

多彩な手続き学習を促進するシステムの開発 - ハノイの塔と本棚のメタファを複合したパズルゲーム -

安藤健翔^{†1} 戀津魁^{†1} 日置優介^{†2} 神山大輝^{†3} 細川慎一^{†4}
渡邊賢悟^{†2} 伊藤彰教^{†2} 近藤邦雄^{†2}

本研究では、木製パズルゲーム「ハノイの塔」のルールを利用した、多彩な手続き学習を促進するパズルゲーム「ハノイの本」を開発した。「ハノイの塔」のシンプルなルールに本と本棚の要素を組み合わせ、知的な楽しさと整理整頓の快感を提供するとともに、多彩な課題を用意することで手続き学習を促進する。また、よりよいユーザ体験の為、デバイスに適したグラフィックインタラクション、及びゲームの特性に適したサウンドインタラクションを実装した。

Development on the System for Promotion of Learning on Various Procedural Problem Solving - A Kind of Tower of Hanoi Applying a Metaphor of Bookshelf -

KENSHO ANDO^{†1} KAI LENZ^{†1} YUSUKE HIOKI^{†2} DAIKI KAMIYAMA^{†3}
SHINICHI HOSOKAWA^{†4}
KENGO WATANABE^{†2} AKINORI ITO^{†2} KUNIO KONDO^{†2}

“Books of Hanoi” is a puzzle game combined the rule of Tower of Hanoi and a bookshelf metaphor that aims to promotion of learning on various problem-solution procedures. For complex procedure testing, this game expands the number of pegs, disks, and constraints. The result of expanding, the solution process and the levels of difficulty increased. This system applies a bookshelf metaphor and is implemented automatic constraints judge, gradual color design, interactive sound for solving phase for keeping motivation until finding and constructing the further more complex solving procedure.

1. はじめに

「ハノイの塔」は、100 年以上前から存在する木製のパズルゲームである（図 1）。



図 1 ハノイの塔

ハノイの塔は 3 本の杭と、大きさの異なる複数の円盤で構成され、「小さな円盤の上に大きな円盤を積まない」というルールのもと、端に積まれた円盤を逆の端に移動させることで完成となる。

ハノイの塔のプレイでは「A をするためには B をしなければならず、そのためには C をする必要がある」といった、実世界の問題解決と共通する過程が体験できる。そのため、子供向けの知育玩具として、また認知科学における問題解決学習の過程を分析するための実験器具として広く用いられている[1][2][3]。しかし、実物のハノイの塔における円盤の入れ替えはすべて手動で行うため、煩雑で作業的であり、円滑な試行の障害となっている。

ゲーム性についても、基本的に杭の数が 3 本に限定され、初期配置も 1 パターンしか提示されないため、難易度は円盤の枚数の増減にのみ左右されバリエーションがほぼ存在しない。そのため、段階的なプレイの習熟や、ユーザを飽きさせないためのステージ設計の幅が少ない。また、ルール上解法は 1 パターンに限定され、1 度理解すると円盤の枚数に関わらず解決可能となり、得られる手続き学習のバリエーションも少ない。

本研究ではプラットフォームとしてタブレットデバイスを使用することで、タッチ操作による快適なオブジェクトの移動を可能にした。また「小さな円盤の上に大きな円盤を積まない」というルールは、通常のハノイの塔においては物理的に制限されていないため、その遵守はプレイヤーの裁量に任されてしまう。デジタルのソフトウェア上でハノイの塔を制作することで制限を設け、ルールに外れる

†1 東京工科大学大学院
†2 東京工科大学
†3 株式会社宮地商会
†4 Pictlinks

移動を行えなくすることができる。

さらに、「本を綺麗に片付ける」という行為の快感・達成感に注目し、ハノイの塔の「大きさ順に積んでいく」というルールと、「本を長さ順に並べ替える」という行為の双方が持つ共通のメタファを利用することで、ハノイの塔の学習効果をそのままに、高度なゲーム性の拡張と多彩な手続き学習の機会の提供を実現した。また、よりよいユーザー体験の為、タッチ、グラフィック、サウンドにおけるインタラクティブデザインの最適化を行い、快感・達成感の強化による手続き学習の促進を図った。

