

Title	人間相手のゲーム実験における時間と場所の制約を緩和するアプリの検討と Hanabiでの試行
Author(s)	奥田, 真
Citation	
Issue Date	2025-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/19882
Rights	
Description	Supervisor: 池田 心, 先端科学技術研究科, 修士 (融合科学)

修士論文

人間相手のゲーム実験における
時間と場所の制約を緩和するアプリの検討と
Hanabiでの試行

奥田 真

主指導教員 池田 心

北陸先端科学技術大学院大学
融合科学共同専攻
(融合科学)

令和7年3月

目次

第1章	はじめに	1
第2章	Hanabi について	3
2.1	Hanabi のルール	3
2.1.1	概要と目的	3
2.1.2	事前準備	4
2.1.3	ゲームの進め方	5
2.1.4	終了条件と得点計算	6
2.2	Hanabi の特徴	7
2.2.1	スタック完成のための限られた情報伝達	7
2.2.2	暗黙的コミュニケーション	8
第3章	関連研究	9
第4章	Hanabi アプリの機能と提案	11
4.1	被験者実験の問題とその原因	11
4.2	理想的な状態	12
4.2.1	そのほかの理想的な状態	13
4.3	求められる機能	14
4.4	機能の限定	16
4.4.1	Hanabi 権利者への問い合わせ	16
4.4.2	プロトタイプ「Hanabi アプリ」の提案とその機能	16
第5章	Hanabi アプリの実装	18
5.1	動作と画面遷移	18
5.1.1	ログイン画面	18
5.1.2	ホーム画面	19
5.1.3	実験説明	19
5.1.4	事前アンケート画面	21
5.1.5	ゲームプレイ画面	21

5.1.6	ゲームごとアンケート画面	24
5.2	搭載した AI	24
5.2.1	AI プレイヤ Alpha	25
5.2.2	AI プレイヤ Beta	26
5.2.3	Hanabi アプリ環境における AI 同士のゲームプレイ結果 . . .	29
5.3	Hanabi アプリと被験者実験	29
5.3.1	必要なソフトウェア/ハードウェア	29
5.3.2	AI プレイヤの作成	30
5.3.3	実験の準備	31
5.3.4	Hanabi アプリの機能に変更を加える場合	32
第 6 章	Hanabi アプリを用いた実験	33
6.1	実験のセットアップ	33
6.1.1	被験者の募集と応募条件	33
6.1.2	実験従事時間の計算と謝金	34
6.1.3	実験日と実施時間帯	34
6.1.4	実験の流れ	35
6.1.5	被験者とのやりとり	35
6.1.6	ルール説明と TIPS	36
6.1.7	ゲームプレイに関する条件	36
6.2	実験結果	38
6.2.1	被験者の募集と参加に関する結果	38
6.2.2	ゲーム数とゲームプレイ時間に関する結果	40
6.2.3	アンケート結果	43
6.2.4	2つの AI プレイヤの獲得得点とアンケート結果	47
6.3	知見と考察	51
6.3.1	プレイ時間について	51
6.3.2	被験者募集について	53
6.3.3	ゲームの進行について	54
6.3.4	その他の課題と改良点	54
第 7 章	おわりに	56
付 録 A	Hanabi アプリのホーム画面に記載した説明事項	58
付 録 B	実験募集時に送付したメールの内容	59

付 録 C 事前アンケート	63
付 録 D ゲームごとアンケート	65
付 録 E 各被験者の獲得得点	68
付 録 F 6 ゲーム後アンケートの回答結果のヒートマップ	72

目 次

2.1	2人プレイ Hanabi の手札の持ち方と場のイメージ	4
2.2	緑のカードを指し示す例	5
2.3	4のカードを指し示す例	5
5.1	ログイン画面	20
5.2	ホーム画面	20
5.3	実験説明画面冒頭	20
5.4	実験説明画面末尾	20
5.5	事前アンケート回答画面	21
5.6	ゲーム画面	23
5.7	自分の手札選択時	23
5.8	相手の手札選択時	23
5.9	捨て札内訳表示	23
6.1	実験への応募者数の推移	39
6.2	各被験者の総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の分布とその関係	41
6.3	1ゲームごとの時間の分布	42
6.4	1手ごとの時間の分布	42
6.5	ゲーム終了時の最終手数の分布（ゲーム終了条件別）	43
6.6	アンケートのうち、被験者ごとに質問された項目の回答結果	44
6.7	全ゲームにおける得点分布（AI プレイヤ別）	47
6.8	被験者ごとの Alpha および Beta との平均得点分布	48
6.9	ゲームごとアンケートの AI プレイヤ別の回答結果	50
F.1	6ゲーム後アンケートの回答結果のヒートマップ	72

表 目 次

5.1	AI プレイヤ Alpha, Beta の SP と CP の結果：平均得点（標準偏差）	29
6.1	各被験者の総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の代表値	41
6.2	ゲームごとアンケートの AI プレイヤ別回答結果の平均と標準偏差 （5段階リッカート尺度）	49

第1章 はじめに

2025年現在、人工知能 (AI: Artificial Intelligence) 技術は盛んに研究が行われており、スマートスピーカーや顔認証システム、自動翻訳など、私たちの日常生活の中でもその存在感を強めている。このようなAI技術の発展に伴い、新しいアルゴリズム、モデル、あるいはシステムを試験や評価、比較する場として重要な役割を果たしてきたのがゲームである。ゲームはルールや勝敗が明確で、行動の評価が容易であるため、よい研究題材として活用されてきた。

ゲームのAIプレイヤの研究はここ数十年、人間のプロプレイヤに勝利するような強さを追い求めることが主流であった。1997年にはチェス [1]、2016年に囲碁 [2]、2017年には将棋でプロプレイヤに勝利したことが話題になった。さらに、相手の手札が見えない不完全情報性を特徴とするポーカー [3] や、複雑なデジタルゲームの1つDota2でもプロプレイヤへの勝利 [4] が報告されており、幅広いゲーム種でAIプレイヤはプロに勝ち越すような強さとなっている。

強さを求める一方、人間プレイヤのゲーム体験向上をはじめとする多様な目的で、何らかの意味で人間らしさを備えたAIプレイヤ（以下、人間らしいAIプレイヤ）の研究も進められている。単に人間に似た振る舞いをAIプレイヤに行わせるだけでなく、ゲームプレイの指導 [5] や、適切な難易度のゲームコンテンツ提供 [6] に人間らしいAIプレイヤを応用するなど、研究対象は多岐にわたる。

人間らしいAIプレイヤを実現するアプローチは、主に2つに分けられる。1つは経験や観察に基づいて人間らしさをAIプレイヤに反映させる手法で、もう1つは人間のプレイデータを利用する手法である。人間プレイヤの操作データが大量にある場合、そのデータを用いて状況に応じた操作を決定する数理モデルを構築し、AIプレイヤの操作決定に利用できる [7]。一方で、操作データが十分に存在しない場合でも、仮説や予想に基づいたアプローチが可能である。例えばスーパーマリオブラザーズ¹のようなゲームでは、「敵を余裕をもって回避する」や「隠しルートを探す」といった人間プレイヤの挙動はよく知られ、これをAIプレイヤの行動に反映させることができる [8]。

人間らしいAIプレイヤの研究がさかんに進められるなか、その実装や評価には

¹任天堂が発売した、横スクロールアクションゲーム。マリオと呼ばれるゲームキャラクターをプレイヤは操作し、山あり谷あり敵ありのステージを左から右へ走破しゴールを目指す。

これらの研究特有の課題が伴う。実装段階では人間のプレイデータを利用する場合、十分な量と質のデータが必要で、その収集が課題となることがある²。一方評価段階では、AI プレイヤが人間から見て人間らしいか判断するため、ゲームプレイ後にアンケートなどの質問紙法を用いることが多い。（評価項目は各研究の背景や目的、人間らしさの着目点、実験条件などによる。）しかしこういった人間が介在する評価手順には、実験用インターフェースの準備やゲームプレイ時間相当の時間的拘束など、人的・時間的コストが課題となることがある。上記の課題に対し、人間を相手にした効率的なプレイデータ収集方法や実験の負担軽減には一定の価値があると考えられる。

同じような課題を持つと予想されるゲームの1つとして、協力ゲーム Hanabi³がある。Hanabi は、プレイヤ自身の手札を直接見ることができない独特な不完全情報性、見えない手札を明らかにしていくために限られた回数だけ行えるプレイヤ間の情報伝達、その限られた情報から最大限価値ある行動を行うための意図推測が特徴の協力ゲームである。これらの特徴を併せ持つ Hanabi は、意図推測を伴う協調行動を行うゲーム AI を実現するうえで、興味深い研究題材となっている [1]。これまでの Hanabi の AI プレイヤの研究では、AI プレイヤ同士の協力プレイにおける成果が多く報告されている。一方、AI プレイヤと人間の協力プレイに関する実験や評価報告は限定的であり、前述したような人間相手のデータ収集と実験の負担がその一因であると一部指摘されている [11, 12]。

そこで本研究では、AI プレイヤと人間のゲームプレイ実験の負担を軽減し、プレイデータ収集を効率化する枠組みを検討し、その題材として Hanabi を採用し、プロトタイプによる試験的な実験実施による課題と知見の整理を目的とする。プロトタイプ「Hanabi アプリ」は、研究者がサーバを立ち上げることで、被験者は AI プレイヤと Hanabi をプレイし、アンケートに回答するまでをオンラインで、自身の都合のいい時間に行えることを特徴とする。

本論文では、提案する枠組みの機能を検討し、プロトタイプ「Hanabi アプリ」の実装と試験運用結果を報告する。2 章では Hanabi のルールや特徴について述べる。3 章では、これまでの Hanabi の AI プレイヤの研究を概説する。4 章では、提案する枠組みに必要な機能の検討、機能に絞り込んだものとして、プロトタイプ「Hanabi アプリ」を提案する。5 章では Hanabi アプリの実装内容を具体的に説明する。6 章では Hanabi アプリを用いた実験の設定と結果、知見を報告し、最後に 7 章で本研究の成果をまとめ、今後の課題を述べる。

²なお、仮説や経験則を AI に反映させる場合でも、データの観察から仮説を導く場合もあり、人間のゲームプレイデータの重要性は依然として高い。

³Antoine Bauza がゲームデザインを行い、CocktailGames[9]、Les XII Singes[10] 社が発売しているボードゲーム。ルールや特徴を 2 章で概説する。

