

修士論文

学習者の眼球運動情報に基づく
インタラクティブ教科書の作成用ツール
HyperMind Builder の開発と評価

渡邊 洸

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

渡邊 洸

審査委員：

安本 慶一教授 (主指導教員)

藤川 和利 教授 (副指導教員)

荒川 豊 准教授 (副指導教員)

藤本 まなと 助教 (副指導教員)

学習者の眼球運動情報に基づく インタラクティブ教科書の作成用ツール HyperMind Builder の開発と評価*

渡邊 洸

内容梗概

日本では、平成32年から実施される新学習指導要領（ICT教育）に向け、教科書がデジタル化していく流れにある。デジタル教科書は、紙媒体では付加できなかった、動的コンテンツ（動画や音声）や関連リンクの表示を可能にし、教科書の学習効果や理解度の向上に繋がると期待されている。しかし、学習効果や理解度を高めていくためには、「情報の一方的な提供」ではなく、媒体が学習者の認知状態を理解し「媒体と学習者の双方からインタラクト（情報共有）していくこと」が重要である。学習者（個人）の認知状態を認識することで、媒体側が個人に応じて提供する情報量や内容を制御することができ、また学習者が分からない内容を可視化することで教師の学生への理解度向上にも貢献できる。学習者の認知状態の把握方法として、眼球運動情報を用いた手法がある。関連研究では、眼球運動情報を用いて、覚醒度、認知負荷、確信度、興味の推定手法が提案されており、また眼球運動情報を用いた媒体側と読者のインタラクションによって、学習エンゲージメントや理解度の向上が報告されている。眼球運動情報を認知状態の推定手法として扱うことで、学習者が「どの」認知状態において、教科書の「どこ」を読んでいるかのデータを取得することができる。また、眼球運動情報の取得において、眼鏡型や設置型デバイスなど、多様な学習環境で利用が可能である。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, 2019年3月15日.

先行研究では、すでに眼球運動情報に基づきインタラクションを行うデジタル教科書（以降、*HyperMind Textbook*）の作成方法が提案されている。しかしながら、先行研究の課題として、*HyperMind Textbook* の作成に専門（プログラミング）スキルを必要とする点が挙げられている。先行研究の課題を踏まえ、本研究では、誰でも *HyperMind Textbook* を作成できる手法を提案する。提案手法により、学習者の特性や学習効果に詳しい教育者（教師・教育研究者・出版社）が、プログラマの手を借りることなく拡張文書を自ら作成できるようにする。これにより、各教育分野の専門家が自らの教育分野や講義に合わせて教科書を作成することが可能になり、全ての学習領域を網羅していくことが出来る。

本研究の課題は「誰でも拡張文書を作成できるツールをどのようにデザインしていくか?」が焦点となる。そこで、専門スキルを不要とし、*HyperMind Textbook* を作成することを可能にする GUI ツール：*HyperMind Builder* を提案、実装した。提案ツールに対し、実験参加者 10 人を対象にユーザビリティ調査を行なったところ、ツールの利用方法に対する理解度は全体評価として 84 %であることを確認した。また、ツールの操作方法にドラッグドロップやクリックなど簡易操作を採用した結果、「ツールによる作成工程は直截的で簡単」や「直感的な操作で使いやすかった」との好意的意見が得られた。一方で「ドラッグドロップ機能が分かりにくかった」といった反対意見も得られた。ツールの機能課題を発見する評価指標として NASA-TLX を用いた結果、精神的負荷や作業成績の改善が必要だと分かり、改善案として、ユーザの自由回答から、コンテンツのリムーブやリサイズなどの機能追加が必要であることが分かった。

キーワード

学習支援, 読書, インタラクティブ教科書, 眼球運動計測, GUI ツール

Development of the HyperMind Builder

A toolkit for creating

Gaze based Interactive Textbook*

Ko Watanabe

Abstract

In the current trend of Japan, paper textbooks are starting to be substituted by digital textbooks since the ICT education will be starting from 2020. Compared to paper textbooks, digital textbooks can include dynamic contents (music or movie) and related links. These changes are believed to bring higher comprehension and study efficiency on learners. However, we believe that just providing dynamic contents or related links will not be enough to maximize comprehension and study efficiency. It is necessary for the textbooks to understand individual cognitive states and interactively communicate with each other. Understanding learner's cognitive states will help textbooks to manage the amount of information to provide for each learner. Also, if the textbooks understand readers cognitive states, it can support teachers understanding of students by visualizing where their students don't understand. One of the promising methods to recognize the cognitive state is the pupil data analysis. Previous study showed that pupil data can measure *awakeness*, *cognitive load*, *comprehension*, and *interest*. Furthermore, some studies showed human-document interaction using pupil data improved reading engagement and comprehension. Pupil data is effective user

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 15, 2019.

information to use as an interaction trigger since it can measure both the cognitive states of the reader and the gaze position towards document. The data can be collected in various learning environments with the use of devices such as eye-glasses type or installed type.

In the previous research, the system for creating gaze based interactive document (*HyperMind Textbook*) has already been proposed. However, the proposed method can be used only by the people who have special (programming) skills. Therefore, in our study, we aim to create a toolkit, that allows anyone to create their own *HyperMind Textbook*. In this way, the toolkit allow every academic experts (Teachers, Education researchers, Publishers) to create *HyperMind Textbook* by themselves, which allows to cover all academic subjects necessary.

Our main target of this thesis is to clarify “How to design a toolkit that allows any one to create *HyperMind Textbook*?”. Hence, we come up with the idea of creating GUI toolkit: *HyperMind Builder*, which allows user to create *HyperMind Textbook* without any programming skills. According to our usability study, the among all participants (10 people), the understanding of our tool was average of 84 %. Also, we reference other GUI toolkit and came up with intuitive operations such as drag and drop operations. Against this operations, participants answered “The operation was straightforward” or “Operation was intuitive”. On the other hand, some participant answered: “drag and drop was a bit confusing”. We also analyze this result using *NASA-TLX* and find out that our tool needs improvements on *Mental Demand* and *Performance*. The possible solution is to add contents remove function or contents resizing function.

Keywords:

Educational Support, Reading, Interactive Document, Eye tracking, GUI toolkit

目次

1. 序論	1
2. 関連研究	4
2.1 眼球運動情報の取得方法	4
2.1.1 角膜反射法	4
2.1.2 眼球運動情報の計測デバイス	5
2.2 眼球運動情報による認知状態の推定	7
2.2.1 覚醒度推定	7
2.2.2 負荷推定	8
2.2.3 確信度推定	8
2.2.4 興味度推定	9
2.3 眼球運動情報と読書行動	10
2.3.1 読書行動検出について	10
2.3.2 万語計 (Wordometer) について	10
2.4 眼球運動情報を用いた媒体と読者のインタラクションの有用性	11
2.4.1 視線反応型エージェント: Gaze Tutor	11
2.4.2 用語訳表示システム: <i>iDict</i>	11
2.4.3 熟練者の読書行動模倣システム: Gray Shading 手法	12
3. <i>HyperMind</i> システム全体像	14
3.1 従来手法	14
3.1.1 <i>HyperMind Textbook</i> の作成: <i>Text 2.0 Framework</i>	14
3.1.2 <i>HyperMind Textbook</i> の利用: <i>HyperMind Reader</i>	15
3.1.3 本研究の立ち位置	15
3.2 提案システム: <i>HyperMind Builder</i> について	17
3.2.1 システム要件	17
3.2.2 システム構成	18
3.2.3 システムの利用手順	21

4. <i>HyperMind Builder</i> の評価実験	25
4.1 実験環境	25
4.2 評価手法	26
4.2.1 自由記述の質問	26
4.2.2 NASA-TLX について	26
5. 実験結果と考察	29
5.1 NASA-TLX の回答結果	29
5.2 自由記述の質問回答結果	31
5.3 評価結果の考察	32
6. 結論	34
謝辞	36
参考文献	38

図 目 次

1	眼球運動の計測用デバイス	5
2	<i>iDict</i> のシステム構成図	12
3	従来システムと提案システムのフロー比較図	16
4	<i>HyperMind Builder</i> のシステム構成要素	19
5	<i>HyperMind Builder</i> の利用フロー	23
6	<i>HyperMind Builder</i> の実用例	24
7	NASA-TLX の評価尺度の重み付け結果	30
8	NASA-TLX の重み平均と標準偏差の結果	30
9	<i>HyperMind Builder</i> の利用方法の理解度調査結果	31

表 目 次

1	眼球運動情報の計測デバイスの比較表	6
2	NASA-TLX の評価結果	29
3	NASA-TLX の重み平均と標準偏差	29

1. 序論

教育分野において読書は重要な役割を果たしている。平成 21 年の文部科学省の調査によると、集計対象となった児童生徒を 4 つの学力層に分類したところ、学力の高い児童の方がより読書に対して肯定的であり、平日の読書時間が多い傾向にあることがわかった [1]。また、Ama らの研究によると 1 ヶ月間初等教育の学生に読書を行わせた結果、実施前と比較して国語力の向上が確認された [2]。他にも、株式会社ベネッセホールディングスの調べによると、1 年 4 ヶ月における読書量と学力偏差値の変化を比較した結果、読書量の多かった児童は学力偏差値が平均で 1.9 ポイント向上したのに対し、読まなかった児童が 0.7 ポイント減少したことが報告されている [3]。特に興味深い結果として、数学の偏差値の向上が見られ、読解力の向上が数学においても非常に重要であることが検証から分かった。こうした読書量の増加が及ぼす正の影響を踏まえ、学力向上に向けた読書量の増加は教育分野で重要課題となっている。

また日本では、平成 32 年から実施される新学習指導要領（ICT 教育）に向けた読書媒体のデジタル化が進んでいる。特に平成 29 年 10 月に開催された中央教育審議会初等中等教育分科会において、紙の教科書を主教材としつつ、今後の ITC 教育の普及に伴ったデジタル教科書の併用を法律で容認した [4]。デジタル教科書の導入により、PC やタブレットの利用スキルを高める他に、政府は動画や音声読み上げなど、紙媒体では行えなかった学習方法による教育効果を期待している。しかし、我々は従来と同じ「一方的な情報の提供」による読書・学習方法であれば、デジタル化による教育効果の恩恵を最大化できないと懸念している。

読書が及ぼす学力向上と媒体のデジタル化を踏まえ、これからの教育機関で学習者（児童・生徒・学生）の読書量や学習効果を高めていくためには「媒体と読者が相互にインタラクション（情報共有）していくこと」が重要だと考える。なぜなら読書に求めるものは個人によって趣向が異なるからである。例えば、同じ文章を読んだ際に一方の学習者はより文章に対して詳細な情報を求めるのに対し、もう一方では過去の知識や経験からその文章を必要としない場合もある。こうした、「誰が」「何を」読むかによる提供すべき適切な情報量は変化する。しかし、現在の紙媒体は、ユーザの特性や読書中の認知状態を考慮することは出来ず、誰に

対しても同じ振る舞いをする静的な媒体となっている。我々は、これからのデジタル教科書は、様々なセンサを用いてユーザの認知状態を理解することができ、個人に応じて教科書がインタラクティブに振る舞い、現在よりも読書時における没入感や興味が上がり、読書量および学習効果の向上に繋がると考えている。

