Kanada Y., Maeda K., Takano E., Sugioka J., Maeda N., Nagahama T., Shiramoto K., Kuno K., Kizuka S., Satoh K., Sakurai H., Sano Y., Mizuguchi T., Kandori A., Kondo I., Finger Tapping Test for Assessing the Risk of Mild Cognitive Impairment, *Hong Kong Journal of Occupational Therapy*, 35(2), pp.137–145, 2022.
- [35] 戸嶋和也, 田丸司, 西谷萌, 野村正和, 和坂俊昭, 森田良文, 運動系列学習記憶の定量的評価による軽度認知機能低下高齢者の判別, *生体医工学*, 60(2-3), pp. 68–75, 2022.
- [36] 厚生労働省. 令和2年(2020)患者調査の概況,
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/20/index.html> (参照 2024-05-19).
- [37] 日本脳卒中学会, 脳卒中治療ガイドライン 2015 [追補 2019],
http://www.jsts.gr.jp/img/guideline2015_tuiho2019_10.pdf (参照 2024-05-19).
- [38] 森田良文, 安藤晃平, 野村正和, 戸嶋和也, 田丸司, 脳卒中片麻痺患者に対する把握力調整能力評価トレーニングデバイスの有用性検証, *計測自動制御学会論文集*, 55(1), pp.78–84, 2019.
- [39] Wasaka T., Ando K., Nomura M., Toshima K., Tamaru T., Morita Y., Visuomotor Tracking Task for Enhancing Activity in Motor Areas of Stroke Patients, *Brain Sci*, 12(8), 2022.
- [40] 田中健治, 脳卒中のリハビリテーション予後予測に関する研究 重回帰分析を用いて, *脳卒中*, 12(5), pp. 452-462, 1990.

- [41] 平野恵健, 林健, 新田收, 西尾大祐, 皆川智也, 池田誠, 高橋秀寿, 木川浩志, 回復期リハビリテーション病棟に入院した脳卒中 重度片麻痺患者の退院時 ADL 能力に及ぼす因子の検討, 理学療法科学, 30(4), pp. 563-567, 2015.
- [42] Linacre J.M., Heinemann J.W., Wright B.D., Granger C.V., Hamilton B.B., The structure and stability of the functional independence measure, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 75, pp. 127-132, 1994.
- [43] Heinemann A.W., Linacre J.M., Wright B.D., Hamilton B.B., Granger C., Relationships between impairment and physical disability as measured by the functional independence measure, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 74, pp. 566-573, 1993.
- [44] 浅井剛, 山口良太, リハビリテーションにおける工学的課題と地域・工学連携への期待, システム／制御／情報, 63(8), pp. 329-334, 2019.
- [45] Linacre J.M., FIM levels as ordinal categories, JOURNAL OF OUTCOME MEASUREMENTS, 4, pp. 616-633, 2000.
- [46] Ottenbacher K.J., Hsu Y., Granger C.V., Fiedler R.C., The reliability of the functional independence measure: a quantitative review, Archives of physical medicine and rehabilitation, 77(12), pp. 1226-1232, 1996.
- [47] Russo T., Felzani G., Giunta M., Mascio C., Marini C., Monitoring recovery by physical therapists using the FIM scale during rehabilitation programs: An inter-rater and intra-rater reproducibility study, Health, 5, pp.99-104, 2013.
- [48] 園田茂, 回復期リハビリテーション医療における機能評価, The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, 55(4), pp. 292-295, 2018.
- [49] Yagi M., Yasunaga H., Matsui H., Morita K., Fushimi K., Fujimoto M., Koyama T., Fujitani J., Impact of Rehabilitation on Outcomes in Patients With Ischemic Stroke: A Nationwide Retrospective Cohort Study in Japan, Stroke, 48(3), pp. 740-746, 2017.
- [50] 中野聡子, 奥野純子, 深作貴子, 堀田和司, 藪下典子, 根本みゆき, 田中喜代次, 柳久子, 介護予防教室参加者における運動の継続に関連する要因, 理学療法学, 42(6), pp. 511-518, 2015.

