

インタラクティブなデジタル教科書の作成用ツール HyperMind Builderの開発および評価

渡邊 洸^{1,a)} 石丸 翔也^{2,b)} 荒川 豊^{1,c)}

概要：教育の情報化に伴い、日本では読書媒体が紙からデジタルへとシフトチェンジしてきている。読書媒体のデジタル化に伴い学習支援コンテンツは静的なものから動画や音声といった動的なものに変化していく流れである。しかし学習効率を高める上で、動画や音声の一方的な提供ではなく、読者の状態を理解し、読書媒体と学習者が相互にインタラクトしていくことが重要である。本研究では、今後の ICT 教育の発展に伴い、一般化されていくデジタル教科書が読者と相互にインタラクションできるような教科書を作成するための GUI ツール：HyperMind Builder を開発した。これにより教育の専門家が学習者の読書による学習効果の高めるためのデジタル教科書の作成が可能になり、今後の教育分野の発展に繋がると考える。

1. はじめに

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であることがわかった [1]。また、Ama らの研究によると児童に 1 ヶ月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、読書の多かった児童は平均で 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]。このように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て、紙の教科書を主として使用しつつ、デジタル教科書を併用することが法律で容認される流れとなった [4]。これにより政府はデジタル教科書の導入により、動画・アニメーションや音声読み上げなど、従来の紙媒体では行えなかった学習効果を期待している。しかし我々は、従来の紙の教科書からデジタル教科書に移行したとしても

従来と同じ方法による読書・学習方法であれば、より大きな学習効果は生まれ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、今後学習者 (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ユーザ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振る舞いを考慮することは出来ず、誰に対しても同じ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状態を推定することができ、個人に応じて教科書がインタラクティブに振舞うことができ、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、人間の行動認識技術の発展は著しく、リアルタイムで読者の視線情報取得が容易になっている [5], [6]。こうした技術革新によって研究者の中ではよりユーザ依存でインタラクティブな読書媒体を提供する方法が提案された [7]。更には Text 2.0 [8] と呼ばれる HTML や JavaScript を用いたフレームワークが開発され、簡易にソフトウェア開発者が読者の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の開発が可能になった。このように読書時の眼球情報を取得することによって教科書はユーザひとりひとりの興味に寄り添った媒体になっていくことが期待される。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² ドイツ人工知能研究センター (DFKI)

a) watanabe.ko.we2@is.naist.jp

b) shoya.ishimaru@dfki.de

c) ara@is.naist.jp

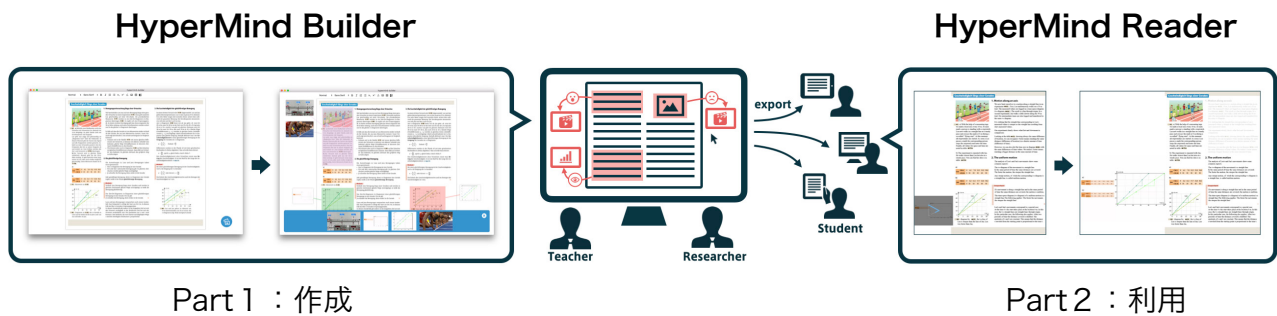


図 1 システムの全体ワークフロー．Part1 にて教育関係者（教師・教育研究者・出版社）がインタラクティブ教科書を作成する．Part2 にて作成されたインタラクティブ教科書を目線情報（読者の注視箇所）を元にユーザ個人に応じた補足コンテンツの表示を行う．