2. 関連研究と事例

タッチパネルを使用した、ハノイの塔がモチーフになっている参考事例として、「ハノイの塔-Olympic[4]」がある。これは iOS デバイス上でプレイできるハノイの塔で、実物と同じく 3 本の杭の中で円盤を動かすほか、対戦機能が実装されていたり、インターネットを介してスコアを競ったりすることができるようになっているが、難易度の差異は円盤の数の増減に留まっている。

本のメタファをパズルと組み合わせた例としては、「Book Towers[5]」がある。これはばらばらに積み重なった様々な色の本を色ごとに、大きさ順に揃えるゲームで、小さい本の上に大きな本は置けないというルールはあるものの、正しく積まれた本は複数同時に動かせるため、本来のハノイの塔とは異なるゲーム性となっている。

RosKreativ 社の「Клипы Руденко[6]」という製品は、物理的な制限を設けることでルールが遵守される工夫をしている。この作品は、閉じられた横長の輪の中に、ハノイの塔の円盤にあたるクリップがぶら下がる形で重なって設置されており、円盤の上下関係を機械的に実現している。

本研究とこれらの関連研究・事例との違いは、ハノイの塔のルールをそのままに、本と本棚の要素を組み合わせることにより、ゲーム性の拡張とゲームプレイの快感・達成感の増強を図っている点である。ハノイの塔の要素の拡張により、ハノイの塔ではできない多彩な課題を提示し手続き学習を促進する。また、タブレットデバイスの特性を生かし、快適な操作性とルールの制限を合理的に実現した。

3. 制作アプリケーション

本章では、制作したアプリケーション「ハノイの本」の詳細について記述する。本アプリケーションには主に次のような機能がある。

1. メインゲーム

- ① 吹き出しと矢印によるチュートリアル
- ② 障害物
- ③ 移動対象指示
- ④ 配置補助
- ⑤ 大小関係比較補助

⑥ インタラクティブサウンド

⑦ リザルト

2. ステージ選択
3. ランダムステージ生成
4. スコア表示と Twitter への投稿
5. クレジット

3.1 ゲームシステム

「ハノイの本」のメイン画面は 6 箇所（図 2）の収納スペースのある本棚から構成され、そこに長さの異なる最大 16 冊の本と、難易度に応じて障害物が配置される。図 2 にプレイ中及びクリア時のメイン画面を示す。



図 2 メイン画面

この本棚中の各スペースを利用して本及び障害物を移動させ、図 2 左の乱雑に置かれた状態を、図 2 右のように、下段左側から右側に向かい長い本から短い本へと順に並ぶよう整頓する。片付けの過程と結果を再現するために、下段のスペースのみ本を縦向きに置き、上段 2 段は横向きに積む形とした。

本の移動には「ハノイの塔」のルールが適用され、短い本の上及び横にそれより長い本は置けないという制限が課せられる。1 度に移動可能なのは 1 冊のみで、下段は右端の本、上段は 1 番上にある本を移動させる。

障害物は、ゲームプレイの難易度を上昇させる機能である（図 3）。

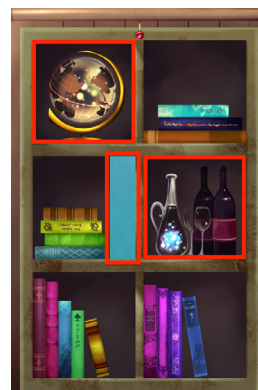


図 3 障害物

これは各収納スペースの一部またはすべてを塞ぐオブジェクトで、障害物があることで、プレイヤーは限られたスペースで本の並べ替えを行わなくてはいけなくなり、手数が多く必要になる。結果として難易度が上昇し、ステージのバリエーションも増やすことができる。

ゲームステージは、プレイのルールを説明するチュートリアルステージ、段階的に難易度が上昇していく通常ステージ、そして本および障害物がランダムに配置されるランダムステージに分けられる。