- [51] 伊藤祐子, 田中勇次郎, 「おもしろい」「楽しい」から始まる発達障害児リハビリテーション-作業療法の視点から-, Journal of the Society of Biomechanisms, Society of Biomechanisms, 33(2), pp. 129-133, 2009.
- [52] 金野達也, 佐藤彰紘, 矢崎潔, 森田良文, 柴垣浩明, 秋月千典, 把持力調整能力評価法の測定誤差の検討, 理学療法科学, 32(1), pp.117-121, 2017.
- [53] 佐藤彰紘, 金野達也, 矢崎潔, 健常成人における筋収縮様式の違いによる把持力調整能力の比較-把持力調整能力測定機器 iWakka を用いた検討-, 目白大学健康科学研究, 10, pp. 15-21, 2017.
- [54] Kaneno T., Sato A., Akizuki K., Yamaguchi A., Yasaki K., Morita Y., Assessing the adjustability of grasping force using the iWakka in elderly individuals, Journal of Physical Therapy Science, 29(12), pp. 2215-2219, 2017.
- [55] 武井勇樹, 高橋健, 矢崎潔, リワークプログラムでの iWakka を用いた取り組み, 第 51 回日本作業療法学術大会抄録集, PH-1B03, 2017.
- [56] 厚生労働省, 地域包括ケアシステム,
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/kaigo_koureisha/chiiki-houkatsu/index.html (参照 2024-05-19).
- [57] 有限会社浅草ギ研, BLE モジュール BLESerial3,
<http://www.robotsfx.com/robot/BLESerial3.html> (参照 2024-05-19).
- [58] Nomura M., Ando K., Morita Y., iPad-based Hand Rehabilitation Device for Adjustability of Grasping Force, Proceedings of the 12th international Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology (i-CREATE 2018, Shanghai, China), 2018.
- [59] 吉野智佳子, 森田良文, 視覚遮断環境下での手の把握(ピンチ)力調整能力と各指の役割分担の検討, 千葉県立保健医療大学紀要, 59, p. S465, 2022.
- [60] 吉野智佳子, 森田良文, クラスタ分析を用いた手の把握力調整能力と各指の役割の検討, 第 59 回日本リハビリテーション医学会学術集会抄録, 12(1), p. 1-107, 2021.

- [61] Li R., Li B., Zhang S., Fu H., Lo W., Yu J., Sit C., Wen D., Evaluation of the fine motor skills of children with DCD using the digitalised visual-motor tracking system, *The Journal of Engineering*, 2018(2), pp. 123-129, 2018.
- [62] Gonsalves L., Campbell A., Jensen L., Straker L., Children With Developmental Coordination Disorder Play Active Virtual Reality Games Differently Than Children With Typical Development, *Physical Therapy*, 95(3), pp. 360-368, 2015.
- [63] Cavalcante Neto J.L., Steenbergen B., Tudella E., Motor intervention with and without Nintendo® Wii for children with developmental coordination disorder: protocol for a randomized clinical trial, *Trials*, 20(1), 794, 2019.
- [64] 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所, 標準的な体型の中年男女の人体寸法データベース,
https://www.hql.jp/database/cat/size/40s_standardtype (参照 2024-05-19).
- [65] 一般社団法人日本機械工業連合会, 子どもの身体寸法データベース,
<https://www.hql.jp/database/cat/size/children> (参照 2024-05-19).
- [66] Brown T., Lalor A., The Movement Assessment Battery for Children—Second Edition (MABC-2): A Review and Critique, *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 29(1), pp. 86-103, 2009.
- [67] 山際英男, 野村正和, 西谷萌, 森田良文, 健常小児における把握力調整能力の発達的变化, 第36回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp. 75-76, 2022.
- [68] 山際英男, 野村正和, 菊地謙, 森田良文, 就学前後の不器用さを示す児童における手指巧緻性の発達的变化, 第7回日本DCD学会学術集会, B-3, p. 54, 2024.
- [69] 厚生労働省, 地域包括ケアシステム,
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bun-ya/hukushi_kaigo/kaigo_koureisha/chiiki-houkatsu/ (参照 2024-05-19).
- [70] 土井剛彦, 健康寿命延伸と療法士, 理学療法士の立場から, *日本老年療法学会誌*, 1, pp. 1-6, 2022.