我々は、インタラクティブな教科書の学習効果より引き出していくには教育の専門家（先生，出版者，教育研究者）の協力が必要だと考えている．なぜなら，学習者の効果的な学習プロセスや読書方法を研究しているからである．しかし，彼らが自分たちの考える学習効率の高めるインタラクティブな教科書を創造するにはソフトウェア開発者の協力が必然である．このような場合，インタラクティブ教科書の開発に掛かる時間，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障壁となる．

本研究では，誰もがプログラミングスキルを持つ必要がなく，インタラクティブな教科書を作成することのできる GUI（Graphical User Interface）インターフェースである *HyperMind Builder* を提案する．このツールをきっかけに，教育分野の専門家が読書量を増加させるためのアイデアを反映することのできるプラットフォームの提供になることを期待する．本論文では，開発にあたって参考にした関連研究，インタラクティブなデジタル教科書を学習者が利用するまでの全体ワークフロー，提案ツールである *HyperMind Builder* の詳細，ツールのユーザビリティ評価実験，評価結果とその考察，そして最後に今後の課題を示す．

2. 関連研究

ここでは，インタラクティブ教科書の重要性，直感的な操作を行うための参考ツール，先行研究である *Text 2.0* [8] に関して下記で示す．

2.1 インタラクティブな教科書の重要性

Cheng らは，個人の読書速度や理解度向上を目的として，読書時の目線情報に基づく文章のグレイシェイディング手法を提案した [9]．手法の詳細としては先生や読書の専門家などから読書時の目線情報をあらかじめ模倣モデルとして収集し，読むべき箇所，タイミング，スピードを読者に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形である．この手法により個人の書籍への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有益だったと報告されている．ここからインタラクティブに読書を支援することの重要性が分かる．

2.2 直感的な操作を行うための参考ツール

プログラミング知識のない人々が扱えるようなツールとしてビジュアルプログラミング言語である *Scratch* [10] が例として挙げられる．*Scratch* はプログラミングの思考プロセスやコンセプトを学ぶためのオープンソースの環境であり，視覚的なオブジェクト（矩形や円）でコーディングのプロセスを学ぶことができる．そのため，初心者への参入ハードルを下げ，誰にでもプログラミングを始めるきっかけとして広く利用されている．

2.3 Text2.0

Biedert らによって，インタラクティブな教科書作成するためのフレームワークが開発された．これは，デジタル化された文章（HTML）に対して，HTML タグ内にユーザの視線情報を発火要素として加えることでダイナミック HTML にすることのできるフレームワークである．

具体的な追加方法としては，タグ内に *onFixation*，*onGazeOver*，*onRead* など視線情報に基づくクラスと，その際に行うインタラクション（音楽・動画・画像の再生）を指定することで動作を行う条件を定めれる．視線情報の収集方法としては Tobii Pro などのアイトラッカを利用して目線を収集することで利用可能となっている．このようにプログラマにとって簡易に視線情報を用いたインタラクティブなデジタル教科書が用意に作れる．

3. システム全体の流れ

図 1 にインタラクティブ教科書を利用するまでの全体の流れを示す．システムは大きく分けて 2 つのパートに分かれる．1 つ目は，それぞれのユーザに対して動的に変化する「インタラクティブな教科書を作成する部分： *HyperMind Builder* [11]」，2 つ目は作成された教科書を「読者の目線

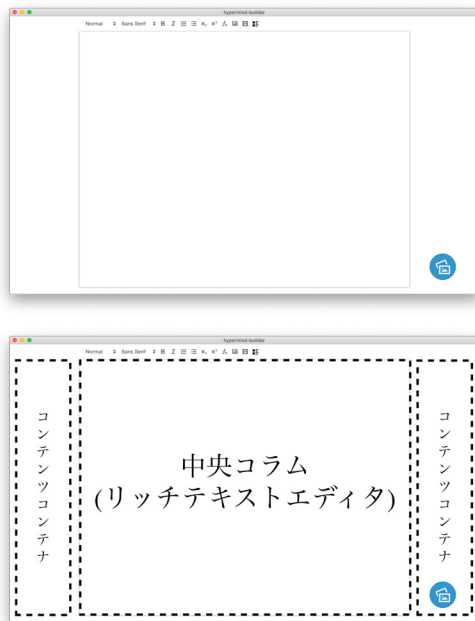


図 2 HyperMind Builder の構成

情報を元に動的に動かす部分: *HyperMind Reader* [12] となっている。

3.1 インタラクティブな教科書の作成

本研究で開発したツール: *HyperMind Builder* を利用し, インタラクティブ教科書を作成する。作成された教科書はアイトラッカが使用可能な環境で利用される。