プレイのルールを説明するチュートリアルステージでは、1 手ごとに、操作とルールについて説明した吹き出しと、本の移動を指示する矢印が表示される（図 4）。

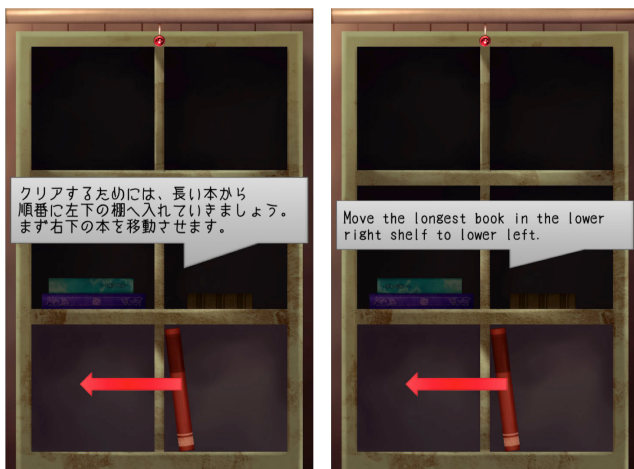


図 4 チュートリアル

吹き出し中の説明文の多言語対応にあたり、各説明文につき吹き出しの左下座標と幅を指定し、文章量に応じて上方向に伸ばすという機能を実装した。この機能により、指し示す先に影響を及ぼさず、多言語化における文字量の変化に対応できるようになった。現在「ハノイの本」は日本語、英語、中国語、ドイツ語に対応している。さらに、操作対象外の収納スペースを暗転させ、操作不可とすることで、こちらの意図した移動のみをプレイヤーに行わせることができるようになっている。これにより「左下から長さ順に本を並べることでクリアとなる」、「本は一度に1冊しか移動できない」、「短い本の上により長い本は置けない」という基礎的なルールを確実に段階的に学習させることができる。

通常ステージでは、本および障害物の数と初期配置をあらかじめ設定することで、多彩な状況を提示するとともに、段階的なプレイの理解と習熟を促すステージ設計を行った。

各ステージのクリア後にはリザルトが表示され、本の移動回数と、クリアまでにかかった時間が分かるようになっている。また Twitter とも連携しており、移動回数と所要時間をツイートすることで、他のプレイヤーとスコアを競ったり、最小手数の目安を知ったりすることができるように

なっている。

3.2 ユーザインタフェース

本節では、ユーザインタフェースを設計するにあたり工夫した点について記述する。本アプリケーションを制作するにあたり、タブレットデバイスを用いることでゲームルールの遵守と快適なオブジェクトの移動を実現したが、その他にもグラフィック及びサウンドインタラクションの工夫により、ユーザ体験の充実を図った。本章で記述する機能により、ユーザのモチベーションが低下するのを防ぎ、プレイの快適性向上、達成感の増強を実現する。

3.2.1 タッチインタラクション

ユーザの指による画面タッチを入力として受け付けるため、ユーザの操作意図を反映しやすいタッチインタラクションを実装した。

本自体にタッチ判定を設定した場合、範囲が小さく、意図した操作を行うことが困難になる。そのため、スペース内であればタッチ場所に関わらず、その1番上または右端の本を掴んだ状態にする。置く際は正確にスペース内で指が離される必要はなく、本棚枠外の余白部分であっても自動的に該当スペースを判断し配置処理を行う。これによって、パズルに慣れたユーザが高速に操作を行っても誤検知が起きにくくなっている（図 5）。

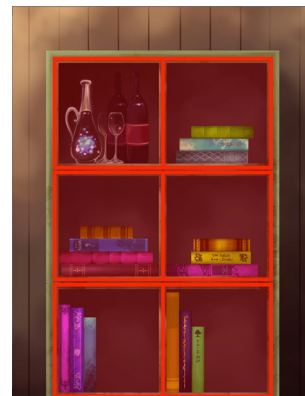


図 5 タッチ範囲

3.2.2 グラフィックインタラクション

長さの近い本の場合、一見してどちらの方がより長いかは分かりづらく、どの本が次に左下からの正位置に置かれるべき本なのか、掴んでいる本が移動先に置けるのかどうかなどが判断しづらい。そのため、次に挙げる各種機能を実装した。

まずは、本ごとの色とデザインの違いである。各本を正しく並べた場合、滑らかなグラデーションになるように配色を行っており、長さの比較を補助している（図 2 右側）。サイズデザインと合わせ、プレイの習熟により長さの関係を記憶することもでき、徐々に意識せず並べ替えを行えるようになる。