- [71] Kampmeije R., Pavlova M., Tambor M., Go-linowska S., Groot W., The use of e-health and m-health tools in health promotion and primary prevention among older adults: a systematic literature review, *BMC Health Service Research*, 16(5), 290, pp. 467–479, 2016.
- [72] 福井一輝, 浦辺幸夫, 前田慶明, 光岡眞里, 地域在住高齢者に対する認知機能トレーニングに運動を併用した介入効果の影響, *理学療法科学*. 35(6), pp. 867–872, 2020.
- [73] 黒瀬聖司, 山中裕, 藤井彩, 堤博美, 木村穰, 地域住民における脳機能チェック・トレーニングツールの使用が認知機能と行動変容に与える影響, *保健医療学雑誌*, 11(2), pp. 81–92, 2020.
- [74] Seol J., Lim N., Nagata K., Okura T., Effects of home-based manual dexterity training on cognitive function among older adults: a randomized controlled trial, *European Review of Aging and Physical Activity*, 20(9), 2023.
- [75] Workship MAGAZINE, ゲーミフィケーションとは? 7社の成功事例とともにポイントを解説,
https://goworkshop.com/magazine/gamify_without_gimmicks/ (参照 2024-05-19).
- [76] Faul F., Erdfelder E., Buchner A., Lang A.G., Statistical power analyses using G*Power 3.1, Tests for correlation and regression analyses, *Behavior Research Methods*, 41(4), pp. 1149–1160, 2009.
- [77] Morris J.C., The Clinical Dementia Rating (CDR), current version and scoring rules. *Neurology*, 43, pp. 2412–2414, 1993.
- [78] Beck A., Steer R., Brown G., Manual for the Beck depression inventory-II, San Antonio, TX, Psychological Corporation, 1996.
- [79] 加藤伸司, 下垣光, 小野寺敦志, 植田宏樹, 老川賢三, 池田一彦, 小坂敦二, 今井幸充, 長谷川和夫, 改訂長谷川式簡易知能評価スケール (HDS-R) の作成, *老年精神医学雑誌*, 2(11), pp. 1339–1347, 1991.
- [80] Folstein M.F., Folstein S.E., McHugh P.R., “Minimentalstate”. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician, *Journal of Psychiatric Research*, 12, pp. 189–198, 1975.

- [81] Dubois B., Slachevsky A., Litvan I., Pillon B., The FAB, a Frontal Assessment Battery at bedside, *Neurology*, 55(11), pp. 1621–1216, 2000.
- [82] Tombaugh T.N., Trail Making Test A and B, normative data stratified by age and education, *Arch Clin Neuropsychol*, 19(2), pp. 203–214, 2004.
- [83] Osterrieth P.A., Le test de copie d' une figure complex, Contribution a l' etude de la per-ception et de la memoire, *Archives de Psychologie*, 30, pp. 206–356, 1944.
- [84] Logsdon R., Gibbons L.E., McCurry S.M., Teri L., Quality of Life in Alzheimer' s Disease, patient and caregiver reports, *Journal of Mental Health and Aging*, 5(1), pp. 21–32, 1999.
- [85] Oldfield R.C., The assessment and analysis of the handedness. the Edinburgh inventory, *Neuropsychologia*, 9(1), pp. 97–113, 1971.
- [86] 中村隆一, 運動学習について. 理学療法のための運動生理, 9(3), pp. 149–156, 1994.
- [87] 西谷萌, 野村正和, 大森啓士, 森田良文, 戸嶋和也, 田丸司, iWakka による把握力調整時の運動学習に関する基礎研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2A2-E10, 2020.
- [88] 勝浦駿平, 太田久晶, 脳卒中ドライバーのスクリーニング評価日本版(J-SDSA)における成績特性—健常若年者を対象とした研究—, *高次脳機能研究*, 39(2), pp. 251–258, 2019.
- [89] 金野達也, 佐藤彰紘, 秋月千典, 健常高齢者の把握力調整能力の特性, *リハビリテーション・エンジニアリング*, 34(4), pp. 156–162, 2019.
- [90] Baernholdt M., Hinton I., Yan G., Rose K., Mattos M., Factors associated with quality of life in older adults in the United States, *Quality of Life Research*, 21(3), pp. 527–534, 2012.
- [91] Seol J., Lim N., Nagata N., Okura T., Effects of home-based manual dexterity training on cognitive function among older adults: a randomized controlled trial, *European Review of Aging and Physical Activity*, 20(9), 2023.