現在、人間のセンシング技術の発展は著しく、人間の認知状態推定が可能になってきている。特に、人の情報処理を妨げない非侵襲な計測方法として、リアルタイムでの眼球運動情報の取得が提案されている [5]。眼球運動情報は、学習者が読書媒体の「どこ」を見ているかを測定できることや、読書時の認知状態が取得できる [6][7]。こうした技術革新によって研究者の中では、すでに学習者ごとに個別に振る舞うインタラクティブな読書媒体を提供する手法は提案されている [8][9][10][11]。先行研究として、*Text 2.0 Framework* [12] と呼ばれる HTML や JavaScript を用いたフレームワークがある。*Text 2.0 Framework* は、ソフトウェア開発者が容易に読者の眼球運動（注視位置）情報をトリガーとしたインタラクティブな文章を各自作成することを可能とした。このように読書時の眼球運動情報を取得することによって教科書はユーザ依存の興味を向上させる媒体になっていくことが期待される。

学習者の眼球運動情報に基づくインタラクティブ性を有するデジタル教科書を、我々は *HyperMind Textbook* と名付けた。先行研究 [12] の課題としては、この *HyperMind Textbook* を作成する上で、プログラミングのスキルが必要となっていることである。そのため、教育の専門家（教師・教育研究者・出版社）が自らの講義の流れに沿って独自で作成するには、先行研究の *Text 2.0 Framework* を扱うためのプログラミング知識を身につけるか、ソフトウェア開発者に *HyperMind Textbook* の作成委託を行ういずれかの選択が求められる。教育の専門家が、プログラミングの基礎知識を身につける場合は、学習コストの高さやテキストの編集力が作成者のスキルに依存してしまい、自由な発想力を阻害してしまう可能性がある。一方で、ソフトウェア開発者との協力して *HyperMind Textbook* を作成する場合は、開発時間、やりとりの手間、専門家とソフトウェア開発者の間に起きるコミュニケーションロスが生じる。いずれの選択においても参入障壁が生じる。

本研究では、プログラミングスキルを必要とせず、誰もが *HyperMind Textbook*

を作成することのできる，GUI (Graphical User Interface) ツール：*HyperMind Builder* を実現するためのデザイン設計に焦点を当てる．そして，我々の設計のユーザビリティ評価を行うため，システムの実装と評価実験を行う．本ツールの提案により，教育の専門家が読書量を増加させ，学習効果を高めるための教科書作成のためのプラットフォームに繋がることを期待する．

本論文の構成は以下の通りである．まず，2章では，眼球運動情報を用いた関連研究について紹介する．次に，3章では，*HyperMind* システムの全体像を示す．また，4章で，*HyperMind Builder* の評価実験について述べる．5章では，評価実験の結果と考察を行う．最後に6章にて本論文の結論を述べる．

2. 関連研究

本章では、*HyperMind Textbook* の利用に際して、眼球運動情報に着目した背景となった関連研究を示す。具体的には、眼球運動情報の取得方法、認知状態の推定手法、読書行動における応用例、眼球運動情報を用いた媒体と読者のインタラクションの有用性について紹介する。

2.1 眼球運動情報の取得方法

本節では、眼球運動情報の取得方法について紹介する。眼球運動情報の取得方法は大きく分けて3種類存在する。

1. 特殊なコンタクトレンズを用いた接触的な測定手法
2. 眼電位に基づくウェアラブル型の測定手法
3. 光学技術（カメラ）を用いて、非接触な測定手法

これらの取得手法に対して、本研究は、学習者を対象とした持続的な計測を行うべく、「非侵襲」でかつ、インタラクションを行うために「教科書の文章のどこを見ているか」を取得することが可能な、光学的な技術による測定手法に着目する。

2.1.1 角膜反射法

光学技術を用いた眼球運動情報の測定において、角膜反射法（PCCR : Pupil Centre Corneal Reflection）がある [13]。角膜反射法を扱う際には、近赤外線LEDと眼球撮影用のカメラ（以降、アイトラッカ）の2種類が必要となる。仕組みとしては、始めに弱い近赤外線LEDを眼球に投射する。投射された赤外線LEDにより眼球内で光の反射パターンが生成される。その後、アイトラッカを用いて高解像度の眼球画像を取得する。撮影された眼球画像から目と光の反射パターンを検出する。最後に検出した眼球情報から瞳孔の中心位置とプルキニエ像を識別し、これらの位置関係から視線方向を識別する手法となっている。



ウェアラブル型



設置型

図 1 眼球運動の計測用デバイス

2.1.2 眼球運動情報の計測デバイス

図 1 に示すように、光学技術を用いた計測デバイスは大きく分けてウェアラブル型と設置型の 2 種類が存在する。

ウェアラブル型デバイスの例として、Pupil Labs¹によって開発された Pupil Headset がある。Pupil Headset は、アイトラッカと主観視点カメラを搭載したデバイスであり、ユーザの眼球の動きに加え、主観視点も同時取得が可能である。無償ソフトウェアによるデータの記録や開発用コードがオープンソースとして公開されており、ソフトウェア開発に適している。他にもトビー・テクノロジー株式会社²によって開発された Tobii Pro Glasses 2 はユーザの注視位置を取得できるほか、音声の記録や顔の傾きに関する情報も取得可能である。

設置型デバイスの例として、トビー・テクノロジー株式会社の Tobii Pro nano や Tobii Pro X3-120 が挙げられる。これらのデバイスは Windows PC に接続し、対応するソフトウェアをインストールすることで眼球運動情報の取得が可能となっている。具体的には、タイムスタンプ、視線位置、瞳孔位置の取得が可能で、必要なライセンスを登録することで瞳孔径の取得も可能となっている。その他に

¹<https://pupil-labs.com/>

²<https://www.tobiipro.com/>

表 1 眼球運動情報の計測デバイスの比較表

	メリット	デメリット
ウェアラブル型 デバイス	顔の向きに依存しない 移動時の計測が可能	装着への抵抗感 セットアップ時間が長い デバイス重量 バッテリーが必要
設置型 デバイス	抵抗感が少ない セットアップ時間が短い 利用環境の再現がしやすい バッテリーが不要	PC 画面外の視線計測ができない デバイスとの距離に制約がある

も、株式会社クレアクト³の FX3 や ゼロシーセブン株式会社⁴の EyeLink 1000 といったデバイスも存在する。

表 1 に、ウェアラブル型と設置型の利用メリットとデメリットを示す。ウェアラブル型デバイスの場合、利用範囲に制限がないため、通学や家庭内での利用に優れている。一方で、装着への抵抗感やセットアップ時間が掛かることなど利用者側への負担が大きい。設置型デバイスの場合、ユーザ側が準備することはなく、デバイスの設置環境に行くだけで利用できる。一方で、デバイスとの距離に制限があるため、利用者の学習時の行動に制限が掛かることがある。

³<https://www.creact.co.jp/>

⁴<http://0c7.co.jp/>

2.2 眼球運動情報による認知状態の推定

本節では、眼球運動情報に基づく認知状態の推定について述べる。今後、読書媒体がユーザの眼球運動情報を取得することで、どのような認知状態を理解し、学習支援を行えるのか、その可能性を示唆する。

2.2.1 覚醒度推定

Lowenstein らによると、覚醒度が低下していく際に、眼球の特徴として初期散瞳の時間が短くなり、頻度の高く振幅の大きい眼球振動が生じ、また停留が不安定になることが確認されている [14]。また、Rajkowski らによって行われた実験では、サルを用いた神経生理実験を行ない、覚醒度と密接に関係することが知られている延髄 locus coeruleus 核のニューロン活動が瞳孔径変化と強い相関を持つことが報告された [15]。そして、Wilhelm らによって眠気と瞳孔径ゆらぎの関係を Pupillary Unrest Index(PUI) を用いて評価し、主観的眠気と PUI の間に相関があることを見出している [16]。他にも、西山らによって乗り物運転中や危険作業中の眠気検出をモチベーションに健常者を対象とした覚醒水準の低下、ならびにその予兆を検出するための指標として瞳孔径ゆらぎの有効性について実験が行われた [17]。実験としては、参加者に単調なドライビングシミュレーション課題に取り組んでもらった結果、実験の中盤から後半にかけて強い眠気を感じた人と実験中に眠気を感じなかった人とを比較したところ、実験開始約 30 秒から 4 分間単調な縮瞳 (Gradual Miosis: GM) が見られ、その後低周波の大きなゆらぎ (Large Low Frequency Fluctuation : LLFF) が発生したことが報告された。これにより、眼球運動から眠気検知を行うことが示唆され、2017 年頃からは、民間企業による瞬目を用いた眠気制御技術も開発されている [18]。

これらの関連研究より「眼球運動情報」から「覚醒度」の推定が行えることが示唆されており、教育において、学習者に適切に休息を促すことや覚醒度の低い状態で読んでいた文章を復習する提案に繋がると期待できる。

2.2.2 負荷推定

Kanheman らによると、瞬間的な認知負荷に対し、人間は瞳孔径が拡大する傾向があることが報告されている [19]。また、Varazzani らによって、猿を用いた負荷の異なる 3 つのタスクを行った結果、青斑核におけるノルアドレナリンニューロンが活発的に放出しており、その際に瞳孔径の拡大も同時に観測された [20]。一方で、外的要因（音や光量）によって瞬間的な瞳孔拡張が起こることもわかっている [21]。そのため、Pichora らは散瞳した要因を理解することの難しさと重要性が主張している [22]。このように、認知負荷と瞳孔径には相関があると見られるが、外的因子がないかを考慮することが重要であると考えられる。

これらの関連研究より、「眼球運動情報」から「認知負荷」の推定が行えることが示唆されている。これによって、眼球運動情報を用いた、インタラクティブ教科書の利用によって、どの文章において補助コンテンツを追加するべきかが、利用者データの蓄積とともに明らかになると期待できる。

2.2.3 確信度推定

確信度とは、個人が物事を選択する際に記憶や経験から選択する主観確率のことを指す [23, 24]。確信度は主観的な評定であるため、その情報の選択の正しさとは異なる。特に Yamada らは、11 人の被験者に対して 80 問の 4 択問題を用意し、回答時の眼球の注視とサッカードを取得する実験を行なった。各問の回答後に「確信して答えた」か「確信しないで答えた」かの主観評価を収集した。「問題を解いている時間」や「選択した回答結果」を特徴量として確信度を予測するのに対し、「眼球運動情報」を含めた 2 値分類を行なった結果がもっとも予測値が高かった [25]。この時の眼球運動とは、fixation（目の短時間の停留）と saccade（fixation 間の瞬時の移動）から特徴量を抽出している。

これらの関連研究より、「眼球運動情報」から「確信度」の推定が行えることが示唆されている。これにより、復習すべき箇所や理解不足である部分の提案を行うことが可能となる。