また、次に置かれるべき最も長い本を点滅させるという

機能がある．この機能がなかった場合、プレイヤーは次に置くべき最も長い本を自ら比較しながら探さねばならず、もし間違っている本を操作してしまっていた場合などに、手順を戻って並べ直さねばならず、大きなストレスになってしまう．正しい位置に置かれていない中で最も長い本を点滅させることで、次に操作すべき対象を判断しやすくし、ストレスの軽減を図った．

さらに、本を保持したまましばらく経過すると、ヒントとして、置くことが不可能な場所を暗転させる機能を実装した（図 6）．



図 6 配置不可能な場所の暗転機能

また、更なる長さ関係比較の補助として、操作を行わずにしばらく経過すると、本の近くに長さ順に番号を表示する機能を実装した（図 7）．番号の大小により具体的に本の長さの関係を把握することができ、置き間違いを減らすことができる．



図 7 比較補助機能

これらの機能により、プレイヤーは本の長さの関係を手動で比較せずとも置ける場所を判断することができる．本を保持したまましばらく経過した後置くことが可能かを表示する仕様としたため、初心者で、本の長さの関係を把握できていないうちはより時間がかかってしまうが、上級者となるほど番号を見ずに並べ替えられるようになり、ス

コアのクリアタイムを向上させることができるというゲーム性を付与することもできた．

3.2.3 サウンドインタラクション

本や障害物を移動させる際、掴んだ時と配置した時、また配置時は横積みと立て置きを区別し、それぞれに異なるサウンドエフェクト（以下、SE）を再生する．

パズルの特性上、ゲームの過程でユーザが本の長さの関係を見誤り、下段に間違った本を配置した際に気付かずに続けてしまう場合がある．これを避けるため、正しい位置に配置された際には立て置き時の SE と共に通常と異なる特殊な SE（以下、正解 SE）が再生される．正解 SE は正解冊数が増える毎に徐々に音階が上がっていく（図 8）．

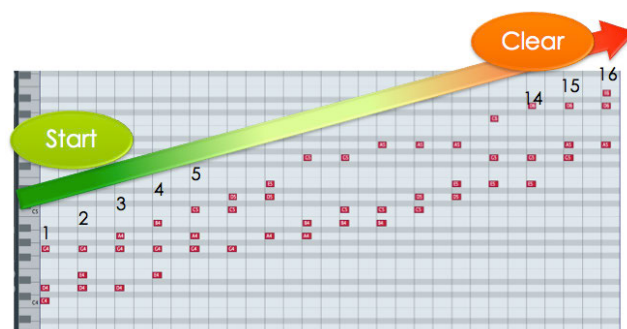


図 8 正解 SE の音程変化

また、ゲーム中の BGM についてもインタラクションを行った．ゲーム開始時は少ない楽器数で演奏されたトラックを再生し、本が 2 冊正解の位置に配置される毎にトラックが最大 5 つまで順次追加されていく（図 9）．

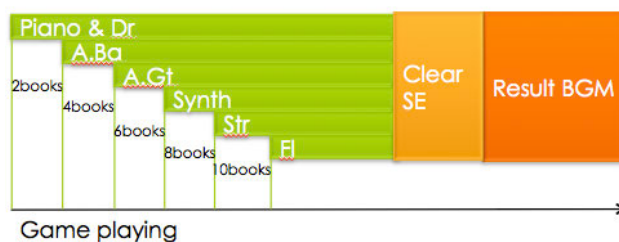


図 9 BGM 追加の流れ

これらのサウンドインタラクションによって、展開の遅いゲーム序盤では徐々に楽器が追加されていき、整頓が済み正しい位置への配置が高速になるゲーム終盤では、完成した BGM による盛り上がり、連続で鳴る正解 SE によってゲームクリアに向かう高揚感を演出している．

4. 多彩な手続き学習の促進

4.1 ハノイの塔における手続き学習

「ハノイの塔」問題を解決するためには、ルールに従った試行錯誤を行い、その個別の手順を抽象化して認知し、

解決のための手段を探る必要がある。また、最終的な解法が再帰的な構造を持つという特徴があり、円盤の枚数に関わらず最適解が一意に定まる。そのため、試行錯誤から得られた解法を条件が異なる場面に比較的簡易に適用可能であり、解法を更に抽象化して理解するという過程も体験できる。