- [92] 山田実, 注意機能トレーニングによる転倒予防効果の検証, 理学療法科学, 24(1), pp. 71-76, 2009.
- [93] 村田伸, 大山美智江, 大田尾浩, 村田潤, 木村裕子, 豊田謙二, 津田 彰, 在宅高齢者の運動習慣と身体・認知・心理機能との関連, 行動医学研究, 15(1), pp. 1-9, 2009.
- [94] 坂本美香, 菊池恵美子, 繁田雅弘, アルツハイマー病の重症度と手指機能に関する研究, 日本老年医学会雑誌, 43(5), pp. 616-621, 2006.
- [95] 戸嶋和也, 野口貴弘, 野村正和, 森田良文, 田丸司, 回復期病棟退院後の継続した上肢機能練習を目的とした Tele Rehabilitation System の開発 - 1 例の試走報告 -, 第 5 回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会, 2021.
- [96] 徳永誠, 池田優生, 井上美由紀, 児玉淳, 坂本真琴, 永友真紀, 三宮克彦, 年齢と入院時 FIM で層別化した脳卒中患者の退院時 FIM を予測する重回帰分析 - 日本リハビリテーション・データベースの分析, JOURNAL OF CLINICAL REHABILITATION, 24, pp.828-34. 2015.
- [97] 徳永誠, 當利賢一, 江口宏, 角洋子, 池島由貴, 牛島美幸, 宮部伸子, 辻本真也, 福田恵美子, 運動 FIM と認知 FIM を層別化して 4 つの予測式を作ることで運動 FIM 利得を目的変数とした重回帰分析の予測精度が高まる - 日本リハビリテーション・データベースを用いた研究 -, Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science, 8, pp. 1-8, 2017.
- [98] 小山 哲男, 脳卒中患者の帰結予測, The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine, 55(9), pp. 773-782, 2018.
- [99] Isobe T., Okada Y., Medical AI System to Assist Rehabilitation Therapy, Proc. ICDM 2018, pp. 266-271, 2018.
- [100] Lee K.B., Lim S.H., Kim K.H., Kim K.J., Kim Y.R., Chang W.N., Yeom J.W., Kim Y.D., Hwang B.Y., Six-month functional recovery of stroke patients: A multi-time-point study, International Journal of Rehabilitation Research, 38(2), pp.173-180, 2015.
- [101] Langhorne P., Bernhardt J., Kwakkel G., Stroke rehabilitation, Lancet, 377(9778), pp. 1693-16702, 2011.

- [102] Chino N., Sonoda S., Domen K., Saitoh E., Kimura A., Stroke Impairment Assessment Set (SIAS), *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*. 31(2), pp. 119-125, 2009.
- [103] Swieten J.C., Koudstaal P.J., Visser M.C., Schouten H.J., Gijn J., Interobserver Agreement for the Assessment of Handicap in Stroke Patients, *Stroke*, 19, pp. 604-607, 1998.
- [104] 藤島一郎, 嚥下障害リハビリテーション入門 I 嚥下障害入門, *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, 50(3), pp. 202-211, 2013.
- [105] Nestle Nutrition Institute, MNA Mini Nutritional Assessment, https://www.mna-elderly.com/mna_forms.html (参照 2024-05-19).
- [106] 全国保険医団体連合会, 一般病棟用の重症度、医療・看護必要度に係る評価票 評価の手引き, https://hodanren.doc-net.or.jp/iryoukankei/14kaitei/yosiki/b07_2.pdf (参照 2024-05-19).
- [107] Ioffe S., Szegedy C., Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift, *ICML*, pp. 448-456, 2015.
- [108] Keras, <https://keras.io/> (参照 2024-05-19).
- [109] 徳永誠, 米村美樹, 井上理恵子, 三宮克彦, 中島雪彦, 渡邊進, 中西亮二, 山永裕明, 米満弘之, 園田茂, 年齢が回復期リハ病棟における脳卒中患者のFIM利得に及ぼす影響, *Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science*, 3, pp. 1-4, 2012.
- [110] 森田良文, 和坂俊昭, 野村正和, 大森啓士, 西谷萌, 田丸司, 戸嶋和也, 認知機能評価プログラム、認知機能評価装置、認知機能評価システム、及び認知機能評価方法, 特願 2021-088557.
- [111] 知の拠点あいち重点研究プロジェクト, 多感覚 ICT を用いたフレイル予防・回復支援システムの研究開発, <https://www.astf-kha.jp/project/project3/files/PS-4.pdf> (参照 2024-05-19).