第2章 Hanabiについて

Hanabi は Antonie Bauza 氏がゲームデザインし、Cocktail Games 社 [9], Les XII Singes 社 [10] によって販売されているボードゲームである。2013 年にはドイツの年間ゲーム大賞 [13] を受賞し、オンラインゲームサイト [14] も含めたコミュニティも存在することから、人気のあるボードゲームといえる。本章では Hanabi のルールと特徴を述べた後、Hanabi の研究利用について言及する。

2.1 Hanabi のルール

本節では、公式ルールブックに基づいて Hanabi のルールを説明する。この説明に拡張ルールは含めない。

2.1.1 概要と目的

Hanabi は 2~5 人プレイのゲームで、各プレイヤーは 5 色（赤、白、緑、黄、青）に塗り分けられた 1 から 5 の番号が書かれたカードを手札として持ち、順番に場に出していき、特筆すべきは、図 2.1 のように各プレイヤーは自分の手札を「自分から見えない」ように持つため、自分の手札だけが見えず、自分以外のプレイヤーの手札が見えている状況となることである。ゲームの目的は、全プレイヤーで各色ごと昇順連番（ $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ ）のスタックを完成させることである。ここでいうスタックとは、カードを昇順連番に重ねたものであり、一番上に一番大きな数字が重ねられる。例えば、図 2.1 のように青のカードが $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ まで出ている場合「青のスタックが 3 まで出来ている」といった表現をする。緑のカードの組は 1 つもカードが出ていないため「緑のスタックは出来ていない」と表す。また、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ とすべての数字が出ている場合「スタックが完成する」と表す。

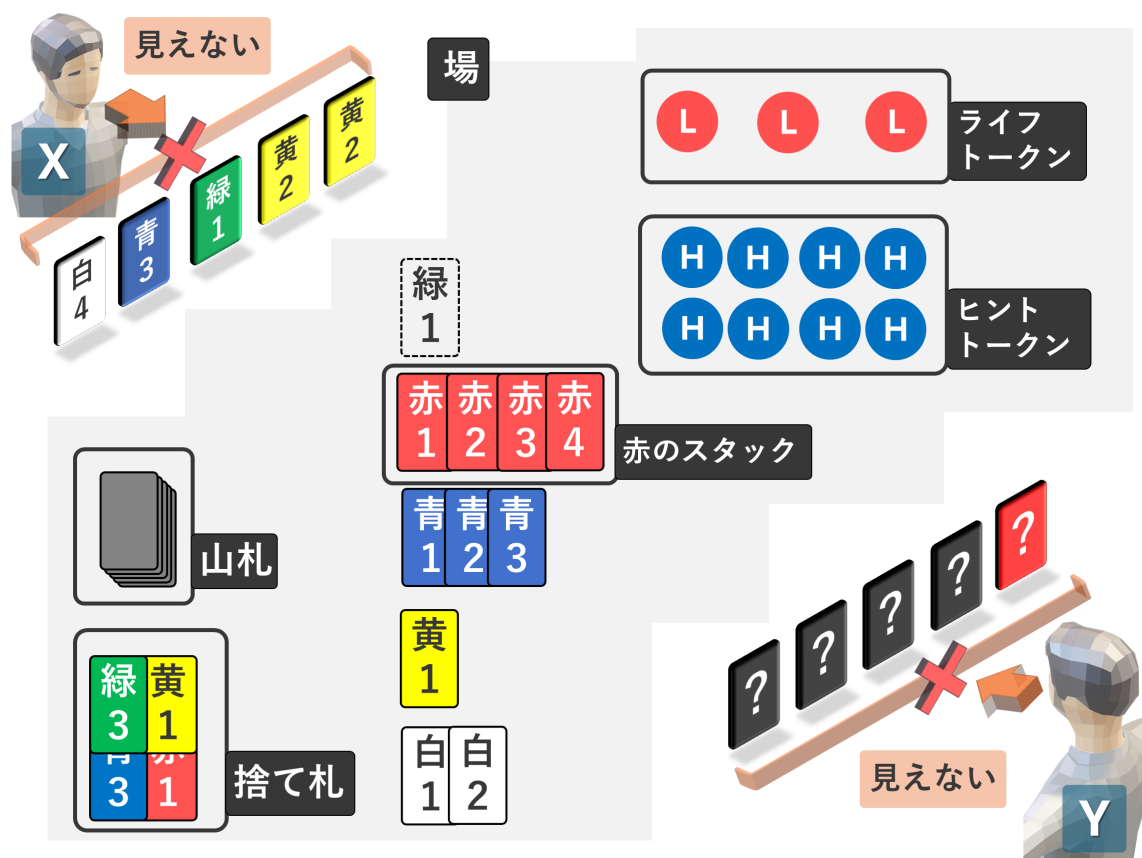


図 2.1: 2 人プレイ Hanabi の手札の持ち方と場のイメージ

2.1.2 事前準備

まず、ヒントトークン（青）8つ，ライフトークン（赤）3つが共有物として与えられる．次に50枚の花火カードがシャッフルされ，裏向きの山札となる．50枚の山札の内訳は各色10枚，1が3枚，2,3,4が2枚，5が1枚である．5色（赤，白，緑，黄，青）に塗り分けられた1から5の番号が書かれたカードが花火カードであり，本論文では単にカードと呼び，色つきの数字が書かれたカードの面を表面，そうでない面を裏面とする．

最後にプレイ人数に応じて各プレイヤーに手札としてカードが配られ，事前準備は完了する．2～3人プレイであれば各プレイヤー5枚ずつ，4～5人プレイであれば4枚が配られる．このとき，各プレイヤーは自分に配られたカードを自分で見てはならず，図2.1のように他プレイヤーだけが自分のカードを確認できるように，カードの裏面が自分に向き，表面は他プレイヤーに向けられる．

2.1.3 ゲームの進め方

手番は時計回り順に進行する。各プレイヤーは自分の手番で「ヒントを与える」「カードを1枚プレイする」「カードを1枚捨て札にする」の3つのアクションから1つを選択して行動する。パスはできない。以下3つのアクションそれぞれについて述べる。

ヒントを与える：他プレイヤー1人の手札に対し、色か数字どちらかのヒントを与える。例えば図 2.2 では、「君はここに緑のカードを持っているよ」と色の情報を1色だけ教えている。このとき2枚ある緑のカードのうち片方だけを緑であると伝えることはできず、ヒントを与える対象のプレイヤーが持つすべての緑のカードについて情報を伝えなくてはならない。また、図 2.3 では、「君はここに4のカードを持っているよ」と数字の情報を1つだけ教えている。色か数字どちらかのヒントを与えるたびにヒントトークンを1つ消費する。ヒントトークンが存在しない場合、ヒントは出せない。なお、このアクション以外にプレイヤー間でコミュニケーションをとってはならない。



図 2.2: 緑のカードを指し示す例



図 2.3: 4のカードを指し示す例

カードを1枚捨て札にする：手札からカードを1枚、捨て札にし、山札から1枚カードを引く。このとき、ヒントトークンを1つ回復する。捨て札は表向きに山にして置かれ、そのゲーム中2度と使うことはできない。ただし、自分を含めた全プレイヤーは山を崩して捨て札をいつでも見ることができる。

カードを1枚プレイする：手札からカードを1枚、表向きに場に出す。出したカードの色と同色のスタックに対し、数字が昇順連番になっていれば、そのカードをスタックに加える。ある色のスタックができていない場合、数字は1から開始する。そのときもし、スタックが完成、すなわち5のカードをスタックに加えられたならば、ヒントトークンを1つ回復する。回復可能なヒントトークンがない場合、この回復は行われず。各プレイヤーは自分の手札が見えず、プレイするまで自分のカードの色と数字が何かは明らかではないので、必ずしも出したカードをスタックに加えられるわけではない。本論文では場に出したカードをスタックに加えられた場合プレイ成功、そうでない場合をプレイ失敗、と呼ぶ。例えば図2.1であれば、プレイヤーXは黄の2もしくは緑の1を場に出した場合、プレイ成功となる。前者は場にある黄のスタックに加え、後者は緑のスタックを作り始めることになる。一方、白の4もしくは青の3を場に出した場合、場にある白のスタックもしくは青のスタックに対し昇順連番になっていないため、プレイ失敗となる。プレイに失敗したプレイヤーは場に出したカードを捨て札にし、ライフトークンを1つ失う。

2.1.4 終了条件と得点計算

ゲームは「ライフトークンを3つ失った場合」「5色すべてのスタックが完成した場合」「山札の最後の1枚のカードが引かれた後、この手番を除き、最後のカードを引いたプレイヤーも含めた全プレイヤーが1回ずつ手番を完了した場合」の3条件のどれかを満たした時点で終了する。

ライフトークンを3つ失った場合、その時点でゲームは終了し、得点計算は行われずプレイヤーチームの負けとなる。ただし、実際にHanabiが遊ばれる際や、Hanabiの研究ではこのルールを無視して得点計算する慣例があるため、本論文もこの慣例に従う [15, 16]。5色すべてのスタックが完成した場合もその時点でゲームは終了し、プレイヤーチームの勝利となる。

山札の最後の1枚が引かれた場合は、最後の1枚を引いて完了した手番を除き、最後のカードを引いたプレイヤーも含めて、各プレイヤーは1回ずつ最後の手番を行った後ゲームを終了する。このとき、山札は残っていないため最後の手番ではカードを引くことはできない。

ゲームの得点は各色のスタックの最大値の和で計算され、図 2.1 の状態でゲーム終了したとすると、各色のスタックが赤が 4、白が 2、黄が 1、青が 3 まで完成し、緑は 1 つも完成していないので、10 点である。満点は 5 色すべてのスタックが 5 まで完成した状態で、25 点となる。

2.2 Hanabi の特徴

2.2.1 スタック完成のための限られた情報伝達

各プレイヤー間でお互いの手札にヒントを出し、自分の手札の内容を把握しつつスタックを完成させていくのがゲームの基本的な流れである。しかし、ヒントトークンが限られているため、自分たちの手札すべての数字と色を明らかにしながらゲームを進行することは難しい。