3.2 インタラクティブな教科書の利用

Shoya らによって開発された *HyperMind Reader* [12] によって, *HyperMind Builder* で作成されたインタラクティブ教科書を利用できるようになる。補助コンテンツを表示する流れとしては, 読者の注視時間が閾値よりも長い場合にコンテンツを表示する仕様になっている。補助コンテンツの埋め込み手順に関しては, 4 章にて詳細を示す。この仕様は様々なセンサやアルゴリズムを組み込むことによって, 将来的には表示に様々なルール (興味, 理解度, 認知負荷など) に応じた表示方法にすることも可能ある。

4. 提案システム: HyperMind Builder

本研究は, 教育者向けにプログラミングスキル不要で, インタラクティブ教科書を作成できるようにすることである。つまり, 直感的なインタラクションのみでインタラクティブ教科書の作成を可能とするような GUI ツール: *HyperMind Builder* の開発を目指した。ツールは ELECTRON^{*1}を用いて開発したデスクトップアプリケーションとなっている。

^{*1} <https://electronjs.org/>

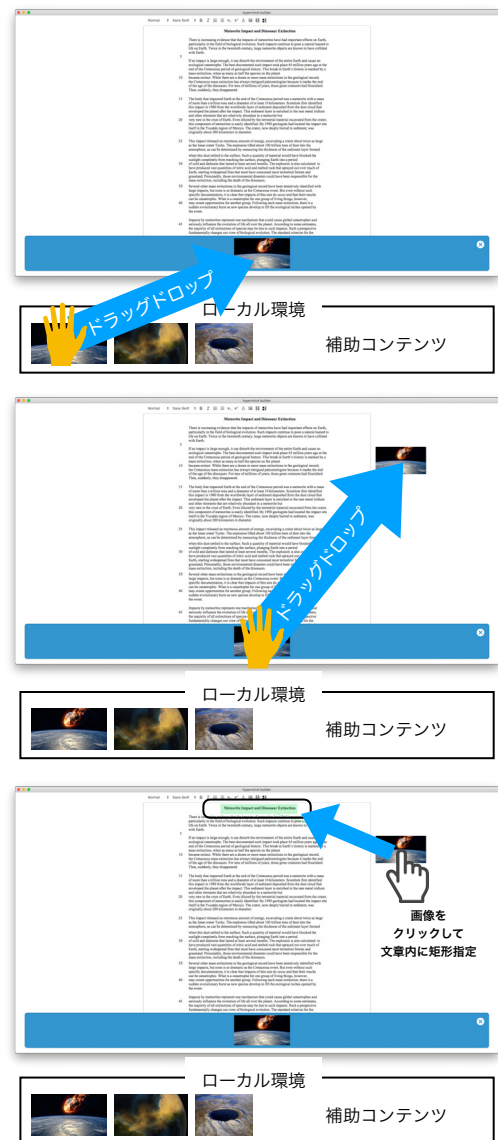


図 3 HyperMind Builder の利用手順

4.1 HyperMind Builder の構成

図 2 に *HyperMind Builder* の構成および作成手順を示す。ツール画面は大きく分けて 3 コラムに分かれている。中央のコラムはリッチテキストエディタとなっており, デジタル教科書を直接貼り付けて文章を書き加えたり, フォントスタイルを編集することが可能になっている。両サイドのコラムはコンテンツコンテナとなっている。コンテンツコンテナは補助コンテンツを置くためのコラムとなっている。コンテンツコンテナを左右両側に用意することで, 補助コンテンツを文章のどの部分にでも配置できるため, 直感的な操作になることを期待した。

4.2 HyperMind Builder の利用手順

図 3 にシステムの利用手順を示す。エディタ内の文章に関連する補助コンテンツを教育関係者がローカルから GUI にドラッグドロップで配置する。補助コンテンツの配置

後、補助コンテンツをクリックし、作成者はエディタの文章に矩形範囲指定を行う。その後、選択した補助コンテンツと矩形範囲は紐づけられる。インタラクティブ教科書の作成後、ファイルはHTML形式で出力され、HyperMind Reader [12] で読み込むことで視線情報を元に動的にインタラクトする教科書となる。このように、我々のシステムは文章の編集、補助コンテンツのドラッグドロップ、文章と補助コンテンツを紐付けるためのクリックイベントのみを扱い、プログラミングを不要とした直感的なツールとなった。