ハノイの塔問題の解決を通して、このような一般的な問題解決のための手続きが習得できることが広く知られており、「ハノイの塔」は認知科学分野の研究において人間の問題解決学習過程を分析するための実験器具として広く利用されている。

しかし、ハノイの塔は3本の杭の上で手順を行うというルール及び最適解が一意に定まるという特徴から、難易度を円盤の枚数の増減によってしか変更できない。2枚の場合は簡易すぎて試行錯誤そのものがほぼ生じないために、3枚～5枚程度で行われることが多いが、3枚と4枚、4枚と5枚の間に大きな難易度の隔たりが存在する。

4.2 難易度設計による多彩な手続き学習

本研究で制作したアプリケーションでは、本及び障害物の数とそれらの初期配置により、多彩な難易度のステージを設計することができる。多彩な課題を提示することで、ハノイの塔が本来持つ手続き学習効果の促進を狙った。

4.2.1 低難易度設計による導入

初級難易度では、6つの収納スペース全てを使用してステージ上の本を並び替えられ、ステージが進むにつれ少ない冊数の本から徐々に数が増え最大16冊となる。しかし、「ハノイの本」においては、ハノイの塔の円盤と違い本の数は難易度に影響はするものの直結しておらず、ステージ上の本の配置が本の冊数と共に大きな要素となる。図10に同じ6冊の本で異なる難易度に設計した例を示す。



図10 初期配置による難易度設計の例

同じ収納スペースに本が多く積まれているほど手数が増え難易度が上昇し、複数のスペースに本が分散していれば手数が少なくなり難易度は低下する。また、目的地にあたる左下の棚に正解でない中で比較的長い本があったり、1番長い本の上に他の本があったりすることによって、それ

らの本を先に移動させる必要が生じる。そのため、これらの初期配置の工夫により、同じ冊数でも難易度の差異が生み出せる。これによってハノイの塔における難易度間の差が大きく、低難易度の課題が設計できないという問題を解決している。

また、パズルゲームの形を取りインタフェースやインタラクションを工夫したことで、導入時や続行におけるモチベーションの維持も行っている。

4.2.2 中級から上級への導入

導入後は基本的にステージが進むにつれ冊数を徐々に増やすが、16冊のステージをクリアした後に再度冊数を減らし、初期配置による難易度設計を行ったステージを挿入している。これによって、棚のスペースが難易度に与える影響を認識し、以降の高難易度ステージにおいてスペースを確保し活用する必要性を学習しやすくしている。

4.2.3 上級難易度によるハノイの塔問題の再現

上級難易度では16冊に加え、障害物を配置することで収納スペースの数を制限し難易度を向上させている。収納スペースの一部を塞ぐ小さい障害物と、すべてを塞ぐ大きい障害物を組み合わせることで徐々に使用できるスペースを限定し、最終的には本16冊+小さい障害物1つ+大きい障害物2つのステージが最高難易度となる。

本システムの優位性であったスペースを制限することによって、本来のハノイの塔と同じ状況になり、最終的にハノイの塔問題の解決過程で得られる知見も全て得られる形となっている。

4.3 手続き学習の議論と本システムの試み

宮田らの研究によると、認知科学分野の研究では、ハノイの塔における手続き学習を行うためには、学習者の試行錯誤をできるだけ少なくするように補助し、動機付けの減少を防止することが有効だと主張する研究者と、試行錯誤の過程そのものが手続き学習になると主張する研究者で、意見が分かれている[7]。

それに対し、4.2節で述べてきた通り、本システムでは多彩な難易度のステージを設計できるようになった結果、前述の2つの主張をどちらも取り入れた手続き学習をさせることができるようになった。

熟練度が低いプレイヤーは3.2節で述べた各種補助機能や、ハノイの塔では実現できなかった低難易度のステージにより試行錯誤の回数を少なくクリアすることができ、動機を失うことなく基本的な解法を学習することができる。熟練度が上がったプレイヤーは、それまでに得た解法に加え新たな要素に対する試行錯誤の繰り返しによって、本来のハノイの塔問題において物理的に積み上げる事が現実的でない円盤16枚相当の高難易度ステージに挑戦できる。