このような背景から、限られたヒントトークンでより効果的に情報を伝えることが求められる。複数のカードの色か数字を 1 度に教えることで効率化を図ることができる。しかし、Hanabi における情報の有用性はその時々によって異なるため、高得点を目指すためには時と場合に合わせ、有用性も考慮しながら情報を伝えていく必要がある。例えばゲーム開始時、まだ場にいずれの色のスタックも完成していないとき、黄 4、赤 1、赤 3、赤 3、赤 4 という手札を持ったプレイヤーに情報を出すことを考える。ここで赤色のカードを 4 枚持っていることを伝え、数字が 1 であることを伝えるよりも多くの情報を伝えることができる。しかし、後者の場合は赤の 1 がすぐにプレイできることを伝えることができるため、短期的に見た場合の有用性は大きい。この例のように、どのカードが 1 であることを教えることから始まるゲームが多い。

また、自分の手札から捨て札にしてもよいカードを判断しそれを捨てることで、ヒントトークンの回復を行うことも有効である。すでに場に完成しているある色のスタックの数字以下のカードは、もうスタックの作成に使わないカードであるためこちらは確実に捨て札にしてもよい。また、ある色と数字のカードが複数枚残っていることが分かっている場合、時に捨て札にする選択肢もとれる。例えば同色の 1 のカードは 3 枚あり、1 枚捨てても残る 2 枚でその色のスタックを作ることができるため、捨て札にする選択肢に入る。逆に、ある色と数字が 1 枚しか残っていないカードを捨てると、以降のスタックの作成ができなくなる。例えばすでに青の 3 のカードが 1 枚捨てられている状態で、残り 1 枚の青の 3 のカードを捨ててしまうと青のスタックは 3 以上作ることができなくなってしまう。したがって、ある色と数字が 1 枚しか残っていないカードを持っているプレイヤーにそのカードの情報を与え、捨て札にすることを予防することがある。

2.2.2 暗黙的コミュニケーション

Hanabi における明示的なコミュニケーションは、ルール上ヒントを与えるアクションに限定されるが、そのアクションがそれ以上の意味を持つ場合もありうる。例えば、場に赤色のスタックが1まで出来ており、ほかの色のスタックは1つも出来ていない状況で、自分の手札に「このカードは2です」という情報が与えられたとする。ここで、ほかの色か数字の情報を与える選択肢があったにもかかわらず、それらを選ばずに「2である」という情報を与えた合理的理由について考える。相手が効果的にヒントを出す前提に立てば、そのカードがプレイ可能であると伝える意図が示唆される。したがって、「2である」という情報を与えたという事実から、そのカードは赤の2でプレイ可能である、という意図推測が可能な場合がある。この例では結果的に、数字だけでなく色の情報まで暗黙的に伝達することができる。このように、あるヒントにより直接的に情報を伝えるのではなく、プレイヤーがヒントの内容を決定した事実そのものを通して情報伝達することを Bard らは *Implicit Communication* と呼んでおり [15]、本論文では暗黙的コミュニケーションと訳して用いる。暗黙的コミュニケーションの存在により、Hanabi は他プレイヤーのアクションから意図を推測したり、逆に他プレイヤーに自らの意図を読み取らせるようなゲームプレイが求められる特徴を持つ。

一方、コミュニティの内部でだけ通用する符牒も存在する。例えば「複数枚に情報出したとき、複数枚のうち1番左にあるカードはプレイ可能であることを意味する」などはオンラインで Hanabi が遊べる Board Game Arena というサイト [14] において用いられ、そのコミュニティでプレイする上での暗黙の了解となっている場合がある。このような情報の送り手、受け手の双方になんらかの合意がないと通じないような情報伝達をよしとするかは議論の余地はあるものの、現に用いられている暗黙的コミュニケーションも存在する。

またルール違反ではあるが、実際のゲームではゲーム外要素を用いた暗黙的コミュニケーションも行われることがある。ハンドサイン、アイコンタクト、プレイタイミングなどになんらかの意味を持たせることもでき、実際に Hanabi のゲームプレイにおける目線の動きを分析する研究もおこなわれている [17]。

上記のゲーム外要素を用いたコミュニケーションを除けば、Hanabi はコミュニケーションがゲーム内要素に限定できる。手札、捨て札、アクションといったゲーム内要素は、記号や数字といった形式に変換可能である。これにより、意図推測を伴う暗黙的コミュニケーションを自然言語を介さず、コンピュータで扱いやすい形式で記述できるのも Hanabi の特徴である [18]。

第3章 関連研究

1章でも触れたように、ゲームAIはチェス、囲碁、将棋、ポーカーといったゲームでプロプレイヤーに勝ち越すような強さを持つ。これらのゲームと異なり、協力ゲーム Hanabi は以下の3つの特性を併せ持つ研究題材として注目されている。すなわち、(1) プレイヤが協力関係にあること、(2) 自分の手札が見えない不完全情報性を有すること、(3) 2章で述べたようにプレイヤ間で意図推測が求められることである [15]。

Hanabi のゲームAI研究では、研究者自身が提案したアイデアを実装したAIプレイヤーと他の（人間やAI）プレイヤーとで複数回ゲームプレイを行い、得られた平均得点によりその性能を評価することが多い。なお、Hanabi は2～5人でプレイ可能だが、多くのゲームプレイ実験が2人プレイで行われている¹。本節で述べる得点は、特に言及がなければ2人プレイで、複数ゲームを行った場合の平均得点を意味するものとする。2人プレイでペアとなる相手は、同じAIプレイヤー、異なるAIプレイヤー、人間プレイヤーの3つに分けられ、Siu らはこれを Self-Play (SP), Cross-Play (CP), Human-Play (HP) として区別しており [11]、本論文でもこの呼称に従う。ただし、ゲームプレイ実験のゲーム数やCPで相手となるAIプレイヤーの種類など、実験条件は統一されておらず得点は単純には比較できない点には注意が必要である。

確認される限り最初の Hanabi のゲームAI研究は、2015年の大澤によるものである。他プレイヤーの行動から自分の手札を推測するAIプレイヤーの提案で、SPで15.85点を報告した [19]。ここから研究は進んで、2018年にゲームAI研究を中心に扱う国際学会 IEEE Computational Intelligence and Games 2018 (IEEE CIG2018) [20, 21] でAIプレイヤーの競技会が開かれた。SP, CPの2部門に分けて実施されたが、両部門ともに Goodman らの RIS-MCTS [22] というアプローチを用いたAIプレイヤーが優勝した。得点はSPが20.57点、CPが13.24点が報告されている。

また近年は、事前にSPを何度も繰り返し行い、試行錯誤を通じて最適な行動を選択するための方策をAIプレイヤーに学習させておく、強化学習という手法もとられるようになった。2019年に Bard らにより強化学習を用いるAIプレイヤー実装の

¹その理由について特に言及された文献は見つかっていないが、3人以上のゲームプレイは複雑性が増すことに加え、2人プレイという同一条件での比較を行うためではないかと考える。

ための環境（プログラム群）が公開 [23] されて以降，このアプローチを採用した AI プレイヤは盛んに研究されるようになった．現在 SP, CP, HP で最高得点が報告されている AI プレイヤたちも，この環境で作られたものである．SP で最高得点を報告した Lerer らの SPARTA[24] は，25 点満点中 24.60 点と，満点に近い記録を報告している．

一方，従来の強化学習では繰り返し SP を行い試行錯誤するため「2 枚にヒントを出したとき，1 枚目のカードが場に出せる」といった，2.2.2 項で述べたような同じ AI 同士でのみ通じる方策を身に付けてしまう場合がある．このような方策は，CP では相手プレイヤが偶然類似した方策を採用している場合を除き，基本は通用しない [11]．Bard らは CP における良い戦略とは，その AI プレイヤ固有のものではなく，相手 AI プレイヤの行動から意図を読み取り，可能な限り幅広い戦略に適應するものであると述べている．加えて CP 時の AI プレイヤの性能も，多様な戦略をもつよう構成された複数の AI プレイヤを相手にしたときの得点で評価すべきとしている [15]．このような背景がある CP では，Hu らが未知の相手プレイヤとも協力できる AI を構築することをコンセプトに Other-Play という学習アルゴリズムを提案，CP で 22.50 点を報告しており [25]，これが CP の最高得点となっている．

上記のように，SP, CP では 20 点以上の得点が報告されている一方，HP は先ほど触れた Other-play が 15.80 点を報告している以外には Eger らの Intentional AI[16]，Liang らの Implicature[26] が 15.00 点を報告しており，人間の上級者同士の得点を考えればまだ改良の可能性が残されている．また，これまで紹介したアプローチとは別方向で人間を意識した研究も存在し，大規模言語モデル (LLM) を用いたもの [27] や，思考時間に着目したもの [28]，視線というゲーム外要素に着目した研究もおこなわれている [29]．しかし，Siu らは HP は多大な時間と労力がかかるため実施自体が珍しいものである，と述べており [11]，この点は著者の調査範囲でも同様の結論である．また，川越らも同様の問題を指摘しており，認知アーキテクチャ ACT-R を用いた AI プレイヤにより，人のふるまいを再現しこの問題を解決しようと試みている [12]．このように，HP は AI プレイヤだけで済む SP, CP と比較して大きな時間と労力がかかり，提案アプローチの有効性検証のサイクルも回しにくく研究が進みにくい背景があると考えられる．

第4章 Hanabi アプリの機能と提案

3章で述べたように、Hanabi のゲーム AI 研究には Human-Play, すなわち人間相手のゲームプレイの領域で改良の可能性が残されているものの、人がかかわる被験者実験には時間と労力がかかるため、その研究は盛んにおこなわれてはいない。被験者実験のために設計されたプラットフォームも確認できない。網羅的なサーベイにもとづくものではないが、このような問題はほかのゲーム AI 研究でも同様にいえると思う。そこで本章ではなぜ被験者実験には時間と労力がかかるのか、理想的にはどうあってほしいか、その理想状態を実現するためにはどのような機能を持つソフトウェアがあればよいか、といったことを検討する。そして Hanabi を題材に、そのような機能をもつアプリケーションを試作することにする。最後に問題解決に必要かつ実現可能な機能に絞り込んだものとして、プロトタイプ「Hanabi アプリ」を提案する。