2.2.4 興味度推定

Hess らによると種類の異なる画像（赤ちゃん、赤ちゃんと母親、男性のヌード、女性のヌード、景観）を見た際の実験参加者の瞳孔径の平均変動値を評価した。その結果、興味のある画像に対しては瞳孔径が拡大し、そうでないものに対しては収縮することが示されていた [26]。中森らは、Hess らの研究に対し、興味のある画像とそうでない画像の区別を研究者自らがラベル付けしている点と「興味」と「興奮」は異なる現象であることを指摘している [27]。具体的には、先行研究で行われた実験ではヌード写真による性的興奮の刺激を受け、交感神経活動が働き、瞳孔拡大に影響したと示している。実際に、中森らによる興味推定の研究では、異なる人と表情の顔画像を用意し、画像を見た際の興味度を 5 件法で検出した結果、眼球運動との間に相関が見られなかった。近年では、Soumy らが、ジャンルの異なる多様な記事（技術・政治・スポーツ・料理等）を用意し、13 人（男性：6、女性：7）の大学生（平均年齢：25、標準偏差：3）が 18 件の記事（平均文字数：555、標準偏差：70）を読んでいる際の眼球運動情報の取得による興味推定を行なった [28]。各記事を読み終えた後、興味度の正解データは 3 つの質問によって収集した。質問は実験参加者の主観評価（記事への興味度（4 段階評価）、記事への理解度（4 段階評価））および客観的指標（記事に関連する問題）とで構成されている。実験の結果、眼球運動情報のうち眼球追従速度、注視時間、回帰（文章を読み返す）速度が重要な特徴となっていることが報告された。

これらの関連研究より、「眼球運動情報」と「興味度」の推定が行えることが示唆されている。興味度の推定が行えることで、学習者にあった補助コンテンツの提供を行い、自発的に学習を促すこと（アクティブラーニング）に繋がることが期待できる。

2.3 眼球運動情報と読書行動

本節では、眼球運動情報の取得と読書行動に関する研究を紹介する。眼球運動情報からいつ読書を行なったか「読書行動を検出する」ことや文書内で「読んだ文字数を数える」ことが研究で行われてきている。

2.3.1 読書行動検出について

読書行動において眼球運動情報によって読者が「いつからいつまで読書行動を行っていたか」を検出することができる。具体的には、Ishimaru らの JINS MEME を用いた研究では、4つの行動（タイピング、食事、読書、対話）において、瞬きと頭の横の動きを特微量として識別率を出したところ、71 %の確率で識別できた。また、Google Glass を用いた研究では、頭の動きと瞬きの周波数を特微量として学習することで5つの行動（閲覧、読書、問題を解く、鋸で切る、対話）から読書行動を82 %の確率で識別することがわかった [29]。これらの関連研究より、眼球運動情報を用いて、生活行動のうち読書行動を認識することは可能であることが分かっている。

2.3.2 万語計（Wordometer）について

Kai らによって開発された万語計（Wordometer）は、読書時の眼球情報から何文字読まれたかをログとして記録するシステムとなっている [30][31]。仕組みとしては、横書きの文章の場合、各文字を見る右向きの短い目の動きを行なったのちに、改行のための長い左の目の動きが生じる。この特性を用いて語数を推定する手法となっている。特微量としては、fixation（目の短時間の停留）と saccade（fixation 間の瞬時の移動）が抽出され、support vector regression によって推定が行われている。実験では、400 語程度の文章において、概ね 6-14 %の誤差範囲で文字数のカウントが行えることが報告されている。ここから、眼球運動情報を用いて、読書における文字数記録を行えることがわかっている。

2.4 眼球運動情報を用いた媒体と読者のインタラクションの有用性

本節では、*HyperMind* システムの提案と実装にあたって、眼球運動情報に基づきユーザごとに情報がインタラクティブに変化する *HyperMind Textbook* の有用性を示唆する関連研究について紹介する。

2.4.1 視線反応型エージェント：Gaze Tutor

D'Mello らは、学習時に感じる飽きや注力の低下による、学習成績の低下に課題意識をおき、眼球運動情報に基づく学習エンゲージメント率の認識およびエージェントを用いた学習エンゲージメントの向上システムを実装と提案を行なった [9]。提案システムの利用シーンとしては、ユーザが学習時に注力を失っている際に、画面に表示されたエージェントに注目させ、ルールベースの対話を行うことでエンゲージメントを向上させる仕組みになっている。実験は、48 名（18-36 歳の女性 30 名、男性 18 名）の参加者で行われた。参加者には 4 種類の生物分野に関する記事を読み、その内の 2 種類の記事において眼球運動情報の取得を行なった。実験内容としては、各記事を読んだ後に、記事に関する問題を解答し、その後エンゲージメントに関する主観評価（6 段階）を取得する [32]。実験参加者のうち 16 人において、飽きやエンゲージメントの低下が確認されなかったため、エージェントを利用した 32 人に対してシステム評価を行なった。結果として、エンゲージメント率の向上に加え、記事に関わる多数決の問題を解かせた結果、システムを適応した問題が総合的に点数が高かった。ここから、眼球運動を用いたインタラクションによってエンゲージメントを向上し、また学習成果が向上することが確認されている。

2.4.2 用語訳表示システム：iDict

Hyrskykari は、眼球運動を用いて、母国語でない書物を読む際に、眼球運動を操作方法として、分からない単語の翻訳結果を表示するシステム：iDict を提案した [8]。このシステムの開発の背景には、母国語でない言語の書物を読む際に、分からない単語があるとその場で検索を行なったり、理解できないことによる集中

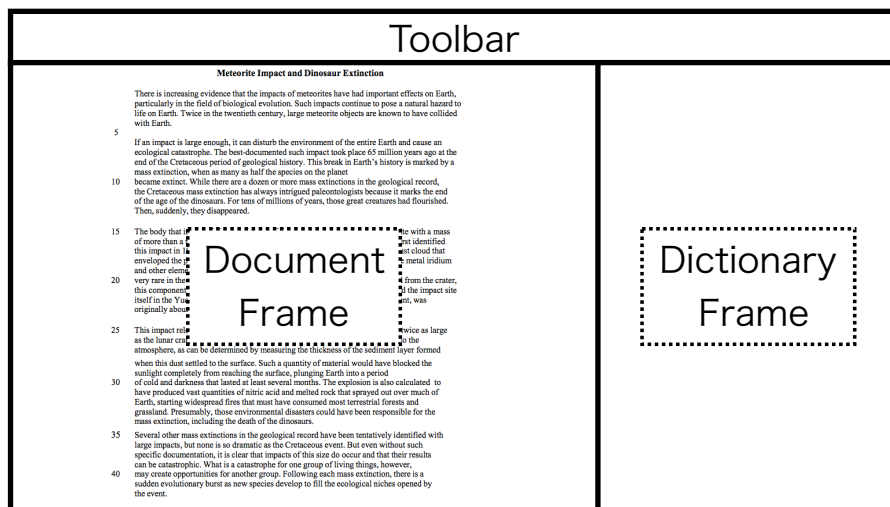


図 2 *iDict* のシステム構成図

妨害によって読書行動を阻害されることを解決する目的がある．図 2 のようにシステム構成は，大きく分けて *Document Frame* と *Dictionary Frame* の 2 つに分けられている．*Document Frame* 内に読書媒体を表示し，分からない単語があった際に，*Dictionary Frame* に視線を移すことで，その単語の意味を表示する仕組みとなっている．*iDict* の評価方法として，参加者 18 名（20-27 歳の男女 9 名ずつ）に対し，マウス操作，視線操作（*iDict*），マウス操作と視線操作（*iDict*）を用いた 3 種類システムの比較実験を行なった．その結果，目線操作による単語検索の精度は平均 86 % 表示し，誤動作は平均 0.7 % であった．また 3 種類の単語検索方法に対し操作性に関する順位を付けてもらった結果，8 名の実験参加者はマウスを高く評価したのに対し，残りの 10 名は *iDict* を含む操作方法を高く評価した．ここから，ユーザによって眼球運動情報による用語訳の表示が有用であることが報告された．

2.4.3 熟練者の読書行動模倣システム：Gray Shading 手法

Cheng らは，個人の学術誌に対する読書速度や理解度向上を目的として，読者の目線情報に基づく注視位置の制御システム：Gray Shading 手法を提案した [10]．

提案手法は、先生や読書の専門家といった読書を得意とする人の目線情報をあらかじめ模倣モデルとして生成し、読むべき箇所、タイミング、スピードを読者にも模倣させるものとなっている。模倣の方法としては、読むべき文章以外が薄い灰色の矩形で覆われているような方法となっている。実験において、学術分野の専門家の2名（35から45歳の間の男性と女性）を模倣モデルとして取り扱い、30名の学生（女性11名、男性19名、年齢は18から37歳）に対して実験を行なった。実験参加者のうち、15人にGray Shading手法を適応し、残りの15人は通常通りに読む。読解する文章は、SIGCHI archives から参照した4ページの学術論文を用いた。読解は、モニター型のディスプレイを用いて行われ、眼球計測には設置型デバイス（サンプリングレート60Hz）を用いて行われた。実験後に、実験参加者は論文に関する多肢選択問題を解く。問題の例としては「この論文の最大の貢献は何ですか？」といった質問が出題される。解答結果より、システムを適応したグループが利用しなかったグループに比べ、理解度の方が高いことが確認された。また、システムの利用者15人に、主観評価に基づき、システムを5段階評価（1=全く役に立たない、2=役に立たない、3=普通、4=役に立った、5=かなり役に立った）で評価したところ、実験参加者のうち8人がGray Shading手法を役に立ったと高く評価した。このように、読書の玄人を模倣モデルとしたインタラクションによって、個人の書籍に対する理解度の向上が確認され、また実験参加者の主観評価でも提案手法が有用であることも報告された。

3. *HyperMind* システム全体像

本章では、*HyperMind* システム全体像として、3.1 章にて *HyperMind Textbook* の作成と利用にあたって従来システムについて紹介し、3.2 章にて従来手法の課題解決手法として提案システムを示す。

3.1 従来手法

本節では、従来手法である *HyperMind Textbook* を作成するためのフレームワーク：*Text 2.0 Framework* と、*HyperMind Textbook* を読み込み、眼球運動によって動作させるためのアプリケーション：*HyperMind Reader* について紹介する。

3.1.1 *HyperMind Textbook* の作成：*Text 2.0 Framework*

本研究の提案ツールは、Biedert らによって、読者の眼球運動に対してリアルタイムに反応する文章 (gaze-responsive application) を作成するために *Text 2.0 Framework* は開発された [12]。フレームワークを用いて作成された文書のことを拡張文書 (augmented-text) といい、プラグインの入ったブラウザ内に拡張文書を読み込むことでマウスやキーボードによる動作イベントと同様に読者の眼球運動情報による動作が行われる。

Text 2.0 Framework を利用するには、HTML や JavaScript といった Web プログラミングの知識が必要となる。以下にサンプルを示す。

```
<html>
<head> Text 2.0 Framework を説明するためのサンプル </head>
<body>
  <div>
    <span onRead="eventHandler.playAudio('A.wav')"> 音楽を流す </span>
  </div>
</body>
```

上記のサンプルコードが示すように、デジタル文章（HTML）に対して、*onRead* のような「眼球運動情報に関連するクラス」と「インタラクションの中身（動画や音楽等の表示するコンテンツ）」を指定し、HTML ファイルに動的な機能追加を行っている。拡張文書は HTML 形式で出力される。