謝辞

本論文をまとめることができたのも、非常に多くの方々のご支援ご協力の賜物であり、ここにあらためて感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、研究指導から学位論文審査までのあらゆる面で、始終懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科の森田良文教授に心より感謝いたします。さらに、学位審査に携わっていただき有益なご助言を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科の加藤昇平教授、関健太准教授、富山大学大学院理工学研究部の中島一樹教授に深く感謝いたします。

本研究の iPad 版 iWakka, iWakka ヘルスケアシステム、および FIM スコアの予後予測モデルの開発にあたり、多大なるご助言とご支援を賜りました、偕行会リハビリテーション病院の田丸司病院長、同病院作業療法士兼森田研究室在籍中の戸嶋和也氏に深く感謝いたします。

本研究の iWakka Game の開発にあたり、多大なるご助言とご支援を賜りました、ポーランドのウッチ工科大学の Prof. Grzegorz Granosik, Dr. Igor Zubrycki. Ms. Natalia Kucharek, 東京都立東部療育センターの山際英男氏に深く感謝いたします。

そしてご指導とご助言を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科の佐藤徳孝准教授、和坂俊昭准教授、東京都立大学健康福祉学部作業療法学科の金野達也准教授、目白大学保健医療学部作業療法学科の佐藤彰紘准教授、合同会社エバーファインの竹河誠代表、株式会社アイムの桜井亨代表取締役社長、株式会社松栄電子研究所の王イェン代表取締役社長、株式会社名古屋臨床薬理研究所の伊藤順治代表取締役社長、オンラインズ web の山内大地代表、あいち産業科学技術総合センター企画連携部企画室の酒井昌夫室長補佐、鈴鹿工業高等専門学校機械工学科の打田正樹准教授、大同大学情報学部情報システム学科の山崎一徳准教授、千葉大学デザイン・リサーチ・インスティテュートの吉野智佳子特任研究員、長崎大学大学院医歯薬学総合研究科の岩永竜一郎教授、広島大学大学院医系科学研究科の宮口英樹教授（現在、高知健康科学大学学長）、石附智奈美講師、静岡県立こども病院の鴨下賢一先生（現在、株式会社児童発達支援協会代表取締役）、森田研究室元研究員の故若林宏明氏に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり多大な協力をしていただきました，森田研究室卒業生の安藤晃平氏，大森啓士氏，西谷萌氏，一寸木佑氏，在籍中の鈴木春洋氏，高戸了氏に深く感謝いたします。

また，森田研究室での研究活動を支えて下さいました秘書の鈴木恵美子氏に深く感謝いたします。最後に，研究室で共に過ごした院生，学部生の皆様，研究にご協力いただきました先生や被験者の方々をはじめ，本研究は，ここでは書ききれないほど多くの方々に携わっていただきました。皆様の温かいご支援とご協力に心より感謝申し上げます。

研究業績

本論文に関連する研究業績

学術論文（査読あり）

- [1] 野村正和, 森田良文, 田丸司, オートエンコーダを用いた退院時の FIM スコアの予測, 情報処理学会論文誌, 62(8), pp. 1426-1434 (2021.8)
- [2] Masakazu Nomura, Yoshifumi Morita, Hideo Yamagiwa, Development of “iWakka Game” for evaluation of hand dexterity in children with developmental coordination disorder, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 9(2), pp. 121-127 (2022.9)
- [3] 野村正和, 戸嶋和也, 一寸木佑, 高戸了, 森田良文, 把握力調整能力と認知機能の改善のためのヘルスケアシステムの開発と地域在住高齢者に対する有用性検証, 生体医学, 61(6), pp. 99-107 (2024.2)

国際会議論文（査読あり）

- [1] Masakazu Nomura, Natalia Kucharek, Igor Zubrycki, Grzegorz Granosik, Yoshifumi Morita, Adjustability for Grasping Force of Patients with Autism by iWakka: A Pilot Study, 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo 2019, Poznan, Poland), pp. 50-55 (2019.6)
- [2] Masakazu Nomura, Yoshifumi Morita, Hideo Yamagiwa, Applicability Verification of iWakka Game to Children with Developmental Coordination Disorder, ICAROB2022, GS1-6, pp. 736-739 (2022.1)

国際会議発表（査読なし）

- [1] Masakazu Nomura, Kohei Ando, Yoshifumi Morita, iPad-based Hand Rehabilitation Device for Adjustability of Grasping Force, Proceedings of the 12th international Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology (i-CREATe 2018, Shanghai, China), PP-6 (2018.7)

国内会議

- [1] 野村正和, 安藤晃平, 森田良文, 手指巧緻性のみえる化技術: 把握力調整能力のトレーニング効果と診断支援システムの提案, 第62回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCT'18) 講演論文集, 263-4 (2018.5)