4.1 被験者実験の問題とその原因

被験者実験には時間と労力がかかるとされるが、その原因はいくつか挙げられる。なお、以降の記述は実験室に被験者を集め、対面で実験実施することを想定する。

被験者の確保が難しい：ゲーム AI 研究に限った話ではないが、十分な被験者数の確保が難航することは珍しくない。被験者と研究者の間でスケジュール調整が必要で、被験者の都合が合わなければ実験の参加は難しくなるし、スケジュール調整を含む手続きが面倒であること、実験室に足を運ぶこと、人と出会うことなどが実験参加への心理的障壁となる場合もある。結果として、研究で求める特定の条件（例：経験者であること）を満たす被験者を十分に確保できず、その条件を緩和せざるをえないか、少ない被験者で実験を行わざるをえないこともある。

現実的な時間で集められるゲーム数が少ない：従来、よく行われてきた AI プレイヤだけで完結する実験（Hanabi のゲーム AI 研究であれば、SP、CP）で 1000、10000 ゲーム実施する場合と比べると、人間相手の被験者実験は現実的な時間で集められるゲーム数が少ない。例えば、1 回のプレイ時間が 10 分程度のゲームで

あれば、1時間の実験で6ゲームしか得られないうえ、休憩時間や説明時間も含めると、正味の実験時間はさらに長くなる。研究者もその間実験の監督などを行う必要があり、時間的拘束が発生する。結果として、1回の被験者実験で収集できるゲーム数には限りがあり、何かを主張するに十分な量のデータを集めることができないこともある。

GUIの準備が必要：GUI (Graphical User Interface; GUI) の準備も手間と時間のかかる作業である。実験をスムーズに進めるためには、直感的に操作しやすいインターフェースを設計する必要がある、もし不備などがあった場合被験者が操作に戸惑い、得られたデータに余計な交絡要因が混じる恐れがある。そのため、事前に十分に時間をかけて開発とテストを行うことが望ましい。しかし、ゲーム AI 研究では、研究者の関心は主に提案したアイデアやアルゴリズムを適用した AI プレイヤの開発にあり、GUI の準備というのはできるなら避けたいステップである。

4.2 理想的な状態

被験者実験には時間と労力がかかる原因として 4.1 節で述べたようなものが挙げられる中、理想的にはどうあってほしいかという状態について、各理由に対応する形で述べる。

被験者の確保が難しい、現実的な時間で集められるゲーム数が少ない：これらの原因の解決策の 1 つとして、プレイヤが遊ぶだけでデータを収集できる仕組みが有効であると考えられる。例えば、チェスの Lichess や囲碁の KGS では、既存のオンライン対局サーバが稼働しており、世界中のプレイヤがアクセスして対局を行い、そのデータが蓄積される仕組みが確立されている。このような環境を活用すれば、研究者が個別に被験者を募集する負担を軽減できる。さらに、対局サーバに研究者が自作した AI プレイヤを導入できれば (Lichess と KGS はこれが可能である)、人間と AI プレイヤの対局データを自動的に収集することも可能となる。これにより、研究者は自らサーバを運営することなく、多様なプレイヤとのゲームデータを集めることができる。一方で、このような環境を利用できない場合、研究者自身がサーバを設置する選択肢もある。この場合、対局環境や収集データのフォーマットを自由に設定できるため、特定の実験目的に適したデータを収集することが可能となる。

GUIの準備が必要：被験者や研究者が容易に利用・編集でき、標準的な AI プレイヤの入出力フォーマットに則った AI プレイヤが動作する GUI が公開されていれば、この問題の解決につながる。特に、GUI をゼロから開発することは労力がかかり、既存のソフトウェアを活用できる環境が望ましい。例えば、2024 年 6 月

に公開された将棋アプリ ShogiHome[30] は、将棋の AI プレイヤとの対局や棋譜解析が可能な GUI を提供している。このアプリは、AI プレイヤが対局アプリと連携するための USI プロトコルに対応し、Windows, macOS, Linux の各 OS で動作する。また、PC, スマートフォン, タブレットといった多様なデバイスでも扱いやすい画面設計がなされている。さらに、ShogiHome はオープンソースで公開されており、研究者は必要に応じて拡張機能を追加し、配布することが可能である。このように、被験者が操作しやすく、研究者が編集しやすい GUI を備えたソフトウェアがオープンソースで提供されることが望ましい。そのような環境が整えば、研究者は標準的な AI プレイヤの入出力フォーマットに準拠した AI プレイヤを用意するだけで、被験者実験を容易に実施できるようになる。

4.2.1 そのほかの理想的な状態

被験者に時間と労力がかかることに直接関係しないが、理想的な状態に含まれるものをここに述べる。

AI プレイヤの統合：既存の有名な AI プレイヤがすでにコード化され、GUI に組み込まれていることが望ましい。これにより、研究者は論文からコードを再現したり、移植したりする手間を省くことができる。

ゲーム環境の標準化：ゲーム環境の標準化が進めば、統一された環境で対戦が行えるため、実験結果の再現性も向上し、異なる研究間の結果の比較が容易になる。

ゲーム環境のプレイ形式の柔軟性：ゲーム環境は、ゲームの特性や研究の目的に応じて、人同士の対戦、人と AI プレイヤの対戦、複数プレイヤでのプレイなど、さまざまなプレイ形式を選択できる状態であることが望ましい。

レーティングシステム：実力の近いプレイヤ、もしくは AI とゲームプレイすることにより、プレイヤの体験を向上させる。これによりゲームプレイ数、および集まるデータも多くなることが期待できる。また、レートごとのデータを用いて機械学習モデルを作るなど、レートの情報を用いたデータの利用が可能になる。

多言語対応：利用可能なプレイヤの母数が増える。同様に、ゲームプレイ数、および集まるデータも多くなることが期待できる。

4.3 求められる機能

理想状態を実現するためにはどのような機能を持つソフトウェアがあればよい
か、その機能を「実験実施に関する機能」「データ収集・解析のための機能」「ゲーム AI 研究者向けの機能」「ユーザ体験向上のための機能」に分類し、それぞれについて各機能の目的と意義を簡潔に述べる。

実験実施に関する機能

- **実験同意取得**：実験参加にあたる注意事項などについて被験者に同意を求める機能。
- **プレイ時間の記録**：各ゲームや各行動の所要時間を記録し、プレイヤの行動分析や謝金の手続きに用いる。
- **持ち時間設定機能**：一定時間内に手を決めるルールを設定する。
- **アンケート機能**：ゲーム終了後にプレイヤにアンケートを実施し、主観的評価を収集する。
- **ログイン/ログアウト機能**：個々のプレイヤのデータを適切に管理する。

データ収集・解析のための機能

- **プレイログの記録・見返し**：すべてのゲームの盤面遷移や思考時間を含めた行動履歴を記録し、後から分析できるようにする。
- **データベース機能**：収集したプレイログやアンケート結果を保存し、検索・解析できる形で管理する。
- **seed 値の固定**：再現性のある実験を行うために、同じ状況を再現可能にする。
- **盤面解析・形勢グラフ**：プレイヤの行動傾向を視覚的に把握するためのツール。

AI 開発者向けの機能

- **AI のアップロード・動作チェック**：研究者が開発した AI をシステムに登録し，動作確認できる機能．
- **標準的な AI の入出力フォーマット対応**：AI プレイヤを容易に統合できるようにする．
- **AI 同士の対戦機能**：AI プレイヤ同士の対戦を可能にし，評価実験を行えるようにする．

ユーザ体験向上のための機能

- **マルチデバイス対応・レスポンシブデザイン**：PC・スマートフォン・タブレットなど，多様なデバイスで快適にプレイできる環境を提供する．1つのレイアウトであらゆる画面サイズに対応するレスポンシブデザインを採用し，異なる画面サイズや縦横比に応じてレイアウトを柔軟に調整することで，一貫した操作体験を実現する．1つのレイアウトだけの準備でよいので開発・保守の負担も軽減する．
- **チュートリアル機能**：初めてプレイするプレイヤ向けに，ゲームのルールや操作方法を説明する機能．

ただし，Lichess や KGS のようなオンライン公開型のソフトウェアと，実験用の GUI ソフトウェアでは，求められる機能が異なる．例えば，実験用ソフトウェアではデータ収集や解析が重視されるのに対し，オンライン公開型では継続的なプレイを促すためにユーザ体験の向上が重要となる場合がある．

実験実施に関する機能は，研究者が実験を計画・遂行するうえで重要となるが，オンライン公開型では必須とは限らない．また，データ収集・解析のための機能は，実験では不可欠である一方，オンライン公開型ではプレイログの蓄積やデータ解析に活用できるものの，実験ほど厳密な管理は求められない．AI 開発者向けの機能についても，オンライン公開型では AI のアップロードや動作確認が求められるのに対し，実験では研究者が事前に動作確認した AI を使用することが多いため，必須とはならない．さらに，ユーザ体験向上のための機能については，オンライン公開型ではプレイヤの継続的な利用を促すために重要となるが，実験では最低限の GUI があればよいとため，優先度は低い．まとめると，オンライン公開型と実験用のソフトウェアでは，求められる機能の優先度や必須性が異なり，目的に応じた適切な設計が重要となる．

4.4 機能の限定

前述の機能の中から、問題解決に必要最小限かつ実現可能な機能に絞り込み、これらの機能を持つソフトウェアをプロトタイプ「Hanabi アプリ」として提案する。より重要な実現可能性の検討として、Hanabi の権利者への相談とその結果を報告し、その後プロトタイプ「Hanabi アプリ」の機能について述べる。

4.4.1 Hanabi 権利者への問い合わせ

オンライン公開型のソフトウェアの可能性を探るため、Hanabi の権利者の 1 人で Hanabi のゲームデザイナーである Antoine Bauza 氏と連絡を取り、Hanabi をプレイ可能な環境を全世界的に公開する行為の是非について問い合わせを行った。結果、Hanabi をインターネット上で無料でプレイ可能な形で提供することには懸念があるとの回答を得た。このため、本研究ではそのような提供を行わないようにするとともに、Hanabi アプリの機能として、実験用 GUI ソフトウェアとしての側面を重視することにした。一方、上記のような利用をしない場合、研究目的での利用に問題がない旨の返事を得ることができた。これは Hanabi のゲーム AI 研究者にとって、肯定的な結果である。