3.1.2 *HyperMind Textbook* の利用 : *HyperMind Reader*

Text 2.0 Framework によって作成した拡張文書は、Shoya らによって開発されたアプリケーション : *HyperMind Reader* [11] 上で利用する。*HyperMind Reader* は、視線情報取得に Tobii Pro を取り扱っており、windows OS 環境でアイトラッカの環境を構築したのちに、*HyperMind Reader* によりすぐに利用できる。コンテンツの表示タイミングは、読者の注視時間を入力とし、注視時間の閾値設定に対応して紐づけられた補助コンテンツを表示するようになっている。

3.1.3 本研究の立ち位置

先行研究では、*Text 2.0 Framework* と *HyperMind Reader* によって眼球運動情報に基づいて動作する拡張文章が作成、利用されてきた。まとめとして、図 3 に従来手法と提案手法とのシステムフローの比較を示す。本研究の貢献としては、*HyperMind Textbook* の作成手順である *Text 2.0 Framework* を代替するプログラミング技術を不要とした、*HyperMind Textbook* の作成用ツールである *HyperMind Builder* の開発を行うことである。*HyperMind Builder* によって作成された文書も、先行研究と同様に *HyperMind Reader* によって利用できるようにする。*HyperMind Builder* のシステム構成の詳細は 3.2 節に示す。

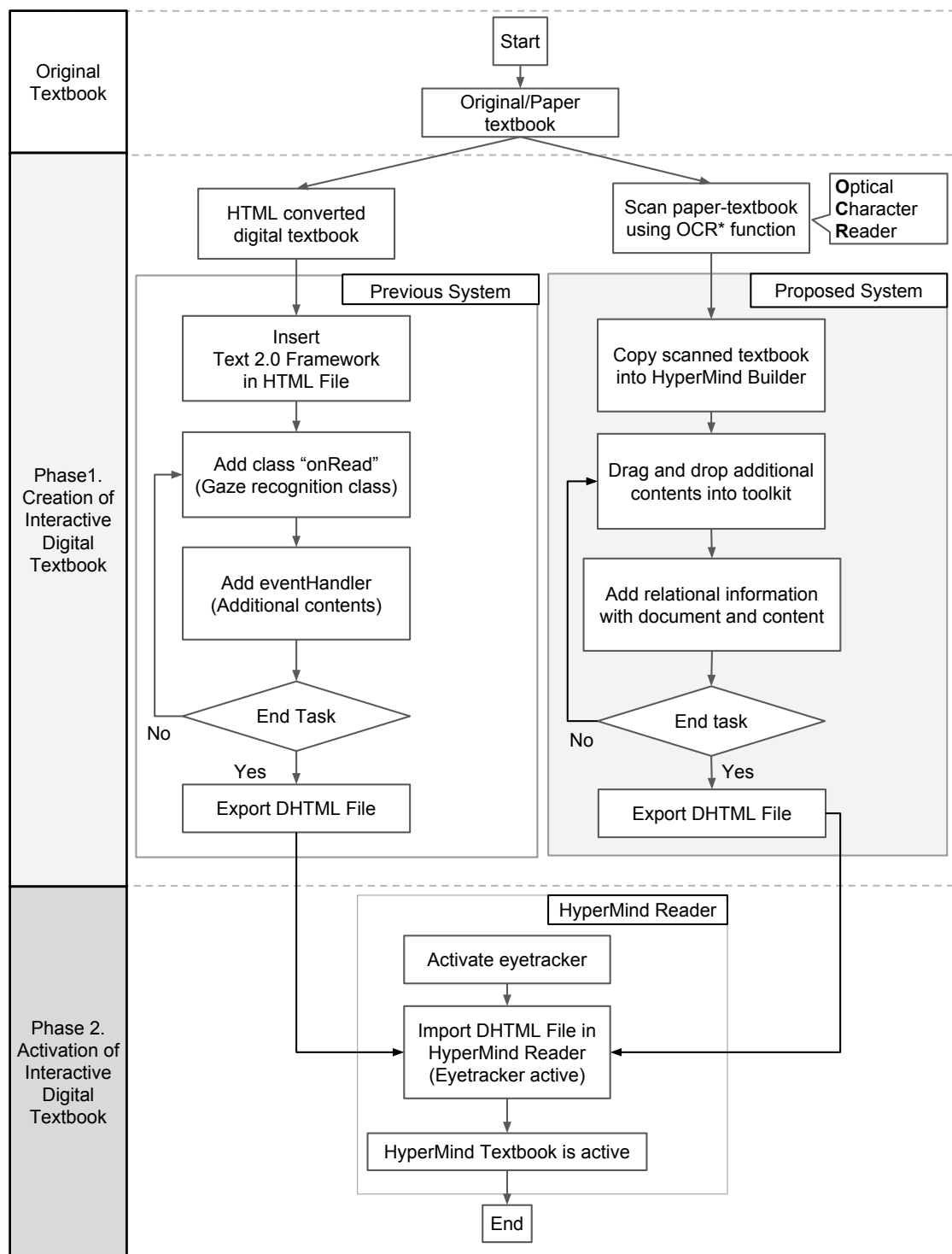


図 3 従来システムと提案システムのフロー比較図

3.2 提案システム：*HyperMind Builder* について

本節では、提案システムの開発にあたって、先行研究の課題を解決するために考慮したシステム要件、システム構成、そしてシステム利用手順を述べる。

3.2.1 システム要件

3.1.1 章にて示したように、先行研究である *Text 2.0 Framework* では、システムの利用にあたってプログラミングの知識が必要であることが、利用者を制限してしまっている課題がある。そこで、特に教育の専門家がインタラクティブ教科書を作成可能にするべく2つの要件を考慮する。

1つ目の要件課題が、誰でも利用できるツールにすること。先行研究である *Text 2.0 Framework* では、拡張文書（旧 *HyperMind Textbook*）の作成には一定のwebプログラミング技術（HTMLやJavaScript）の知識を必要とした。ソフトウェアプログラマ以外も利用可能なツールを調査し、調査結果を基に *HyperMind Builder* を実装する。

2つ目の要件課題が、直感的な操作を可能にすること。開発ツールが教育の専門家に普及していく中で継続的に利用してもらうには直感的な操作が重要である。ユーザビリティ評価実験を行うことで、提案システム（*HyperMind Builder*）の優位性と改善課題を明確にする。

システム要件を満たす上で、MIT Media Lab. によって開発された、*Scratch* を参考にした [33]。 *Scratch* は、ビジュアルプログラミング言語と呼ばれ、プログラミング初心者（特に幼児教育）のために、ゲーム感覚でプログラミングを学ぶGUIツールとなっている。 *Scratch* の主な操作機能は、ドラッグ、ドロップ、クリック、文字入力といった簡単な操作で行われ、プログラミングに求められる論理思考を鍛えることが出来る。 *Scratch* の操作機能を参考に、本提案システムである、 *HyperMind Builder* にも、ドラッグやドロップといった操作手法を取り扱う。

3.2.2 システム構成

本提案ツール *HyperMind Builder* のシステム構成を図 4 に示す．提案ツールの構成は，contents-container, center-container, sidebar-container, drawing-canvas といったブロック要素を配置している．各要素に関する詳細を下記に示す．

contents-container

contents-container は補助コンテンツを保存するための要素となっている．ローカルから補助コンテンツをブロック上にドラッグオーバーすると，青色の矩形範囲が表示され，ドロップ操作により補助コンテンツがツール内で保存される．保存された補助コンテンツは羅列され，追加した全ての補助コンテンツを確認することが出来る．

center-container

center-container は文章を編集するための要素となっている．エディタには商用利用可能な Quill ⁵エディタを採用しており，編集は Quill で利用可能な機能の範囲内なら全て扱える．*HyperMind Textbook* に拡張したい文書を貼り付けることでデジタル文書の編集が行える．

sidebar-container

sidebar-container は，補助コンテンツの表示箇所を選択するための要素になっている．center-container の両サイドに配置されている．contents-container 内の補助コンテンツをドラッグアンドドロップイベントで sidebar-container 上に移動させることで登録した補助コンテンツを表示箇所に配置できる．

drawing-canvas

drawing-canvas は，sidebar-container に配置した補助コンテンツと center-container 内の文書とを関連づけるためのブロック要素となっている．sidebar-container に配置した補助コンテンツを指定するまで表示されず，アプリケーション上では非表示状態となっている．canvas 要素である drawing-canvas は，文章の位置と範囲を取得し，記録する文章と補助コンテンツのリレーショナル情報を保存するために用いられる．

⁵<https://quilljs.com/>

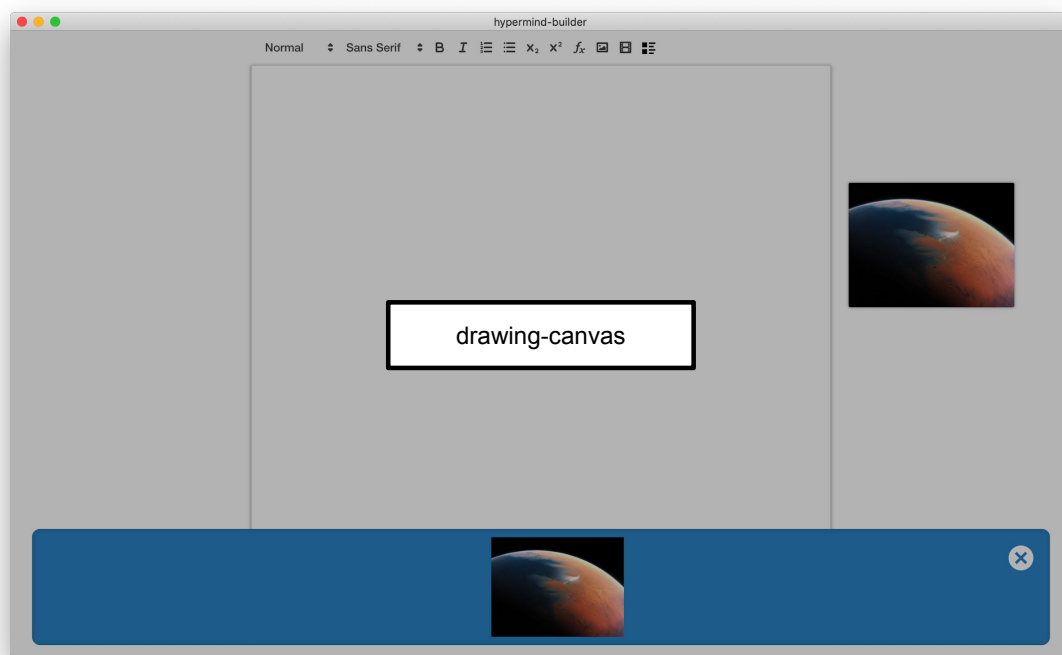
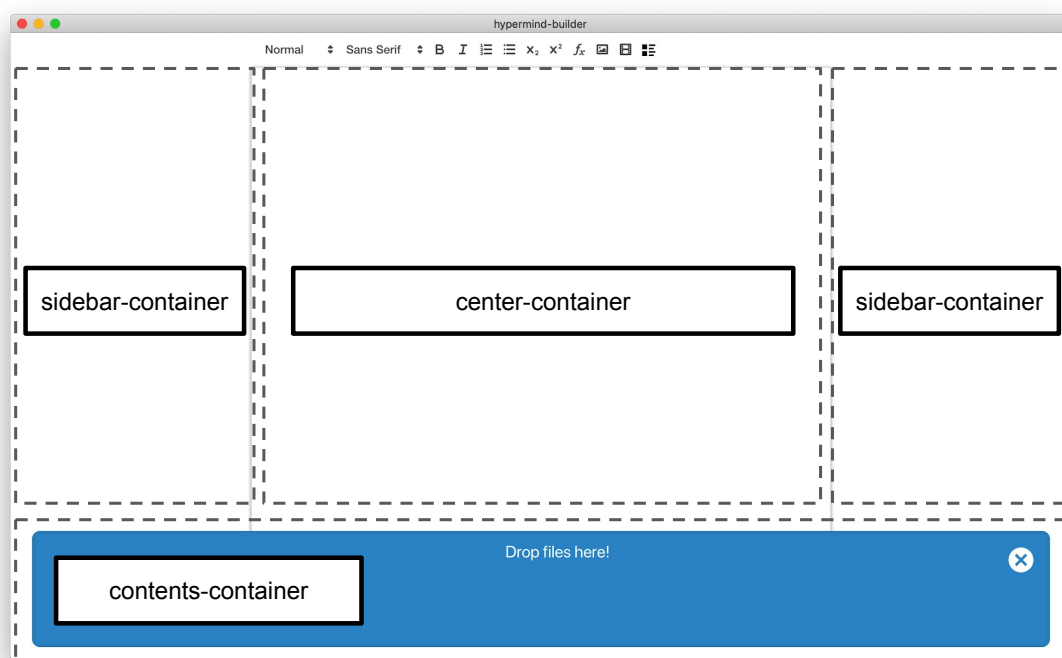