5. 評価実験

本研究は、Text 2.0 [8] の発展であるため、有用性の評価ではなく、開発した GUI のユーザビリティの評価を行った。以下に実験環境と評価指標を示す。

5.1 実験環境

20 - 29 歳の大学生 10 名（男性 7 名、女性 3 名）を対象に実験を行った。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。これにより作成に必要な事前知識がない人の評価結果を得られるため、より操作は直感的か、また分かりにくい部分がどこであるかを調査することができると考えた。

タスクは 2 人 1 組みのペアで行なった。内容としては大きく分けて下記の 3 つとなっている。

- (1) GUI を用いたインタラクティブ文章の作成
- (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文章を読む
- (4) 文章に関連する選択問題を解答する

実験開始前にツールの使い方とタスク説明を行った。

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）の検索は独自に任せず、事前に各ペアに対してそれぞれ種類の異なる資料を用意する形を採用した。またサンプル文章に関連する選択問題を各種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。今回の実験の評価としてアンケートを収集した。

5.2 アンケート 1：NASA-TLX に関して

NASA-TLX [13] 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：Per-

formance、E：Effort、F：Frustration）。評価指標は 1 - 11（中央値 6）の 11 段階で評価を行った。

5.2.1 評価尺度に関して

MD（精神的な要求）は、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）は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）は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った場合は負荷が大きい方を選択する。

P（作業成績）は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）は、要求されたタスクにどのくらい強く取り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）は、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。

5.2.2 評価尺度の重み付け評価

6 つの評価尺度から得た個人が体感したツール利用時のタスクで生じた負荷は、重み付け評価を行うことで評価する。具体的には x_i を各要素（ $x_1 = MD$, $x_2 = PD$, $x_3 = TD$, $x_4 = P$, $x_5 = E$, $x_6 = F$ ）とした際に、例えば各要素の重みを X_i とした時、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。

5.3 アンケート 2：ユーザビリティに関する質問

本実験では、(1) システムの使いやすさはどうでしたか？ (2) システムに必要な追加機能はありますか？ の計 2 問の自由記述形式の質問を用意した。(1) の質問の目的としては、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。(2) の質問は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



図 4 NASA-TLX の実験結果. 各色三角のプロット点は参加者を示している. 青色四角のプロット点は全ての参加者データの平均値と分散を示している.

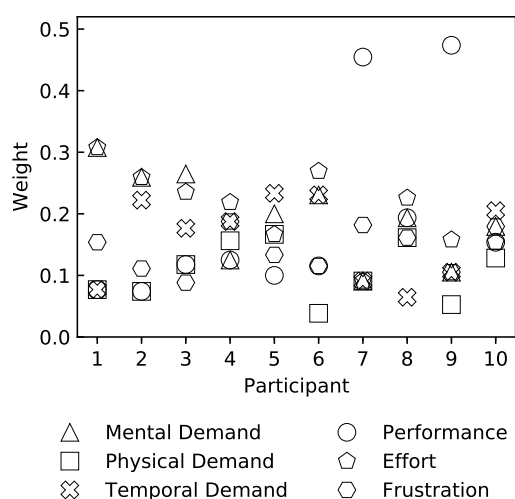


図 5 NASA-TLX の評価尺度の重み付け評価結果. 各被験者ごとに重みの大きい評価尺度がタスク時に負荷を最も感じた要素となっている.

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.

6. 実験結果と考察

タスクを終えた参加者のツールに対する「使いやすさ」や「負荷」を主観評価で評価し、今後の課題について調査

する. 本実験では参加者は 5.4 ± 2.1 個の学習補助コンテンツを文章に追加していた.

6.1 NASA-TLX の回答結果

図 4 は NASA-TLX の実験結果を示している. 図 4 の結果から正規化を行なったものが図 5 となっている. 評価には図 5 に重点をおく. 図 5 の見方としては各参加者の軸 (縦軸) において, より重みの大きい要素がツール利用時に参加者が負荷を感じていたものとなっている. 例として, 参加者 7 や 9 は 6 つの負荷要素のうち, P に最も負荷を感じていたことになる. ここから今回開発したツールにおいて P の改良が求められる. その他, 各参加者でも比較すると全体を通して MD , E , TD も改善の余地があり, 反対に現状のツールにおいて PD は負荷が低かったといえる.