4.4.2 プロトタイプ「Hanabi アプリ」の提案とその機能

実験用 GUI ソフトウェアとしての側面を重視するため、実験実施に関する機能、データ収集・解析のための機能を第一優先に、AI 開発者向けの機能を第二優先として、問題解決に必要最小限な機能に絞り込んだ。その後、実装時間や技術の都合も検討した結果、AI と人間がゲームプレイする形式に限定し、プレイヤ数は 2 人に制限したうえで、以下まで機能を絞り込んだ。本研究では、以下の機能を持つソフトウェアをプロトタイプ「Hanabi アプリ」として提案する。なお、各項目の説明については 4.3 節と重複するため省略する。

実験実施に関する機能

- 実験同意取得
- プレイ時間の記録
- 一手の持ち時間設定機能（一定の固定時間のみ）
- アンケート機能
- ログイン/ログアウト機能

データ収集・解析のための機能

- プレイログの記録
- データベース機能
- seed 値の固定

AI 開発者向けの機能

- 標準的な AI の入出力フォーマット対応
- CUI インターフェースによる AI 同士の対戦機能

ユーザ体験向上のための機能

- マルチデバイス対応・レスポンスデザイン

4.3 節で述べたもののうち、盤面解析・形勢グラフ機能、チュートリアル機能、およびプレイログの見返し機能の実装を見送った。いずれも開発期間の制約上、実装が困難であると判断したため、とくにプレイログの見返し、盤面解析・形勢グラフ機能は、専用のビューアの実装が必要であることが断念する理由となった。

ここまでの機能のなかでも、研究者がサーバを立ち上げることで、被験者は自分の都合の良い時間にオンラインで AI プレイヤと Hanabi をプレイし、アンケートに回答できることに重点をおく。これにより、時間や場所の制約を緩和しつつプレイデータ収集を効率化することを基本的な方向性とする。

第5章 Hanabi アプリの実装

本章ではプロトタイプとして実装した Hanabi アプリについて，動作を画面遷移と共に説明後，システム構成と搭載 AI の仕様について述べる．また，研究者視点で重要な機能をピックアップし紹介後，残った今後の実装課題について述べる．

5.1 動作と画面遷移

実験では，被験者に Hanabi アプリにアクセス可能な ID とパスワードを配布し，実験説明と事前アンケートを実施した後，最低2時間のゲームプレイを行い，各ゲーム終了後にアンケートに回答してもらう．本節ではこの流れに沿って Hanabi アプリでの動作を各種画面と共に説明する．詳細な実験の流れや，各種説明項目などは6.1節に後述するものとする．なお，Hanabi アプリは Web ブラウザさえ用意できれば，PC，スマートフォン，タブレットのいずれのデバイスでも動作する．画面遷移は縦長の画面比で記載するが，横長の画面比になった場合も基本表示は変わらない．

5.1.1 ログイン画面

事前発行した URL¹に本学ネットワーク内からアクセスすると，図5.1のようなログイン画面が出現する．被験者は事前配布された ID，パスワードを用いて Hanabi アプリにログインしホーム画面に遷移する．

¹今回は，本学情報社会基盤研究センターに申請を行い，本学ネットワークからのみアクセス可能な URL を発行してもらった．

5.1.2 ホーム画面

図 5.2 に示すホーム画面には上から順に以下の要素がある。

- 被験者の累計ゲームプレイ時間（時間，分，秒表記）
- 実験説明画面遷移ボタン
- 事前アンケート回答画面遷移ボタン
- ゲーム開始ボタン
- AI プレイヤの情報，実験実施日時，謝金給付条件についての記載（付録 A）
- ログアウトボタン

被験者はここから各種画面に遷移して，実験への参加同意と事前アンケート回答を済ませ，ゲームをプレイする．この流れを守ってもらうため，実験への参加同意と事前アンケート回答が済んでいない場合ゲーム開始ボタンは押せないようになっており，誤った実験進行を系統的に予防している．また，被験者自身の累計ゲームプレイ時間が確認できるようにしており，被験者はこの時間を見つづ，少なくとも 6.1.2 節で述べる謝金給付条件を満たす時間（2 時間）までゲームプレイを行う．

5.1.3 実験説明

被験者は図 5.3, 図 5.4 の画面で実験参加にあたる各種説明を読み，画面末尾の「同意して送信」ボタンを押して同意をする．説明を適切に読んでもらうため，適度に区切った各画面末尾に確認用チェックボックスを設置している．記入がないと次画面に進めず，全画面のチェック完了がないと「同意して送信」ボタンを押せない仕様である．また，初回の説明以降も，ホーム画面から再度この画面に遷移し内容をいつでも見返すことができる．

**Hanabiアプリ
ログイン**

ユーザー名:

パスワード:

ログイン

図 5.1: ログイン画面

Hanabiアプリへようこそ, HPL00015!

ゲームプレイ時間: 0秒

実験説明

事前アンケート

ゲーム開始

- 異なるアルゴリズムで動作する2種類のAIがいます。それぞれ alpha, beta で誰
- ...

ログアウト

図 5.2: ホーム画面

**プレイデータ・アンケート結果
収集実験に関する説明**

研究課題名

**協力ゲームHanabiにおけるユーザーが
遊ぶだけでプレイデータ収集ができる
ゲームアプリの提案**

- 本資料は、本実験の公正・安全な実施のため、実験に参加いただくみなさん（以下、対象者）に研究計画や、個人情報とデータの取り扱いなどについてご説明し、実験参加への同意をいただくことを目的とするものです。
- 本資料によく目を通し、内容を確認してください。
- 内容理解の確認、および実験参加への同意をフォームで回答いただきます。
 - 回答いただけない場合、本実験への参加はできませんのでご了承ください。

図 5.3: 実験説明画面冒頭

や、分析などに活用されることを想定しています。

- 研究利用目的データに紐づけられた対象者IDは、ランダムなIDに置換したうえでインターネット上での公開を行います。
- 個人を特定できる情報は公開されません。

理解した項目に、チェックを入れてください。

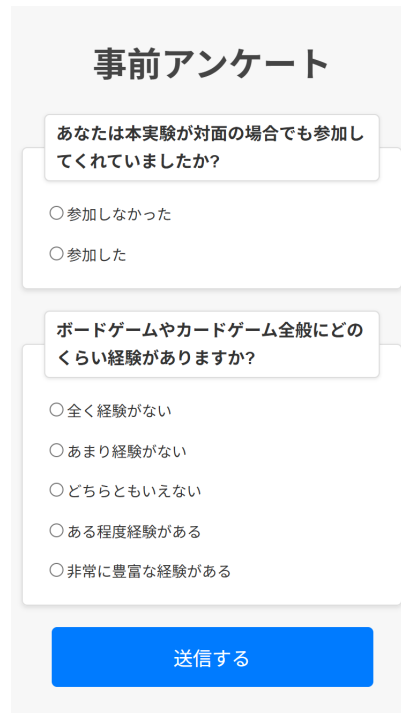
- ☒ 提供を受けたデータ等処理の匿名化の方法
- ☒ データの保管・管理について適切になされること
- ☒ 研究利用目的データが適切な時期にインターネット上で公開されること

前へ **次へ**

図 5.4: 実験説明画面末尾

5.1.4 事前アンケート画面

被験者は図 5.5 の画面でボードゲームの経験などを問う事前アンケート（付録 C）に回答する。未回答を防ぐため、全項目に回答しないと回答を送信できないようにしている。追加質問が登録されていれば、特定の回答をしたときに追加質問が出現する。例えば、ボードゲームの経験がある場合、そのあと実験対象のゲームについての経験などを問うことができる。



事前アンケート

あなたは本実験が対面の場合でも参加してくれましたか？

☐ 参加しなかった

☐ 参加した

ボードゲームやカードゲーム全般にどのくらい経験がありますか？

☐ 全く経験がない

☐ あまり経験がない

☐ どちらともいえない

☐ ある程度経験がある

☐ 非常に豊富な経験がある

送信する

図 5.5: 事前アンケート回答画面

5.1.5 ゲームプレイ画面

図 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 に示すゲーム画面で被験者は AI プレイヤと Hanabi をゲームプレイする。以下では特徴的な UI 要素だけ簡単に説明する。

画面上部に相手となる AI プレイヤの名前と手札があり，下部は自分の見えない手札が表示される。カードはボタンになっており，ボタンを選択（タップもしくはクリック）することでそのカードをプレイするか，捨てるか選ぶことができる（図 5.7 の画面両脇に出現したボタン）。相手のカードを選択した場合は，そのカードに色のヒントを出すか，数字のヒントを出すか選ぶことができる（図 5.8 の画面

両脇に出現したボタン)。画面両端に出現するボタンを選択するとその手番のアクションが確定し、相手 AI プレイヤの手番に移る。

各カードにはそのカードに出たヒントの情報が「色²，数字」のフォーマットでタグに記載される。例えば，図 5.6 の状態では相手 AI プレイヤ Alpha から，数字が 1 のヒントを受けた結果，相手 (人間プレイヤ) の左から 5 番目のタグが「?, ?」から「?, 1」という表記になる。画面中央部には以下要素が表示される。

赤色の四角形：ライフトークン数 (LIFE)

3 つあるライフトークンの残数を示す。

青色の四角形：ヒントトークン数 (HINT)

8 つあるヒントトークンの残数を示す。

茶色の四角形：山札枚数 (DECK)

40 枚ある山札の残数を示す。

灰色の四角形：一手の制限時間 (TIME, CNT)

一手の制限時間を示す。1 秒ごと時間 (TIME) が減っていき，1 回制限時間を超過するとカウント (CNT) が 1 増える。一手の制限時間とその処理については 6.1.7 項で述べる。

角が丸い四角形：各色のスタック (B, G, R, W, Y)

各色のスタックの最大値を示す。ゲーム終了時にはこれらの値の合計値が得点となる。

黒い四角形：ゲームのログと捨て札の内訳表示

手番ごと各プレイヤがどのようなアクションを行ったのかを示すログを表示する。ダブルタップ (クリック) することで，捨て札の内訳の表示に切り替えることができる (図 5.9)。

²色は UI においてカラーコード的に略記する。青：B (Blue)，緑：G (Green)，赤：R (Red)，白：W (White)，黄：Y (Yellow)