図 4 *HyperMind Builder* のシステム構成要素

提案システムの構成設計に関して「眼球運動を考慮した補助コンテンツの配置に関する UI」を意識した。注視している文章に対して補助コンテンツを文章上を覆うように表示すると、元々読んでいた文章を隠してしまい、補助コンテンツを見ないという選択肢が読者側から省かれてしまう。そこで、一般的な教科書は 1 ページあたり 1 か 2 カラムになっていることを考慮し、中央の文章に対し両サイドに補助コンテンツを埋め込むためのサイドバーコンテナを設けることで、カラム数に応じて左右のどちら側にも表示することを可能にした。これにより *HyperMind Textbook* の利用者側が直感的に補助コンテンツを置くところを決めることができる。また、利用者が文書を読んでいる際に、注視している文章に対して画面の各サイドに補助コンテンツが表示されることで利用者の注意を引くことができ、自然と補助コンテンツを注視させれる。そして、*HyperMind Textbook* を読み込んだ先行ツール：*HyperMind Reader* において、補助コンテンツを注視した際にプログレスバーが表示される仕様になっている。これによりマウス操作を不要とし、注視により動的補助コンテンツの再生が始まることで、直感的に分かるような操作方法として工夫している。

3.2.3 システムの利用手順

HyperMind Builder の利用フローを図 5 に示し，実際にツールを利用した際の具体例を図 6 に示す．以下に利用手順の詳細および出力する *HyperMind Textbook* のデータ構造の管理内容を示す．

手順 1：デジタル文書の貼付

HyperMind Builder 内の center-container にデジタル文書を貼り付ける．

手順 2：デジタル文書の編集

center-container 内に貼付したデジタル文書を編集する．

手順 3：学習補助コンテンツの用意

手順 2 にて編集したデジタル文書に対して，利用者の考える適切な学習補助コンテンツ（音声や動画）をローカル上に用意する．

手順 4：学習補助コンテンツを *HyperMind Builder* に登録

ローカル上に用意した補助コンテンツを contents-container 上にドラッグドロップすることでデータ内に補助コンテンツを保存する．

手順 5：学習補助コンテンツを表示位置に配置

登録された学習補助コンテンツを左右のどちらかの sidebar-container にドラッグドロップで配置する．

手順 6：学習補助コンテンツの選択

sidebar-container のコンテンツ表示位置に配置した補助コンテンツをクリックし，選択する．補助コンテンツのクリックが確認されると，ツール画面全体に drawing-canvas が表示される．drawing-canvas は canvas タグであり，図形を描画できる要素である．

手順 7：学習補助コンテンツと紐づける文書範囲選択

canvas が表示されたのを確認し，center-container のデジタル文章において手順 6 でクリックした補助コンテンツに紐づけたい文章を矩形選択する．

手順 8 : HTML ファイルを出力する

補助コンテンツをさらに追加する場合は手順 4 から 7 を再び行う。コンテンツの追加後は、ツールバー内の “File/Export for HyperMind Reader” をクリックして DHTML ファイル (*HyperMind Textbook*) を出力する。

上記の手順で作成された *HyperMind Textbook* のデータ構造としては、まず center-container, sidebar-container, そして drawing-canvas が保存される。手順 1 と 2 で貼付および編集されたデジタル文書は center-container 内に保存され、手順 5 で sidebar-container に配置した学習コンテンツは sidebar-container 内の絶対座標からの位置が保存される。手順 7 で選択した矩形範囲は canvas 上に保存され、矩形の座標はツール全体 (global-container) の絶対座標からの距離で保存される。canvas 上に矩形範囲が指定された際に、手順 6 にて選択された sidebar-container 内の補助コンテンツにクラスを付加することでコンテンツを非表示 (visibility:hidden) にする。作成された *HyperMind Textbook* は先行研究である *HyperMind Reader* [11] で読み込まれ、視線情報に基づきコンテンツが表示 (visibility:visible) となる。

まとめとして、*HyperMind Builder* によって作成される *HyperMind Textbook* は、画面中央の center-container 要素内に貼付した文章、center-container の両サイドに配置された sidebar-container 内に配置した補助コンテンツとその絶対座標、画面全体を覆う canvas を用いて選択した矩形範囲の絶対座標といった情報を HTML 形式のファイルとして保存、出力している。