その他の研究業績

学術論文（査読あり）

- [1] 森田良文, 安藤晃平, 野村正和, 戸嶋和也, 田丸司, 脳卒中片麻痺患者に対する把握力調整能力評価トレーニングデバイスの有用性検証, 計測自動制御学会論文集. 55(1), pp. 78-84 (2019.1)
- [2] 戸嶋和也, 田丸司, 西谷萌, 野村正和, 和坂俊昭, 森田良文, 運動系列学習記憶の定量的評価による軽度認知機能低下高齢者の判別, 生体医工学, 60(2-3), pp. 68-75 (2022.6)
- [3] Toshiaki Wasaka, Kohei Ando, Masakazu Nomura, Kazuya Toshima, Tsukasa Tamaru, Yoshifumi Morita, Visuomotor Tracking Task for Enhancing Activity in Motor Areas of Stroke Patients, Brain Sciences, 12(8), 1063 (2022.8)

国際会議発表（査読あり）

- [1] Toshiaki Wasaka, Kazuya Toshima, Kohei Ando, Masakazu Nomura, Keishi Omori, Moe Nishiya, Tsukasa Tamaru, Yoshifumi Morita, iWakka can enhance cortical excitability of motor related areas in stroke patients, Proceedings of 2021 Japan-Poland

International Workshop on Technologies Supporting Rehabilitation and Medical Services, p. 9 (2021.10)

- [2] Toshiaki Wasaka, Kazuya Toshima, Kohei Ando, Masakazu Nomura, Tsukasa Tamaru, Yoshifumi Morita, Facilitation of cortical activity in motor areas by visuomotor tracking task in stroke patients, 2022 Japan-Poland International Workshop on Technologies supporting rehabilitation and medical services (Lodz University of Technology, Poland) (2022.11)
- [3] Yoshifumi Morita, Yu Chokki, Ryo Takato, Kazuya Toshima, Masakazu Nomura, Masaki Uchida, Kazunori Yamazaki, Development of Smart iWakka Healthcare System, 2023 Japan-Poland International Workshop on Technologies supporting rehabilitation and medical services (2023.12)

国内会議

- [1] 森田良文, 安藤晃平, 野村正和, 柔らかさを利用した把握力調整能力のトレーニング評価デバイス, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017) 予稿集, pp. 751-752 (2017.12)
- [2] 戸嶋和也, 森田良文, 和坂俊昭, 安藤晃平, 野村正和, 田丸司, フィードバック付加条件の違いによる神経活動へ与える影響について 運動関連脳電位を用いた検討, 第48回日本臨床神経生理学学会, P2-15-04 (2018.11)
- [3] 西谷萌, 野村正和, 大森啓士, 森田良文, 戸嶋和也, 田丸司, iWakkaによる把握力調整時の運動学習に関する基礎研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'20, 2A2-E10(1)-(2) (2020.5)
- [4] 戸嶋和也, 野口貴弘, 野村正和, 森田良文, 田丸司, 回復期病棟退院後の継続した上肢機能練習を目的とした Tele Rehabilitation System の開発 - 1例の試走報告 -, 第5回日本リハビリテーション医学会秋季学術集会, PK1-2-2-11 (2021.11)
- [5] 戸嶋和也, 田丸司, 野村正和, 西谷萌, 一寸木佑, 森田良文, 把握力調整能力評価トレーニングデバイス (iWakka) による学習能力の定量評価について -転倒による骨折

経験の有無別における認知機能の差-, 第13回日本ニューロリハビリテーション学会
学術集会, O5-1 (2022.2)

[6] 山際英男, 野村正和, 西谷萌, 森田良文, 健常小児における把握力調整能力の発達的
変化, 第36回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.75-76 (2022.8)

[7] 山際英男, 野村正和, 菊地謙, 森田良文, 就学前後の不器用さを示す児童における手
指巧緻性の発達的变化, 第7回日本DCD学会学術集会, B-3 (2024.4)

受賞歴

[1] 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2017), 優秀講
演賞, 講演題目: 柔らかさを利用した把握力調整能力のトレーニング評価デバイス
(2017.12)

[2] 起業家育成プロジェクト Tongali 主催, ビジネスプランコンテスト 2019, Tongali 賞
4位, 題目: 脳卒中リハビリテーションのためのソーシャルものづくりネットワーク
(2019.6)

特許

[1] 森田良文, 和坂俊昭, 野村正和, 大森啓士, 西谷萌, 田丸司, 戸嶋和也, 認知機能評
価プログラム、認知機能評価装置、認知機能評価システム、及び認知機能評価方法,
特願 2021-088557