図 5.6: ゲーム画面



図 5.7: 自分の手札選択時



図 5.8: 相手の手札選択時

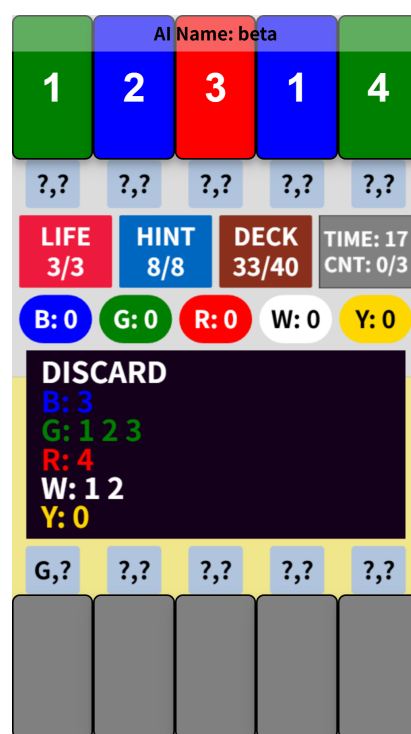


図 5.9: 捨て札内訳表示

5.1.6 ゲームごとアンケート画面

UIについては事前アンケートとほぼ同一であるため記載しない。被験者はこの画面でAIプレイヤーに対する印象などを問うアンケートに回答する。事前アンケート同様未回答を防ぐため、全項目に回答しないと回答を送信できないようにしている。追加質問が登録されていれば、特定ゲーム数経過時に追加質問が出現する。

5.2 搭載したAI

本節ではHanbiアプリに搭載した2つのAIプレイヤーAlpha, Betaのアルゴリズムについて説明し、この2つのAIプレイヤーのSP (Self-Play, 同じAI同士), CP (Cross-Play, AlphaとBetaの協力)の結果を述べる。また、アルゴリズムの説明については簡単化のために2人プレイに限定して述べる。

本節で用いるカードの言葉の定義を事前に説明する。**プレイ可能カード**: プレイしたとき、プレイ成功するカード (場にあるスタックに昇順連番につなげる形で追加できるカード)。**廃棄可能カード**: あるカードがそのゲームにおいてプレイ可能カードにならないカード。2.2.1項で述べたように、色ごとに場に出ている数以下のカードは捨てることができ、これらは廃棄可能カードである。**廃棄候補カード**: そのカード以外で、色と数字が同じカードが捨て札以外にまだ存在していると分かっているカード。2.2.1項で述べたように、ある色と数字のカードが捨て札以外に残っていることが分かっている場合、時に捨て札にする選択肢もとれる。なお、各色数字が1のカードは3枚あるため2枚まで捨ててもその色のスタックを作成していくことができるが、より安全に数字が1のカードが1枚でも捨てられていれば、それと同じ色の1のカードを廃棄候補カードから除外する。

5.2.1 AIプレイヤー Alpha

ベースラインとなるAIプレイヤーをAlphaとして、アルゴリズムは大澤の提案したInternal-State Strategy[19]を少しだけ工夫したものを用いる。アルゴリズムは以下の通りである。

1. もし自分がプレイ可能カードを持っていれば、それをプレイする
2. もし自分が廃棄可能カードを持っていたら、それを捨てる
3. 相手がプレイ可能なカードを持っており、ヒントトークンがある場合、自分はそのカードの属性（色または数字）のいずれかを交互に選んでヒントを出す。以前この行動をとっていたときのヒントの種類を記憶しておき、以前に色のヒントを出していれば数字のヒントを、数字のヒントを出していれば色のヒントを出す。初めてこの行動を行うときは、ランダムに選ぶ。
4. ヒントトークンがある場合、自分は相手の手札からランダムに選んだカードの属性（色または数字）のいずれかをランダムに選んでヒントを出す。
5. 自分の手札のカードの中からランダムに1枚選び、それを捨てる。

もともとInternal-State Strategyでは手順3において「相手がプレイ可能なカードを持っており、ヒントトークンがある場合、自分はそのカードの属性（色または数字）のいずれかを選んでヒントを出す。」としていたが、最後の部分を「“交互に”選んでヒントを出す。」に変更した。事前実施した研究室内のHanabiアプリのテストプレイにおいてAlphaの同じヒントを出し続ける行動が不評であり、本番の実験でも被験者の実験参加モチベーションの低下が懸念されたため変更を行った。例えば、相手が手札に青の2のカードを1枚持っており、それがプレイ可能な場合を考える。ヒントトークンが8つある状況で、Alphaは手順3に基づいて青の2について色または数字のヒントを出す。相手が次の手番で別のヒントを出し、手札が変わらなければ、Alphaは再び青の2に対してヒントを出す。このとき、ランダムな選択によって「そのカードは青です」といったヒントを繰り返し出すことがあり、相手には不合理に映り不評の原因となった。そこで、Alphaの内部で以前この行動をとっていたときのヒントの種類を記憶しておき、以前に色のヒントを出していれば数字のヒントを、数字のヒントを出していれば色のヒントを出すようにした。初めて手順3の行動を行うときは、ランダムに選ぶ³。

³前回のヒントを記憶するのは相手の手札にプレイ可能カードがある場合のみで、ない場合は記憶を行わない。したがって後者の状況(4)でランダムにヒントを出す際、同じヒントを出し続ける状況は改善できていない。これは今後の課題とする。

なお、この変更により、相手がプレイ可能なカードを持っている場合に、同じヒントを繰り返す単調な行動は軽減されるものの、3回目以降は再び同じヒントが続く可能性がある。とくにUIの設計によっては、被験者が「そのカードがプレイ可能である」ことに気づかず、適切なアクションを取らないケースがあると考えられる。このような場合、Alphaのヒントの選択ルールをさらに工夫するか、あるいはUI上でプレイ可能なカードに対する認識を助ける仕組みを検討する必要がある。

5.2.2 AIプレイヤー Beta

HPで高スコアを修めているAIプレイヤーをBetaとして、アルゴリズムはEgerの提案したIntentional AI[16]を用いる。アルゴリズムは以下の通りである。

1. もし自分がプレイ可能カードを持っていれば、それをプレイする
2. もし自分が廃棄可能カードを持っていたら、それを捨てる
3. 相手がプレイ可能カードを持っており、ヒントトークンがある場合、自分は相手に後述の「意図的なヒント」を出す
4. 自分の手札のカードの中から「捨てた場合に失う得点をヒューリスティックに計算（後述）、それが最も小さいカード」を1枚選び、それを捨てる。

手順1, 2まではAlphaと同様で手順3, 4が異なる部分となり、以下ではその説明を行う。

意図的なヒント

Intentional AIは出すヒントを決める際、(1) 相手のそれぞれの手札をどうして欲しいか意図の決定、(2) 意図通りの行動をしてくれそうなヒントの列挙、(3) 列挙されたヒントの評価と選択、の手順を踏む。

(1) 相手のそれぞれの手札をどうして欲しいか意図の決定：まず、相手の手札のすべてのカードについて、相手のカードの色と数字、現在の場に出来ている5色のスタックと捨て札を照らし合わせ「プレイ可能カード」「廃棄可能カード」「廃棄候補カード」「保持カード」に4分類する。1つ目と2つ目は5.2節の冒頭で定義したものと同じで、3つ目は数字が5ではなく、かつ捨て札にされていないカードのことを指す。4つ目はいずれの分類にも当てはまらないカードを指す。手続き的

にはプレイ可能→廃棄可能→廃棄候補→保持の順でどの分類か検討し分類を行う。これらの4分類のうち「プレイ可能カード」には「プレイしてほしい」という意図を、「廃棄可能カード」「廃棄候補カード」には「捨ててほしい」という意図を割り付ける。こうして相手のそれぞれの手札をどうして欲しいか意図を決定する。

(2) 意図通りの行動をしてくれそうなヒントの列挙：相手に出せるすべてのヒントについて、それらのヒントを受けた相手がどんな行動をとるか予測し、意図通りの行動をしてくれそうなヒントを選び出し列挙する。まず、相手の手札の1枚のカードCに、あるヒントHを相手に出したとき、相手視点のヒントの知識から持ちうるカードを列挙⁴、これをもとにCをプレイするか捨てるか行動を予測する。例えば場に赤のスタックが1までできているとき、自分は相手の手札のある1枚のカード(C)に対し「2である」というヒント(H)を出したとする。このとき、相手視点Cに出たヒントの知識がまったくなければ(数字も色もなんの情報も相手が知らなければ)、相手視点見えないCに持ちうるカードの候補として各色の数字の2のカードが挙げられる。ここで持ちうるカードの候補の中にプレイ可能な赤の2のカードが含まれれば、相手はCをプレイすると予測とする⁵。相手のヒントの知識は、これまでのゲームで出たヒントから分かるため、このように相手の知識を用いて予測を行う。具体的な予測の手順は以下の通りである。

- (2-a) 相手があるヒントHを受けたとして、相手の手札の1枚のカードCについてのヒントの知識を更新し、相手視点のCの持ちうるカードの候補Lを得る。
- (2-b) Lと場にできている5色のスタックを照らし合わせ、Lにプレイ可能カードが1枚でもあれば「相手はCをプレイするであろう」と予測する。
- (2-c) Lと場の捨て札の内訳を照らし合わせ、Lに廃棄可能カードが1枚でもあれば「相手はCを捨てるであろう」と予測する。

これを相手に出せるヒントすべてについて行う。結果として相手に出せるヒントとそれを受けた相手の行動予測結果のペアができる。続いてその中から(1)でそのカードに割り当て済みの意図(プレイしてほしい、捨ててほしい)と行動の予測結果(プレイする、捨てる)が一致するヒントのみを選び出し列挙する。結果として意図的なヒントの群ができる。

⁴ヒントの知識とは「左から1番目は赤である」といった情報を指し、この例であれば左から1番目に持ちうるカードの候補は赤の1が3枚、赤の2, 3, 4が2枚、赤の5が1枚となる(特に捨て札、スタックにカードはない場合)。

⁵予測にあたってEgerらはGrice's maxims(グライスの協調の原理)を根拠にいくつかの仮定を置いている。ここでは原理の中身までは立ち入らない。筆者の理解にすぎないが、2.2.2節の「このカードは2です」の例示で発生したような意図推測をヒントの出し手と受け手双方が前提とするという理解が直感的である。