これによってハノイの塔の難易度の下限を下げ、上限を引き上げた上でステージ設計によりその間をなだらかに繋ぐことができ、多彩な手続き学習を促進した。

5. 評価

5.1 評価のための展示

2013 年 2 月及び 5 月に開催された「メディア学が創る豊かな文化」連続公開講座、2013 年 3 月に開催された映像表現・芸術科学フォーラム 2013[8]、2013 年 6 月に開催された 2nd KMUTT-TUT Joint Symposium 2013、2013 年 9 月に開催された東京ゲームショウ 2013、及び東京工科大学のオープンキャンパスにて「ハノイの本」の展示を行った。展示では「ハノイの本」をインストールした iPod touch, iPad, iPad mini を複数台用意し、来場者が手にとって自由に試遊できるようにした。

5.2 ユーザの評価

来場者からは「発想がいい」「操作や本を置く感覚が気持ちいい」「グラフィックが綺麗」等の肯定的な感想が多く寄せられた。また、クリアできるまで数十分間プレイし続けるほど熱中した来場者も多数見られ、ゲームとしての快感・達成感の強化による手続き学習の促進にある程度効果が見られた。さらに、映像表現・芸術科学フォーラム 2013 においては「アプリケーション全体としての完成度が優れていた」等の評価を受けている。

また「本の順番が分かりづらい」などの否定的な意見も寄せられた。3.2.2 グラフィックインタラクションの項で述べた比較補助機能などは、これら来場者からの意見をもとに実装した機能である。

5.3 ダウンロード数

「ハノイの本」は 2013 年 6 月 5 日に App Store にてリリースされ、2013 年 11 月現在までに約 13000 本のダウンロードが行われている。

6. まとめ

6 つの収納スペース、最大 16 冊の本、さらに大小の障害物とそれらの初期配置の組み合わせにより、従来のハノイの塔ではできなかった幅広い難易度のステージ設計を可能にした。これにより、初心者向けの簡単なステージから、上級者向けの非常に高難易度なステージまで作ることができ、多彩な手続き学習を促進するゲーム設計ができるようになった。

また、タッチ・グラフィック・サウンドインタラクションの工夫により、円滑な操作とプレイにおける快感・達成感の強化を図った。操作やシステムの面でプレイヤーに与えるストレスを軽減し、モチベーションの低下を防止した。

今後の課題としては、各ステージの最適解の算出アルゴリズムの制作が挙げられる。最少手数 that 求められれば目標とすべきスコアが提示できるが、現在、各ステージの最少手数を求めるためには手動で試行錯誤を繰り返すしかなく、正しいかどうか確認する手段がない。すべてのステージで最少手数を求めることは事実上不可能なため、最少手数を求める手法、解法の開発が求められる。

参考文献

- 1) Anzai Yuichiro, Simon Herbert A.: The theory of learning by doing., Psychological Review, Vol.86(2), Mar 1979, 124-140
- 2) 村田和香: 「ハノイの塔」パズルを用いた高齢者の問題解決過程の分析, 北海道大学医療技術短期大学部紀要 7, 81-87, (1994)
- 3) 伊藤智哉, 他: 概念と手続きの相互作用による知識構成—ハノイの塔の協調学習—, 日本認知科学学会大会発表論文集(CD-ROM), 27th, ROMBUNNO.P2-6
- 4) ハノイの塔(Tower of Hanoi) -Olympic
<https://itunes.apple.com/jp/app/id430261581>
- 5) Book Towers - Brain Teaser Math & Logic Tower Puzzle
<https://itunes.apple.com/jp/app/book-towers-brain-teaser-math/id592425401?mt=8>
- 6) Клипсы Руденко
http://www.roscreative.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=22
- 7) 宮田仁, 他: パソコンを利用した「ハノイの塔」における問題解決過程の分析, 日本教育情報学会学会誌 11(2), 13-20, (1995)
- 8) 戀津魁, 他: ハノイの本, 映像情報メディア学会技術報告 37(17), 169-170, (2013)