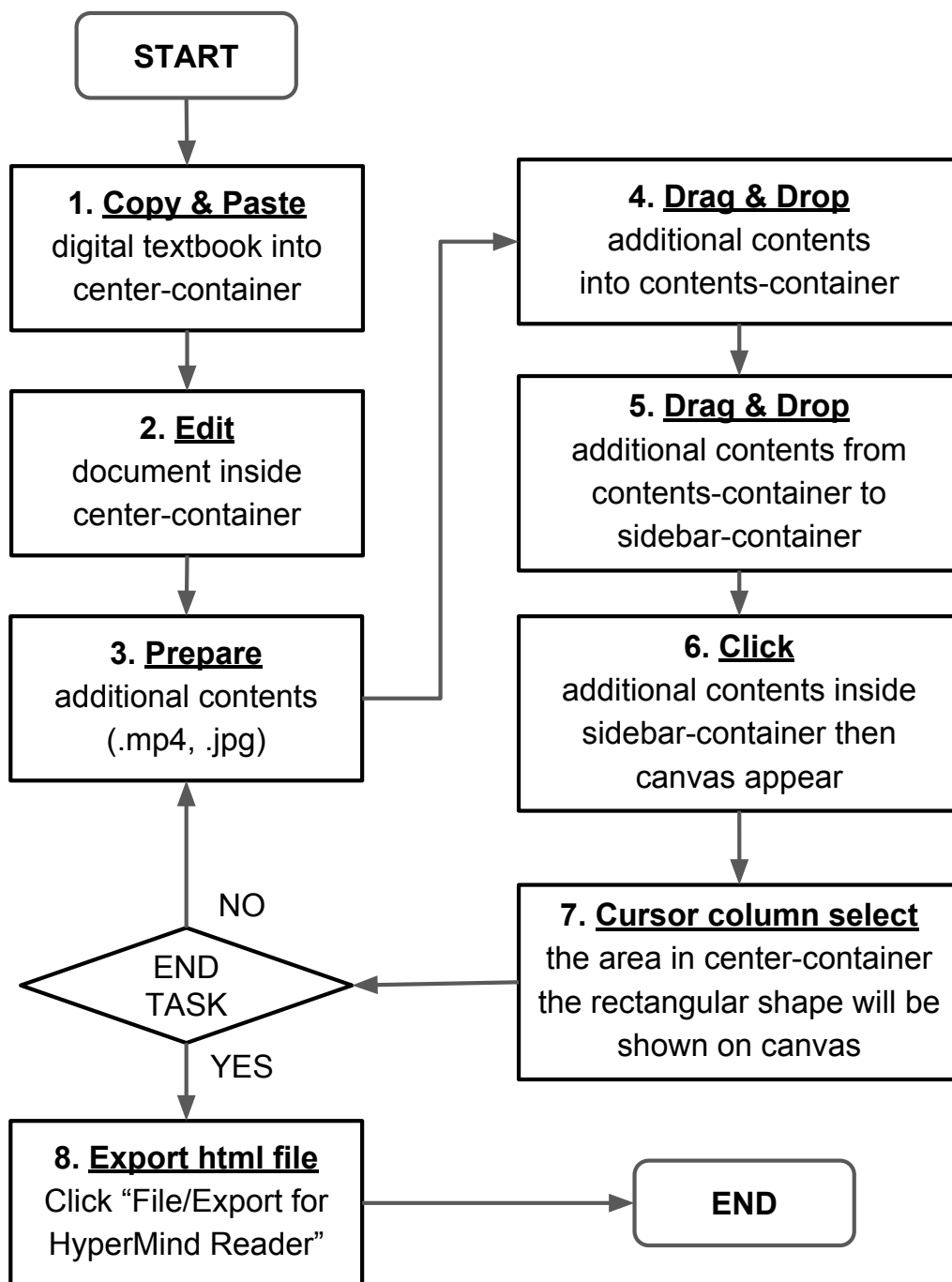


図 5 *HyperMind Builder* の利用フロー

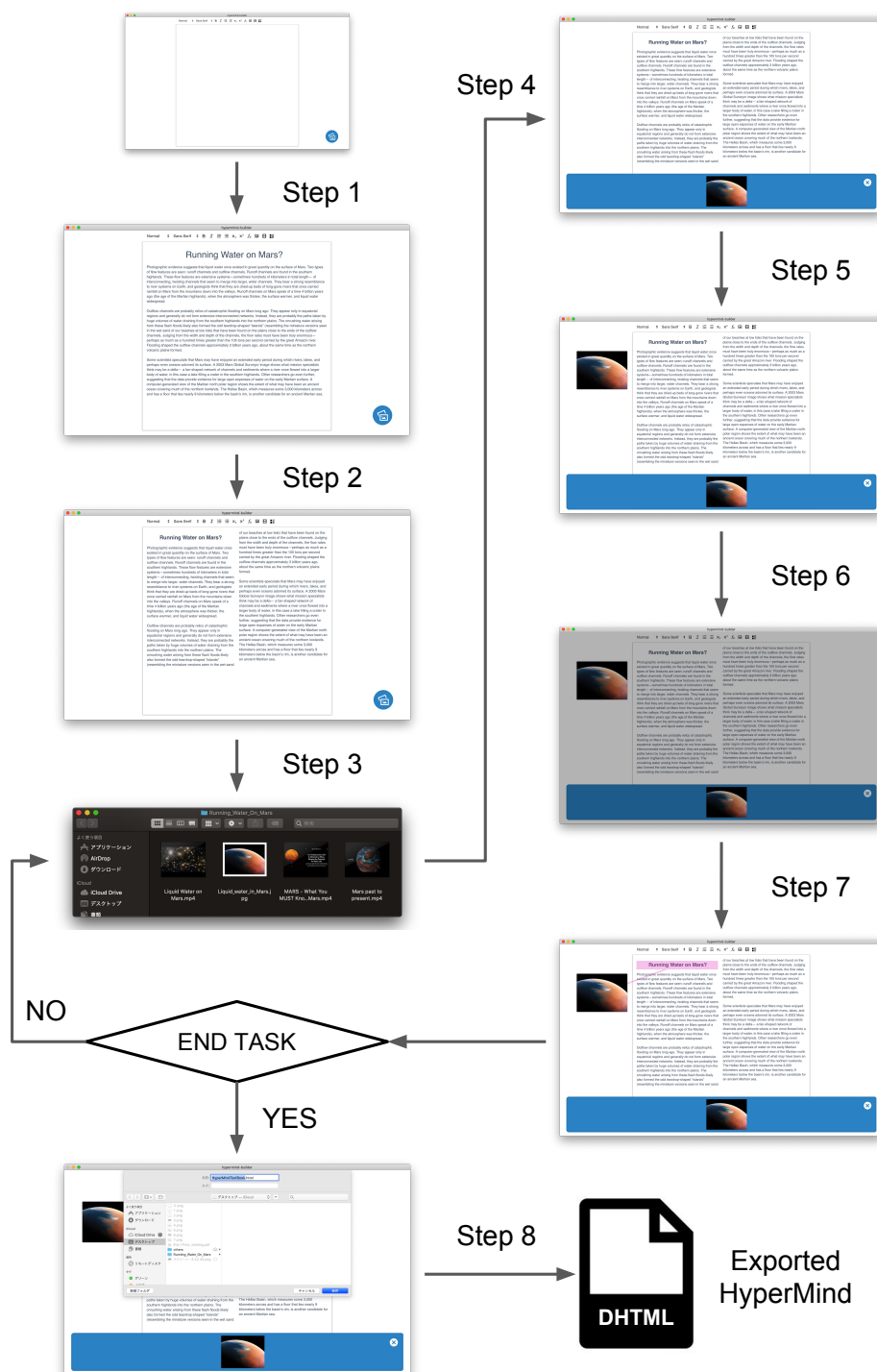


図 6 *HyperMind Builder* の実用例

4. *HyperMind Builder* の評価実験

本章では、提案ツール：*HyperMind Builder* の評価実験について述べる．本研究は、3.2 章で示した提案ツール：*HyperMind Builder* のユーザビリティ評価実験に焦点を当てる．

4.1 実験環境

実験は、20 - 29 歳の大学生 10 名（男性 7 名，女性 3 名）を対象に行なった．対象者の選択基準としては、*Text 2.0* やインタラクティブ教科書の概念を知らない人を対象にした．これにより *Text 2.0* に関する事前知識がない人からの *HyperMind Builder* に対する評価を得られるため、直感的な操作性であるか、また分かりにくい部分が、どの機能であるかを調査することができる．

タスクは 2 人 1 組みのペアで行なう．実験開始前にはツールの使い方を説明し、その後下記の 4 つのタスクを実験参加者はおこなった．

1. GUI を用いた *HyperMind Textbook* の作成
2. ツールに関するアンケートに答える
3. ペアの実験参加者によって作成された *HyperMind Textbook* を読む
4. *HyperMind Textbook* に関連する選択問題を解答する

本実験では、GUI の使いやすさの調査を軸に置き、有用性の評価には軸を置いていないため、創造性を確かめるようなタスクであるサンプル文章や補助コンテンツ（動画や画像）の検索は独自では行わない．事前に用意したサンプル文章と文中に関連する補助コンテンツを用意し、*HyperMind Builder* を利用してもらう形を採用した．*HyperMind Builder* のユーザビリティ評価の手法としてアンケートを用意し、ツールの利用後に解答してもらった．他にも、サンプル文章の関連問題（4 択問題）を用意することで作成者の文章への理解度や取り組み度合いの向上を図った．サンプル文章の正答率は、本研究において有用性の評価が目的ではないため評価対象としない．

4.2 評価手法

本章では、*HyperMind Builder* に関する自由記述の質問とユーザビリティの評価指標である NASA-TLX について示す。

4.2.1 自由記述の質問

本実験では、ユーザビリティ評価に関する3つの質問を用意した。

1. *HyperMind Builder* を理解し、利用できましたか？
2. *HyperMind Builder* の使いやすさはどうでしたか？
3. *HyperMind Builder* に付け加える必要のある機能はありますか？

質問(1)の目的としては、提案システム：*HyperMind Builder* を用いた *HyperMind Textbook* の作成が簡易であるかを確認するため、0 - 100 %の評価尺度で評価した。質問(2)の目的としては、ユーザビリティに関して NASA-TLX で得た結果を深掘りする目的で質問をした。質問(3)の目的としては、ツールの使いやすさに対して、どのような機能が不足しているかを実際にツールを利用した参加者に聞くことで有力なフィードバックを得ることを期待した。

4.2.2 NASA-TLX について

NASA-TLX [34] はタスク時に掛かる作業負荷の要因を可視化するために開発された評価手法である。評価尺度は6つあり、**Mental Demand**, **Physical Demand**, **Temporal Demand**, **Performance**, **Effort**, **Frustration** となっている。以降6つの評価尺度を略称で示す (*MD* : Mental Demand, *PD* : Physical Demand, *TD* : Temporal Demand, *P* : Performance, *E* : Effort, *F* : Frustration)。各評価尺度に関する詳細を以下に示す。

MD（精神的な要求）

どのくらい作業に対して精神的・知覚的な活動が求められたかを示している。判定基準としては、タスクの求める要求が多いことや内容が複雑に感じた場合は負荷が大きい方を選択する。

PD（身体的な要求）

どのくらい身体的な活動を要したかを示している。判定基準としては、タスクに求められる活動量が多く感じた場合は負荷が大きい方を選択する。

TD（時間的な要求）

タスクの進行具合や進行速度に関して時間的圧迫感を感じたかを示している。判定基準としては、時間に追われ急いで作業を行なった場合は負荷が大きい方を選択する。

P（作業成績）

目標に対してどの程度自分が実現できたか、満足したかを示している。判定基準としては与えられたタスクに対して、ほとんど再現ができなかった場合は負荷が大きい方を選択する。

E（努力）

要求されたタスクにどのくらい強く取組んだかを示している。判定基準としては作業を行う際に自分なりに工夫を多く強いられた場合は負荷が大きい方を選択する。

F（不満）

タスクを行なっている際に、イライラ、ストレス感、満足やリラックスを感じたかを示している。判定基準としてはタスク時にイライラを感じていた場合は負荷が大きい方を選択する。

評価指標の選定方法としては、1 - 11（中央値 6）の 11 段階評価を行なった。NASA-TLX は、主観評価で回答を行うため、各被験者ごとに評価尺度が異なる。そこで、提案システムの利用時に及ぼす、6 つの評価尺度に重み付け（正規化）する事で結果の評価を行う。

具体的な重みの計算方法として、 x_i を各要素 ($x_1 = \text{MD}$, $x_2 = \text{PD}$, $x_3 = \text{TD}$, $x_4 = \text{P}$, $x_5 = \text{E}$, $x_6 = \text{F}$) とし、各要素の重みを X_i とすると、個人における MD にかかる重みは、 $i=1$ の時であるため以下の数式となる。

$$X_1 = \frac{x_1}{\sum_{i=1}^6 x_i} \quad (1)$$

その他の 5 つの評価尺度も同様の計算式で算出する。この重み付け評価は各被験者ごとの要素の負荷の大小順位を求めるのに用いる。つまり、6 つの要素の内、より重みの大きかったものが、各実験参加者にとってツールやタスクに改善してほしいと感じている要素となっている。

5. 実験結果と考察

本章では、*HyperMind Builder* のユーザビリティの調査の評価結果と調査結果に基づく考察を述べる。

5.1 NASA-TLX の回答結果

表 2 に、実験参加者の NASA-TLX の評価結果を示す。各評価軸（*MD*, *PD*, *TD*, *P*, *E*, *F*）における生データ（raw）と式 (1) に基づいて導出した重み付け評価結果（weight）を示す。また、実験参加者全体の重みの計算の平均値（ave）と標準偏差（std）を示す。図 7 は、各被験者ごとに重み評価をグラフ化したものとなっている。また、表 2 の NASA-TLX の重み評価の平均と標準偏差をグラフ化したものを図 8 に示す。

表 2 NASA-TLX の評価結果

Subject	MD		PD		TD		P		E		F	
	raw	weight	raw	weight	raw	weight	raw	weight	raw	weight	raw	weight
1	4	0.308	1	0.077	1	0.077	1	0.077	4	0.308	2	0.154
2	7	0.259	2	0.074	6	0.222	2	0.074	7	0.259	3	0.111
3	9	0.257	4	0.114	6	0.171	4	0.114	8	0.229	4	0.114
4	4	0.125	5	0.156	6	0.188	4	0.125	7	0.219	6	0.188
5	6	0.200	5	0.167	7	0.233	3	0.100	5	0.167	4	0.133
6	6	0.231	1	0.038	6	0.231	3	0.115	7	0.269	3	0.115
7	1	0.091	1	0.091	1	0.091	5	0.455	1	0.091	2	0.182
8	6	0.194	5	0.161	2	0.065	6	0.194	7	0.226	5	0.161
9	2	0.105	1	0.053	2	0.105	9	0.474	3	0.158	2	0.105
10	7	0.179	5	0.128	8	0.205	6	0.154	6	0.154	7	0.179

表 3 NASA-TLX の重み平均と標準偏差

	MD	PD	TD	P	E	F
ave	0.195	0.106	0.159	0.189	0.208	0.144
std	0.032	0.065	0.150	0.067	0.046	0.072