(3) 列挙されたヒントの評価と選択：意図的なヒントの群の中から、最良のヒントを出すためにスコアリングを行い、もっともスコアの高かったヒントを選択する。スコアリングは、そのヒントを相手に出したとき、プレイ可能カードをプレイすると予測される場合3ポイント、廃棄可能カードを捨てると予測される場合2ポイント、廃棄候補カードを捨てると予測する場合1ポイントを加点する。このスコアリングは相手の手札にプレイ可能カードと廃棄可能カードが1枚ずつあったときに、プレイ可能カードへの「プレイしてほしい」という意図的なヒントを出すことを優先することを意味する。スコアリングは相手の手札のカード1枚ずつに対して行われ、そのヒントのスコアは手札5枚ぶんのスコアの合計値となる。意図的なヒントの群すべてにスコアリングが終わったら、もっともスコアの高かったヒントを最終的に相手に実際に出すヒントとして決定する。

捨てる場合に失う得点の計算

捨てるカードを選ぶ際、以下のヒューリスティックを用いて失われるであろう得点を概算し、これが最も小さいカードを選んで捨てる。

- 早く役に立つカードは、後で役に立つカードより重要である（緑のスタックが1まで出来ているとき、緑の2は緑の4より価値があるとみなす）
- 保持カードは、廃棄候補カードより価値がある
- 捨てたとき、および5のカードをプレイしたとき、ヒントトークンが回復することは0.5点ぶんの価値があるとみなす

5.2.3 Hanabi アプリ環境における AI 同士のゲームプレイ結果

Alpha と Beta の Hanabi アプリ環境での SP (Alpha 同士, Beta 同士), CP (Alpha-Beta) の結果を表 5.1 に示す. 各 AI プレイヤの組み合わせにおいて 10000 ゲーム実施し, 初期手札や山札をランダムに決定する際の seed 値はゲーム数と同じ整数を使用した (1 ゲーム目なら, seed 値は 1). また, 先手後手は 1 ゲームごとに入れ替えた.

表 5.1: AI プレイヤ Alpha, Beta の SP と CP の結果: 平均得点 (標準偏差)

	Alpha	Beta
Alpha	10.02 (2.09)	11.32 (2.24)
Beta	-	12.60 (2.52)

Beta の方が 2 点ほど高い得点を記録した. なお, Beta 同士の Self-Play については Eger らの論文で報告された平均得点 [16] と一致する. これは Beta の正確な再現のために, Eger らの公開した環境と, Hanabi アプリの環境で seed 値を固定 (同じ手札と山札を用意) してやれば, 手番ごとのアクションも一致するように実装した結果である.

5.3 Hanabi アプリと被験者実験

本節では, 今後 Hanabi アプリを用いて Hanabi の AI プレイヤの評価実験やデータ収集を行いたい研究者に向けて, 実験の準備や進行に際して検討すべき事項を記載する. 特に, AI プレイヤを作成する場合の手順や環境, 倫理審査の手続き, サーバの公開設定など実験を実施する上で直面しやすい課題とともに, Hanabi アプリが提供するサポートなどを述べる. なお, 細かな実験の流れや条件については 6.1 節に記載するため, 本節ではそれ以外の技術的な側面を中心に挙げる.

5.3.1 必要なソフトウェア/ハードウェア

クライアント側のハードウェア/ソフトウェア要件: クライアント側の要件は最小限で, HTML5 に対応した Web ブラウザ (Google Chrome, Safari, Microsoft Edge) を利用可能なデバイスさえあればよい. デバイスの種類や OS は問わない. さらに, HTML5 が提供する多様な機能 (ハイパーリンク, 表, 画像, 動画など) は, 将来的にアプリに組み込むことが可能である.

サーバ側のソフトウェア/ハードウェア要件：サーバ側の要件は被験者の数や実験デザインによって異なるが、多くの場合ハードウェアは高性能なメモリやGPUを必要としない。どちらかという安定したネットワーク回線の準備が課題となる可能性がある。ソフトウェアについてはLinuxがなんらかの方法で動作すればよい。ただし、AIプレイヤーの計算コストによっては、ハードウェア要件の再検討が必要となる。

5.3.2 AIプレイヤーの作成

必要なスキル：Hanabi アプリは広く使用されているプログラミング言語であるPythonを基盤としている。AIプレイヤーを作成するためには、Pythonの基礎文法を理解しクラスを扱えば十分で、Pythonの高度な技術や知識を必ずしも必要としない。

基本的な流れ：AIプレイヤーの作成は、テンプレートとなるプログラムファイルをコピーすることから始まる。AIプレイヤーは、場のスタックや山札の枚数、AIプレイヤー視点で観測可能な手札の情報などを入力として受け取り、アクションを出力する関数のように実装する。AIプレイヤーの実装が完了した後、AI同士でゲームプレイを行い、その性能を評価することが多い。以下では、具体的な入出力フォーマットや評価方法について説明する。

AIプレイヤーの入出力：関連研究の章で述べたように、Googleの強化学習環境は有名で多くのHanabiのAIプレイヤーが開発されている[15]。Hanabiアプリでは、この環境で使われているAIプレイヤーの入出力に対応しており、基本はこのフォーマットに従い実装することで2つの環境で動作するAIプレイヤーを作成可能である。入出力の詳細については、[23]に記載されている。なお、AIプレイヤーを開発する際には、既存の公開されているAIプレイヤーのコードを活用することも可能である。また、Hanabiアプリでは5.2節で述べたAlpha (Internal stateの変種)、Beta (Intentional AI)のほか、一部の標準的なAIプレイヤー（例：Googleの強化学習環境で提供されるシンプルなルールベースのAIプレイヤー Simple Agent など）がすでにパッケージに含まれており、これをそのまま利用したり、改変して独自のAIプレイヤーを作成することができる。

AI同士のゲームプレイ環境：HanabiにおいてAIプレイヤーを評価する際には、SPおよびCPにおいて10000ゲームの平均得点とその標準偏差を記録することが一般的である[15]。本論文においても、5.2.3節でこれに準じた評価を行っている。HanabiアプリではSeed値を指定したうえで複数ゲーム、先手後手を入れ替えつつSP、CPを実施するCUIインターフェースを備えており、これらの評価手法が

実施可能である。ただし、CPの結果を比較するためには相手となるAIプレイヤーを比較対象間で固定しておく必要があることに注意が必要である。

5.3.3 実験の準備

倫理審査：Hanabiアプリのように、オンラインで任意の時間に被験者が参加可能な形式の実験を実施する場合、倫理審査に関して注意が必要である。このような形式の実験は、対面型実験とは異なり被験者の権利保護や個人情報の適切な取り扱いについて新たに検討する必要がある。そのため、十分な準備期間を設けた上で審査手続きを進めることが求められる。

サーバのネットワーク公開：セキュリティ上のリスクを最小限に抑えるだけでなく、Hanabiの権利者の権利を侵害しないためにも、全世界的な公開については慎重に検討する必要がある。そのため、サーバを公開したい場合には、専門家、権利者と相談するか、クローズドなネットワーク内での公開を推奨する。具体的には、研究機関の内部ネットワークを利用し、学内ネットワークからのみアクセス可能な設定にすることが有効である。この場合、IPアドレスの固定などの申請が必要となる場合もあるため、担当部門に事前に問い合わせを行うべきである。

アンケートの準備：アンケート項目については、実験デザインに応じて本論文や3章で述べたHuman-Play研究の事例を参考にすることが有効である。項目が決定した後、JSON形式で質問や回答内容を記載することが可能であり、ラジオボタンや自由記述形式をサポートしている。

AIプレイヤーのマッチング設定：被験者へのAIプレイヤーの割り当ても、Human-Play研究の事例を参考にするとよい。また、Hanabiアプリではランダム、交互、特定の決まった順での割当てが可能である。

実験日時と被験者の募集：サーバ接続のテストを完了し安定した動作を確認した後であれば、実験日時は広く、被験者数は多めに設定したうえで募集を開始することが推奨される。これは、応募者の中には実際に参加しない者も存在するため、募集人数にバッファを持たせるためである。これは本論文での実験で得られた知見であり、詳細は6.1節で述べる。

IDとパスワード：被験者にIDおよびパスワードを登録させる場合、個人情報保護の観点から注意が必要である。他のサービスで使用しているIDやパスワードの使い回しを避けるため、研究者側でこれらを用意し、別途送付する方法を推奨する。Hanabiアプリでは、csv形式でIDとパスワードを登録することでログインが可能である。

時間計測・謝金支払い：ゲームプレイ時間はサーバ内に記録され、データベースのビューアから実験従事時間として各ゲームの開始時間/終了時間、累計ゲーム

プレイ時間を確認できる。この記録は秒単位で行われるが、秒単位での勤務登録や、一日に多数回の勤務登録が認められないこともある。そのため、謝金の支払いや時間管理については、事前に大学の経理など担当機関に相談しておくことが望ましい。

5.3.4 Hanabi アプリの機能に変更を加える場合

必要なスキル：Hanabi アプリは広く使用されているプログラミング言語である Python を基盤としており、JavaScript も併用されている。そのため、Hanabi アプリの機能そのものを変更したい場合（例：UI を改良する、独自の評価機能を追加する）には、Python および JavaScript の基礎的な文法を理解している必要がある。ただし、既存のライブラリやフレームワークを活用している部分があり、その部分を改変する際にはそこで用いているライブラリやフレームワークの知識が必要とされる場合がある。

UI の修正/改造：Hanabi アプリの UI は p5.js を用いて編集可能であり、このフレームワークは Processing を JavaScript に移植したものである。そのため、Processing の経験がある場合、容易に UI の編集ができる。未経験者でも、Processing は学習コストが低いため、比較的短期間で技術を習得できる。p5.js を利用することで、自由記述欄や音声機能の追加も可能であり、公式ドキュメントやコミュニティの活用を推奨する。

第6章 Hanabi アプリを用いた実験

本章ではプロトタイプ「Hanabi アプリ」を用いた実験について報告する。AI プレイヤの性能比較とデータ収集を試験的に行い、実験実施に関する知見や今後の課題を整理することを目的とする。おもな流れとして被験者（人間プレイヤ）に 5.2 節で述べた AI プレイヤ Alpha, Beta と交互に 2 人プレイでゲームを行ってもらい、その後、両 AI プレイヤが被験者とのゲームで得た平均得点を算出し比較する。本章では実験のセットアップとその結果、および得られた知見について述べる。

6.1 実験のセットアップ

本節では、実験のセットアップについて述べる。通常、実験のセットアップは概略のみを示し、研究の再現性を確保する程度に留めることが多い。しかし本実験はオンラインで、被験者の都合のいい時間にゲームプレイを行うという比較的にめずらしい試みであり、その実施過程や条件の設計には試行錯誤を伴った。これらの要素は実験の結果を左右する交絡要因となりえる部分でもあり、このような詳細な情報を記録することは将来的な類似研究のための重要な知見となる。したがって本節では、実験のセットアップについて従来の研究に比べてとくに詳しく記述する。