6.2 ユーザビリティに関する質問の回答結果

1 つ目の質問「システムの使いやすさはどうでしたか？」に対し, 「インタラクティブな文章を体感するまでコンセプトの理解が難しかった」ことや「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. 一方で, 「直感的な操作で使いやすいツールだった」ことや「ツールによる作成工程は直截的で簡単」との意見も得られた.

2 つ目の質問「システムに必要な追加機能はありますか？」に対し, 「画像の調整機能があると嬉しい」や「画像の表示パターンを選択したい」という意見があった. ここから, 今後の機能追加としては作成者が意図する方法 (注視時間, 興味, 認知負荷等の選択) で読者に表示できるような表示形式の選択機能の実装が求められる.

6.3 評価結果の考察

NASA-TLX と自由記述の質問の結果から, P が最も改良すべき要素であると分かった. P はユーザが「どのくらい理想通りタスクを終えられたか? 自分の成果に満足しているか?」を示しており, インタラクティブな文章を思い通り作成できなかったことを示している. この理由を考察するにあたり, 図 5 において最も P の負荷が大きかった実験参加者 7 と 9 の自由記述の回答に着目した. その結果, 参加者 7 は必要な機能に関して「コンセプトの概念を詳しく説明するページが欲しい」という回答をしていた. ここから, 今回のインタラクティブな教科書の概念の詳細な説明が必要だと考える. すなわち, コンセプトの詳細を説明し, インタラクティブ教科書の普及, ツールの利用回数を増やすことで解決すると考える. 一方で参加者 9 からは改善のための有用な意見は得られなかった.

7. 結論と今後の展開

本研究では, 教育関係者向けに, 学習者の読書量や学習効果を高める可能性のあるインタラクティブ教科書を作成



図 6 インタラクティブ教科書の楽譜への応用例. 楽譜を注視位置に合わせて演奏動画を流し理解を支援する.



図 7 インタラクティブ教科書のプログラミングへの応用例. 注視しているコードの実行結果を表示していくことでプログラミングの初心者の学習効率を向上させる.

するためのツールである, *HyperMind Builder* を提案した. ユーザビリティ調査の評価結果から, ツールの使いやすさと操作性の課題は解決できた.

HyperMind Builder は, 数学や英語といった主要教科だけでなく, 芸術や情報などの様々な科目で利用可能である. *HyperMind Builder* を用いて, 図 6 に示すように目線に応じて演奏例の再生したり, 図 7 のように, プログラムのソースコードとその実行結果を目線情報に基づき支援していくアプローチは, 初学者にとって上達のイメージをつかむための手助けとなると考えられる.

今後の展開としては, 実際に教育者にツールを利用してもらい, 学習者の読書時の没入感や興味を向上させることができる教科書の作成と研究を行う. 作成と研究を通じて最終的には, 読書量や学習効率の向上, エンタテインメント性の向上によるアクティブラーニングに繋げていく. ツールの課題としては, どのように教育者に概念を伝え, 教育分野に浸透させていくのかを考える必要がある.

謝辞

本研究の一部は, JST CREST「経験サプリメントによる行動変容と創造的協働」(JPMJCR16E1) の支援により実施した. ここに記して謝意を示す.

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/atta_ch/_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 ak-lat 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] 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.
- [6] Shoya Ishimaru, Soumy Jacob, Apurba Roy, Syed Saqib Bukhari, Carina Heisel, Nicolas Großmann, Michael Theuss, 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.
- [7] Aulikki Hyrskykari, Päivi Majaranta, Antti Aaltonen, and Kari-Jouko Räihä. Design issues of idict: a gaze-assisted translation aid. In *Proceedings of the 2000 symposium on Eye tracking research and applications*, pp. 9–14. ACM, 2000.
- [8] Ralf Biedert, Georg Buscher, Sven Schwarz, Jörn Hees, and Andreas Dengel. Text 2.0. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems: Extended Abstracts*, pp. 4003–4008. ACM, 2010.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Shoya Ishimaru, Nicolas Großmann, Andreas Dengel, Ko Watanabe, Yutaka Arakawa, Carina Heisel, Pascal Klein, and Jochen Kuhn. Hypermind builder: Pervasive user interface to create intelligent interactive documents. In *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*, pp. 357–360. ACM, 2018.
- [12] 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.
- [13] Sandra G Hart. Nasa task load index (tlx). volume 1.0; computerized version. 1986.