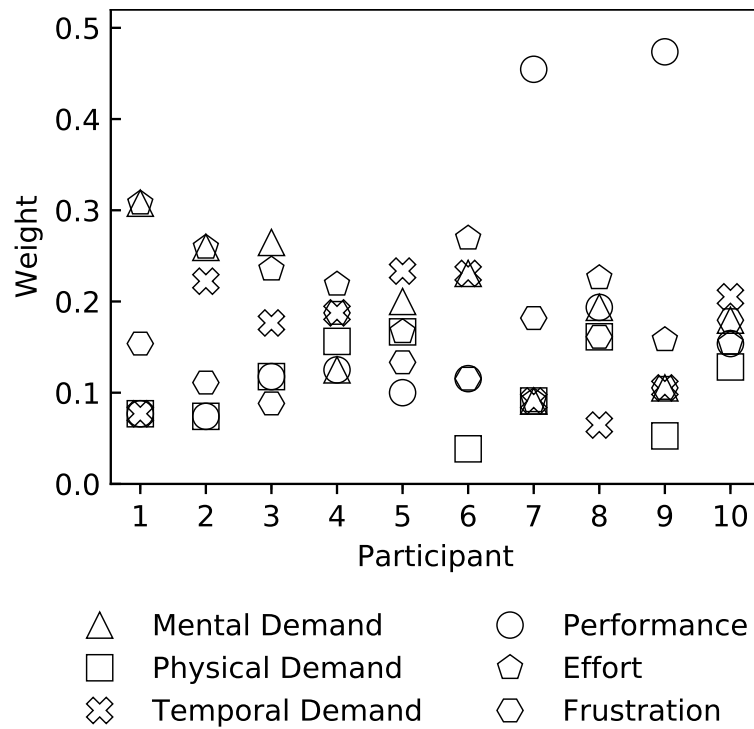


図 7 NASA-TLX の評価尺度の重み付け結果

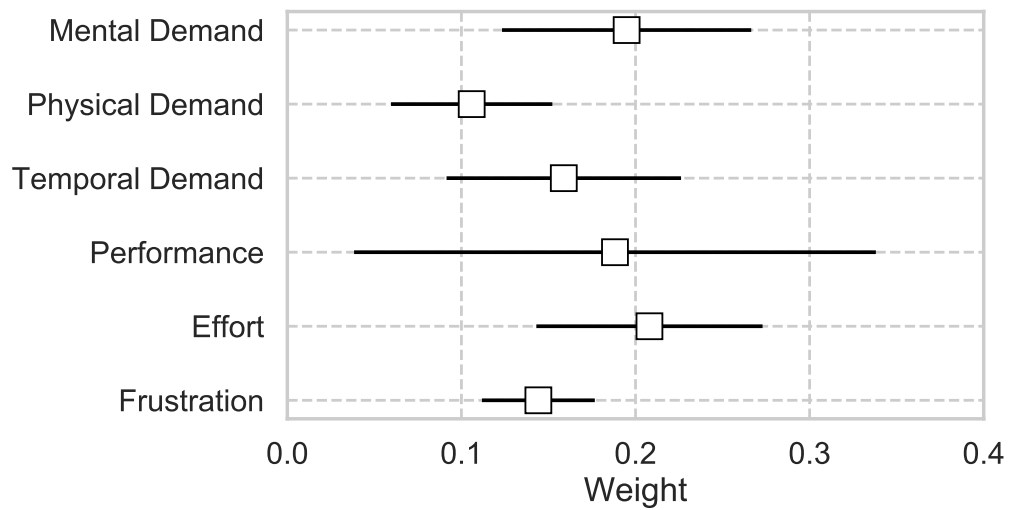


図 8 NASA-TLX の重み平均と標準偏差の結果

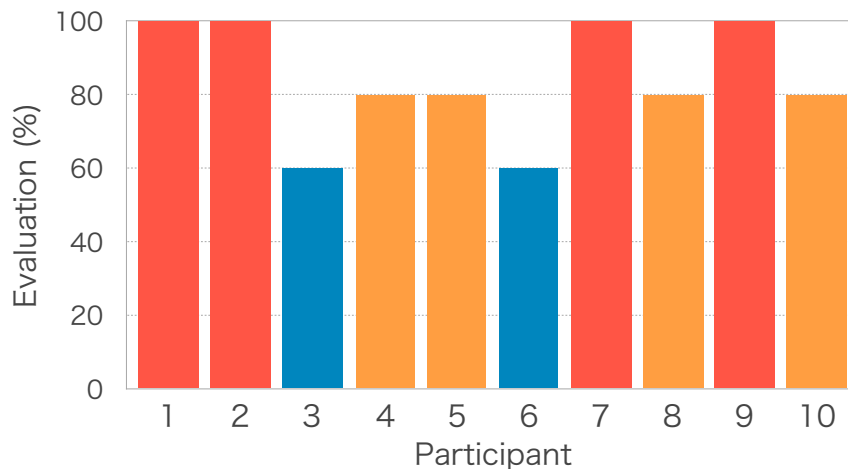


図 9 *HyperMind Builder* の利用方法の理解度調査結果

5.2 自由記述の質問回答結果

4.2.1 章に示した質問 1 の「*HyperMind Builder* を理解し、利用できましたか？」に対し、図 9 に各実験参加者の回答結果を示す。質問 2 の「*HyperMind Builder* の使いやすさはどうでしたか？」の回答結果としては、

- 作成工程は直截的で簡単。
- 直感的な操作で使いやすいツールだった。

という意見を得た一方で、

- システムのコンセプトの理解が難しかった。
- ドラッグとドロップ機能が分かりにくかった。

という意見を得た。質問 3 の「*HyperMind Builder* に付け加える必要のある機能はありますか？」に対しての回答結果としては、

- 画像の調整機能があると嬉しい。
- 画像の表示パターンを選択したい。

といった意見を得た。

5.3 評価結果の考察

提案システムのユーザビリティ評価実験の考察の流れとして、2つの研究課題（課題1：誰でも利用できるツールであること，課題2：直感的な操作を可能にすること）の各課題に関して，実験参加者の回答結果を元に考察を行う．また最後に評価結果から得られた全体的な提案ツールの改善案を考察する．

まず，課題1について評価結果を元に考察する．ツールの利用方法に対する実験参加者全体の理解度は，図9より全体として $84 \pm 16\%$ であった．また，実験参加者10人中4人はツールに対する理解度を100%と評価していることから，一定数のユーザに対して，*HyperMind Builder* が課題1を満たしたことが分かる．一方で，参加者10人中2人がツールの利用方法に関する理解度を60%と回答した．課題1が全てのユーザに対して満たされるようにするために，実験参加者間の理解度の差分要因を考察していく．差分要因の評価手法としては，各実験参加者のNASA-TLXの回答結果を参考にする．図9より，ツールに対しての理解度が低かった実験参加者3と6に着目する．実験参加者3と6において，図7に示したNASA-TLXの結果を参照すると，両者において6つのパラメータのうち，負荷の大きいものはそれぞれ被験者3と6に共通して，*MD*（精神的負荷），*E*（努力），*TD*（時間的要求）であった．これに対し，ツールの利用に対する高い理解度を示した実験参加者1，7，9は，*TD*（時間的要求）の負荷が低かった．ここから，本提案システムの理解度を高めていく上で，*TD*（時間的要求）の改善が1つ課題となることが考えられる．改善案を考察する上で，質問2の「提案ツールの使いやすさはどうでしたか？」に対する実験参加者6の回答を参照すると「画像のリムーブ機能がなかったため，操作に手間取った」という評価を得た．提案システムの利用に対する理解度の低さにおいて，*TD*（時間的要求）において負荷が大きくなった要因としては，ツールの操作性の自由度の低さが要因となっていると考える．そこで，提案システムの今後の改善案としては，「リムーブ機能」の追加による，操作性方法の選択を増やすことが挙げられる．しかし，全体的な評価として，我々のGUIツールは，実験参加者から「操作に難しさはなかった」という意見や「快適な操作方法である」といった好意見を得ることが出来たため，最初のプロトタイプとして，課題1の解決に貢献できたと考える．

次に課題2について、実験の評価結果を元に考察する。直感的な操作を行うために、本提案システムでは3.2.1章に示したように、GUIツールを参考にドラッグドロップやクリックといった操作方法を採用した。この操作手法に対し、実験参加者7は「ツールによる作成工程は直截的で簡単」と評価し、また実験参加者9は「ツールは直感的な操作で使いやすかった」と操作性に対し好意的な評価をした。一方で、実験参加者6から「ドラッグとドロップ機能が分かりにくかった」という操作手法に対しての反対意見も得た。そこで、好意的な評価を行なった実験参加者7と9に対し、操作性が難しいと評価した実験参加者6を比較したところ、図9から、直感的な操作性を評価した実験参加者7と9がシステムの利用方法に対しての理解度が100%であったのに対して、実験参加者6の理解度が60%であることが分かった。ここから、ユーザのシステムへの理解度が直感的な操作の評価に繋がると考えられる。他には、図7の結果を参考にすると、直感的な操作性ではないと評価した実験参加者6はE（努力）に最も負荷を感じたのに対し、操作性に好意的だった実験参加者7と9はP（作業成績）に負荷を感じた。どちらの実験参加者も操作機能について、質問3の「提案ツールに付け加える必要のある機能はありますか？」において、補助コンテンツの「リムーブ機能」や「リサイズ機能」などの機能追加を求めている。実験参加者6は、操作機能の不備によるE（努力）の負荷が大きく、実験参加者7と9はP（作業成績）を最大限にするためことが出来なかったために操作機能を追加希望をしていると考えられる。

結果全体の評価としては、図8より、実験参加者の平均としてはE（努力）、MD（精神的要求）、P（作業成績）、TD（時間的要求）、F（不満）、PD（肉体的負荷）の順番でツールの改善が求められていることが分かった。課題2の考察から、今後の展望として、直感的な操作を実現する上で、「リムーブ機能」や「リサイズ機能」といった更なる操作機能の追加によってE（努力）やP（作業成績）の評価改善が期待できる。

6. 結論

本論文では、眼球運動情報を用いたインタラクティブ教科書 (*HyperMind Textbook*) を作成するソフトウェアツールの提案、実装を行なった。眼球運動情報は、ウェアラブル型と設置型のデバイスが存在し、学習環境に合わせて適切なデバイスによる情報の取得が可能となっている。関連研究より、眼球運動情報による人間の認知状態の取得が可能であることが分かっており、読書行動においては「読書行動検知」や「文字数カウント」が行えることも分かっている。また、眼球運動に基づく媒体と読者のインタラクションの有用性も分かっている。

HyperMind Textbook を作成するための先行研究のツール : *Text2.0 Framework* では、プログラミングスキルを必要であり、教育の専門家 (教師・教育研究者・出版社) が自らの講義の流れに沿って独自に開発することが難しかった。そこで GUI ツールである : *HyperMind Builder* の提案と実装を行なった。提案システムの実現に向けて、課題 1 : 誰でも利用できるツールであること、課題 2 : 直感的な操作を可能にするものの 2 つを要件課題として設けた。要件課題の達成度合いを確認するために、実験参加者 10 人を対象に *HyperMind Builder* のユーザビリティ評価を行なった。

課題 1 に対し、「*HyperMind Builder* を理解し、利用できましたか？」という質問を行なった結果、実験参加者の全体評価としてシステムの利用方法への理解度は $84 \pm 16 \%$ であることを確認し、また実験参加者から「操作に難しさはなかった」という意見や「快適な操作方法である」といった意見を得ることができ、最初のプロトタイプとして、課題 1 の解決に貢献できた。

課題 2 においては、GUI の関連ツールを参考に、ドラッグ、ドロップ、クリックといった簡易操作を提案システムにも導入した結果、「ツールによる作成工程は直截的で簡単」や「直感的な操作で使いやすかった」との回答が得られた。一方で「ドラッグとドロップ機能が分かりにくかった」という、提案システムの操作手法に対する反対意見も得た。ツールの機能課題を発見する評価指標として NASA-TLX を用いた結果、MD (精神的負荷) や P (作業成績) において改善の必要があることが分かり、改善案として、ユーザの自由回答から、補助コンテンツの「リムーブ機能」や「リサイズ機能」など、新たな機能追加がツール改善

の上で必要であることが分かった。

今後の展望としては、*HyperMind Builder* によって情報を提供するタイミング（学習者の認知状態）をツールの利用者が自由に選択することを可能にし、*HyperMind Textbook* 作成するプラットフォームを用意する。実際に、情報分野以外の教育分野の専門家によって独自の学習コンテンツを用意し、新たな学習効果の高い教科書の開発のための研究ツールとして役立っていくことを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，安本慶一教授には，様々なご指導及びご指摘をいただきました．また，学生が研究をしやすいよう研究室の環境を整えてくださり，伸び伸びと研究できたことを心より感謝申し上げます．

藤川和利教授には，ご多用にも関わらず，論文審査委員を務めてくださり，心より感謝申し上げます．最終口頭発表の際には本稿の記述に関してご指摘とご質問を多く頂き，初稿と比較して最終稿では完成度を高めることが出来ました．本当にありがとうございました．

荒川豊准教授には，留学先や渡航費等のアドバイス，実際にドイツ留学先であるドイツ人工知能研究所（DFKI）に繋げて下さり，僕の学生時代の一番の目標だった海外留学に繋げてくださり，感謝してもしきれません，心より感謝申し上げます．また，研究アイデア，必要経費の支援，やってみたい研究に対しての惜しまぬ支援に大変伸び伸びとやってみたいことに挑戦することが出来ました．

Andreas Dengel 教授（ドイツ人工知能研究所）には，留学を快く引き受けてくださり，本研究を行うことに繋がりました．研究所では，自由に伸び伸びと研究ができ，また広いスペースでの作業ができ，最高の環境で研究を行えました．多くの経験やサポートに，心より感謝申し上げます．

石丸翔也様（ドイツ人工知能研究所）には，研究内容のブラッシュアップ，技術面でのアドバイス，留学における生活全般の支援，全ての経験に感謝しております．本研究の内容は，ドイツの研究所に行かなければ挑戦出来なかった研究だと思っています．ここまで，自分からやりたいと思えた研究に出会えたこと，提案して下さったこと，心より感謝申し上げます．

諏訪博彦助教には，ふとした時に様々なアイデアを投げかけてくださり，こんな研究も面白いなど，常々研究意欲を高めてくださりました．また，不意にいつも何とかなるよ，と声を掛けてくださることも心の余裕に繋がりました．モチベーションの維持や士気を高めて下さったこと，心より感謝申し上げます

藤本まなと助教には，研究室でよく声を掛けてくださり，快く相談に乗ってくださりましたこと，心より感謝申し上げます．ドイツと日本のリモートでの論文執筆や代打での登壇発表等，留学を背景に多々ご迷惑をお掛けしたことがあります

した。そんな中でも、いつも気にするなと声を掛けてくださり、すごく救われて
ました。心より感謝申し上げます。

水本旭洋（前）特任助教には、研究面や技術面で多くのアイデア交換をしまし
た。私が留学している際に、ユビキタスコンピューティングシステム研究室の元
留学生であるアルベルトと共にイタリアのトレント大学を案内して下さり、留
学の充実度を高めてくださりました。心から感謝申し上げます。

金岡恵事務補佐員，山内奈緒事務補佐員，尾川恵理事務補佐員，南あずさ事務
補佐員には、諸々の書類の手続きを進めてくださり、研究生活を支えていただき
ました。謹んでお礼申し上げます。

最後に、ユビキタスコンピューティングシステム研究室で共に研究室生活を過
ごした同期・先輩・後輩の皆様には深く感謝しております。特に、後輩の大坪敦
くんには、アプリ開発や共著論文執筆等、様々な面で大変助けられました。心よ
り感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 文部科学省. 読書活動と学力・学習状況調査の関係に関する調査研究.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shotou/045/shiryo/attach/_icsFiles/afieldfile/2011/03/02/1302195_01.pdf, 2011 年.
- [2] Todd J. Kumler Ama Baafrā Abeberese and Leigh L. Linden. Improving reading skills by encouraging children to read in school: A randomized evaluation of the sa aklat sisikat reading program in the philippines. *Journal of Human Resources* 49.3, 2014.
- [3] 株式会社ベネッセホールディングス. 小学生の読書に関する実態調査・研究. <https://berd.benesse.jp/special/bigdata/ebookanalysis.php>, 2018 年.
- [4] 文部科学省. デジタル教科書の制度化について. http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/kyoukasho/gaiyou/04060901/1349317.htm, 2017.
- [5] 大野健彦. 視線から何がわかるか. 認知科学, Vol. 9, No. 4, pp. 565–579, 2002.
- [6] Kai Kunze, Susana Sanchez, Tilman Dingler, Olivier Augereau, Koichi Kise, Masahiko Inami, and Terada Tsutomu. The augmented narrative: toward estimating reader engagement. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, pp. 163–164. ACM, 2015.
- [7] Shoya Ishimaru, Soumy Jacob, Apurba Roy, Syed Saqib Bukhari, Carina Heisel, Nicolas Großmann, Michael Thees, Jochen Kuhn, and Andreas Dengel. Cognitive state measurement on learning materials by utilizing eye tracker and thermal camera. In *Proceedings of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition*, Vol. 8, pp. 32–36. IEEE, 2017.

- [8] Aulikki Hyrskykari. *Eyes in attentive interfaces: Experiences from creating iDict, a gaze-aware reading aid*. Tampere University Press, 2006.
- [9] Sidney D’Mello, Andrew Olney, Claire Williams, and Patrick Hays. Gaze tutor: A gaze-reactive intelligent tutoring system. *International Journal of human-computer studies*, Vol. 70, No. 5, pp. 377–398, 2012.
- [10] Shiwei Cheng, Zhiqiang Sun, Lingyun Sun, Kirsten Yee, and Anind K Dey. Gaze-based annotations for reading comprehension. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1569–1572. ACM, 2015.
- [11] Shoya Ishimaru, Syed Saqib Bukhari, Carina Heisel, Nicolas Großmann, Pascal Klein, Jochen Kuhn, and Andreas Dengel. Augmented learning on anticipating textbooks with eye tracking. In *Positive Learning in the Age of Information*, pp. 387–398. Springer, 2018.
- [12] Ralf Biedert, Georg Buscher, Sven Schwarz, Manuel Möller, Andreas Dengel, and Thomas Lottermann. The text 2.0 framework: writing web-based gaze-controlled realtime applications quickly and easily. In *Proceedings of the 2010 workshop on Eye gaze in intelligent human machine interaction*, pp. 114–117. ACM, 2010.
- [13] トビー・テクノロジー株式会社. Tobii pro アイトラッカーの仕組み. <https://www.tobiipro.com/ja/service-support/learning-center/eye-tracking-essentials/how-do-tobii-eye-trackers-work/>, 2019.
- [14] Otto Lowenstein, Richard Feinberg, and Irene E Loewenfeld. Pupillary movements during acute and chronic fatigue: A new test for the objective evaluation of tiredness. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 138–157, 1963.
- [15] J Rajkowski. Correlations between locus coeruleus (lc) neural activity, pupil

- diameter and behavior in monkey support a role of lc in attention. *Soc. Neurosc., Abstract, Washington, DC, 1993*, 1993.
- [16] Holger Lüdtke, Barbara Wilhelm, Martin Adler, Frank Schaeffel, and Helmut Wilhelm. Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves. *Vision research*, Vol. 38, No. 19, pp. 2889–2896, 1998.
 - [17] 西山潤平, 谷田公二, 楠見昌司, 平田豊. 瞳孔ゆらぎを指標とした覚醒度状態評価. 生体医工学, Vol. 46, No. 2, pp. 212–217, 2008.
 - [18] パナソニック株式会社. 眠気を検知・予測し、快適に覚醒状態を維持させる眠気制御技術を開発. <https://news.panasonic.com/jp/press/data/2017/07/jn170727-1/jn170727-1.html#010>, 2017 年.
 - [19] Daniel Kahneman. *Attention and effort*, Vol. 1063. Citeseer, 1973.
 - [20] Chiara Varazzani, Aurore San-Galli, Sophie Gilardeau, and Sebastien Bouret. Noradrenaline and dopamine neurons in the reward/effort trade-off: a direct electrophysiological comparison in behaving monkeys. *Journal of Neuroscience*, Vol. 35, No. 20, pp. 7866–7877, 2015.
 - [21] Hsin-I Liao, Shunsuke Kidani, Makoto Yoneya, Makio Kashino, and Shigeto Furukawa. Correspondences among pupillary dilation response, subjective salience of sounds, and loudness. *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 23, No. 2, pp. 412–425, 2016.
 - [22] M Kathleen Pichora-Fuller, Sophia E Kramer, Mark A Eckert, Brent Edwards, Benjamin WY Hornsby, Larry E Humes, Ulrike Lemke, Thomas Lunner, Mohan Matthen, Carol L Mackersie, et al. Hearing impairment and cognitive energy: The framework for understanding effortful listening (fuel). *Ear and Hearing*, Vol. 37, pp. 5S–27S, 2016.
 - [23] 高野陽太郎. 記憶. 認知心理学 2, 1995.

- [24] 楠見孝. 機能的推論と批判的思考. 思考, Vol. 2, , 1996.
- [25] Kento Yamada, Olivier Augereau, and Koichi Kise. Estimation of confidence based on eye gaze: an application to multiple-choice questions. In *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp'17)*, pp. 217–220. ACM, September 2017.
- [26] Eckhard H Hess and James M Polt. Pupil size as related to interest value of visual stimuli. *Science*, Vol. 132, No. 3423, pp. 349–350, 1960.
- [27] 中森志穂, 水谷奈那美, 山中敏正. 顔画像に対する好みは, 瞳孔径にどう反映されるのか. 日本感性工学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 321–326, 2011.
- [28] Soumy Jacob, Syed Saqib Bukhari, Shoya Ishimaru, and Andreas Dengel. Gaze-based interest detection on newspaper articles. In *Proceedings of the 7th Workshop on Pervasive Eye Tracking and Mobile Eye-Based Interaction*, p. 4. ACM, 2018.
- [29] Shoya Ishimaru, Kai Kunze, Koichi Kise, Jens Weppner, Andreas Dengel, Paul Lukowicz, and Andreas Bulling. In the blink of an eye: combining head motion and eye blink frequency for activity recognition with google glass. In *Proceedings of the 5th augmented human international conference*, p. 15. ACM, 2014.
- [30] Kai Kunze, Katsutoshi Masai, Masahiko Inami, Ömer Sacakli, Marcus Liwicki, Andreas Dengel, Shoya Ishimaru, and Koichi Kise. Quantifying reading habits: counting how many words you read. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 87–96. ACM, 2015.

- [31] Olivier Augereau, Charles Lima Sanches, Koichi Kise, and Kai Kunze. Wordometer systems for everyday life. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 4, p. 123, 2018.
- [32] James A Russell, Anna Weiss, and Gerald A Mendelsohn. Affect grid: a single-item scale of pleasure and arousal. *Journal of personality and social psychology*, Vol. 57, No. 3, p. 493, 1989.
- [33] Mitchel Resnick, John Maloney, Andrés Monroy-Hernández, Natalie Rusk, Evelyn Eastmond, Karen Brennan, Amon Millner, Eric Rosenbaum, Jay Silver, Brian Silverman, et al. Scratch: programming for all. *Communications of the ACM*, Vol. 52, No. 11, pp. 60–67, 2009.
- [34] Sandra G Hart. Nasa task load index (tlx). volume 1.0; computerized version. 1986.