6.1.1 被験者の募集と応募条件

被験者は本学の博士前期課程、博士後期課程の学生を対象に最大 25 名をめどに以下の応募条件で募集した。この上限は、実験従事時間と謝金の計算から総額約 10 万円の予算を基準として設定したものである。また、応募はしたが都合が合わなくなるなどして実験参加はしない、など被験者が離脱することを考慮し予備的に多めの被験者を募集すべきであった。この点については 6.3.2 項で適切な募集人数について述べている。

付録 B の募集文をメールで送付し、Google Form で実験参加の応募を受け付けた。応募条件の原文およびより詳細な注意事項などについては、付録 B に示す。学

内のネットワークに接続可能な環境およびデバイスを持つことを応募条件とした理由は、学内のネットワークからのアクセスのみに限定することで、セキュリティリスクを最小限に抑えるためである。

募集の際提示した応募条件

- 本学石川キャンパスに在籍の学生
- 国籍問わず、日本語での意思疎通を行えること
- 学内のネットワークに接続可能な環境を用意できること
- 特定のブラウザを利用可能なスマートフォンまたはPCを所持していること
- 注意事項（データは公開されること、後述の謝金給付条件があることなど）に納得していること

6.1.2 実験従事時間の計算と謝金

本実験では十分なゲーム数の実験を行うため、Hanabi アプリで記録されるゲームプレイ時間に応じて上限5時間まで、謝金が支払われる仕組みとした。ゲームプレイ時間が5時間を超えた場合もゲームプレイを継続することは可能であり、その際のデータも本論文で取り扱う対象とした。一方下限値として、ゲームプレイ時間が2時間以上でないと謝金は給付しない、という謝金給付条件を設けた。この条件が満たされない場合、謝金は支払われないという同意のもと被験者を募った。この条件設定は被験者1人につき、一定のゲーム数分のデータを収集するためである。また、アンケートの回答などゲームプレイ以外の時間として、予備時間30分を設けた。ゲームプレイ時間と予備時間の和である実験従事時間に対し、本学規定に従い1時間あたり1,000円が支払われた。例えばゲームプレイを2時間行った被験者の場合、これに予備時間30分を足し上げ、従事時間を2時間30分として2,500円が支払われた。ゲームプレイを5時間行った被験者の場合、従事時間5時間30分で最大5,500円が支払われた。

6.1.3 実験日と実施時間帯

本実験は、連続する平日3日間にわたり実施することとした。また、参加者募集のための案内は実験開始日の1週間前に送付した。この程度の実施期間であれば、募集開始日がそれほど前でなくても、学生は学業やその他の活動の合間に数

時間程度を確保し、本実験に参加できると考えたためである。3日間にわたる実験日と各日の実施時間帯は以下の通りである。実施時間帯は、本学規定により18時以降の夜間帯の実施を行わず、また休憩を確保するため午前の部と午後の部に分けた。被験者はこの中で都合の良い日程、時間帯にゲームを開始できるようにした。いずれか1日に集中して、もしくは複数日にわたりゲームプレイすることも可能とした。なお、実験日はいずれも平日で、本学学事日程上でも授業期間に該当し、祝祭日、休業日、定期試験期間を含まない。

実験日 2024/12/18(水), 2024/12/19(木), 2024/12/20(金)

実施時間帯 午前の部 各日 9:00～12:30 (ゲーム開始は12:00 まで)

午後の部 各日 13:30～17:30 (ゲーム開始は17:00 まで)

6.1.4 実験の流れ

本実験は以下のような流れで実施することを想定しており、今回もこれに従った。被験者は事前に通知されたID・パスワードを用いてHanabiアプリにログインする。実験参加にあたって本学倫理規定上の各種事項への同意（以下、「実験参加同意」）の後、ボードゲームの経験などを問う「事前アンケート」に回答する。事前アンケートは付録Cに具体的な内容を示す。

その後被験者は実験の日時枠内であれば、いつでもゲーム開始できるようになる。被験者がゲームを始めると5.2節で述べたAIプレイヤAlpha, Betaのどちらかが割り当てられ、2人プレイでゲームが進行する（詳細なゲームプレイに関する条件については6.1.7項で述べる）。

1ゲームを終了するごとにそのゲームのAIプレイヤに対する印象などを問う「ゲームごとアンケート」に回答する。また、6ゲーム終了後のみ1度だけ、Hanabiアプリの操作性などを問う項目が追加される。なお、6ゲームとしたのは1ゲームは10分程度であるという事前情報[14]から、おおよそ1時間程度Hanabiアプリを利用したが後に質問をしたかったためである。具体的な質問と回答項目は付録Dに示す。

6.1.5 被験者とのやりとり

実験実施における被験者とのやりとりの履歴について述べる。やりとりはすべてメールで行った。6.1.1項の内容で被験者を募集後、最大25人をめどに先着順で被験者を確定、参加可能であることを伝える連絡をした。実験開始2日前にはリマ

インドを行い、実験初日 8 時には Hanabi アプリにログインするための ID・パスワードの通知を行い、その日の 9 時より実験を開始した。リマインドと ID・パスワードの通知の際、ルールと Hanabi アプリのゲーム画面の説明資料を送付した。また、実験 2 日目と 3 日目の開始時点で、前日の実験終了時に謝金支払い条件が未達成の被験者には、その旨を伝えてリマインドを行った。実験終了後、被験者への実験終了告知と謝金の支払いに関する連絡を行った。なお、これ以降の謝金支払いにかかるやりとりは本論文では報告しない。

6.1.6 ルール説明と TIPS

Hanabi のルール説明の項目は 2.1 節で述べたものが基本であるが、2.1 節には一部記載のない事項として以下の内容（表現は異なる）をプレイングに関する tips として記載した。これらの tips は、ゲームプレイのコツを知らないことによって著しく非効率的なゲームプレイが行われること、そのプレイデータが分析対象として不適切になることを予防する意図のもと記載された。また、被験者のゲーム体験の低下および実験からの早期離脱を予防する意図も含まれている。

プレイングに関する TIPS

- 5 のカードは各色 1 枚なので捨てるとその色の花火 (スタック) を完全に完成できなくなる。したがって、慎重に扱うべきである。一方、1~4 のカードは複数枚存在するため、場合によっては捨てるのが望ましい場合もある。
- すでに場に出ているスタックと同色の数字以下のカードは、その後のスタックの作成に使われないため捨ててもよい。
- 相手が同じヒントを出してきた場合、単なる確認ではなく、戦略的な指示を示唆している可能性がある。
- ヒントを出す役割が自分に偏っていると感じたら、思い切ってカードをプレイしたり捨てたりしてみるのもよい。

6.1.7 ゲームプレイに関する条件

先手後手の影響を緩和するため、被験者と AI プレイヤが行う各ゲームにおいて、先手後手はランダムに決定した。

1 ゲーム目の相手 AI プレイヤの違いによる影響が出る可能性を考慮し、1 ゲーム目の相手は Hanabi アプリ内の整理番号の偶奇によって決定した。被験者全体で 1 ゲーム目の相手が Alpha の被験者と Beta の被験者を半々程度にするためであった。ただし、この方法では実験に応募したが参加しない被験者が出た場合に偏りが発生するため不適切であった。この点は今後の課題とする。

また、被験者には事前に 2 種類の AI プレイヤのいずれかが割り当てられることを伝え、さらにゲーム中には相手が Alpha か Beta のどちらであることを開示した。具体的に表示される名前は「Alpha」「Beta」であり、AI プレイヤの特性を示唆しない。これは AI プレイヤが匿名であることによる交絡要因を減らすためである。もし AI プレイヤの名前が表示されない場合、被験者は現在の相手が Alpha か Beta かを特定しようとする認知的負荷が発生し、ゲームの進行や意思決定に影響を与える可能性がある。この影響は相手となる AI プレイヤの候補もわからないようにした場合、より複雑化する。本実験では Hanabi アプリ環境を用いた事前調査の位置づけであるため、より単純な条件、つまり相手となる AI プレイヤの候補と、相手 AI プレイヤ名を開示する設定の実験を行った。

山札と初期手札（最初の手番に配られる手札）の違いでゲームの進行難易度に差が出る可能性があり、初期手札もしくは山札の順序を固定する設定がありうるが、本実験ではこれらを固定しなかった。具体的にどのように固定すべきか検討し、実際に Hanabi アプリに実装する時間的余裕がなかったことが主な理由である。そのため、今後 Hanabi アプリ環境で初期手札もしくは山札の順序を固定すべきなのか、今後の検討課題とする。

一手の制限時間は 50 秒とし、制限時間を迎えると Hanabi アプリ側で自動的に以下 1, 2 の操作を行う。研究室内で実施した予備的な実験で 50 秒程度あれば余裕がある、という意見をもとに 50 秒とした。操作を行わずにゲームプレイ時間を引き延ばすことを防止するため、一手の制限時間を 3 回連続して超過すると切断扱いとして処理した。

一手の制限時間を迎えた場合の処理

1. 相手（AI プレイヤ）の手札からカードをランダムに 1 枚選んで、そのカードの色または数字に関するヒントを出す
2. ヒントトークンがなければ、自分（人間プレイヤ）の手札からカードをランダムに 1 枚選んで捨てる。

6.2 実験結果

6.2.1 被験者の募集と参加に関する結果

6.1.1 項にある応募条件で被験者の募集を行った結果、24 人から応募があった。募集にあたっては以下の日時にメールを送信した。日時は日本標準時（UTC+9）である。

2024/12/11(水) 09:09

応募メールの送信および応募の受付開始（付録 B）

2024/12/12(木) 07:00

応募メールの再度送信

2024/12/12(木) 19:00

応募の受付終了

縦軸を応募人数（count）、横軸を日時とした応募者数の推移を図 6.1 に示す。12/12 19:00 時点で応募人数が 24 人に達していたため、応募の受付を終了した。応募受付開始して 2 時間以内に 8 人の応募があり、夜間（12/11 18:00～12/12 06:00）の応募は少ないことが分かる。また、24 人中 16 人が 12/11 中に、残る 8 人は 12/12 中に応募があった。

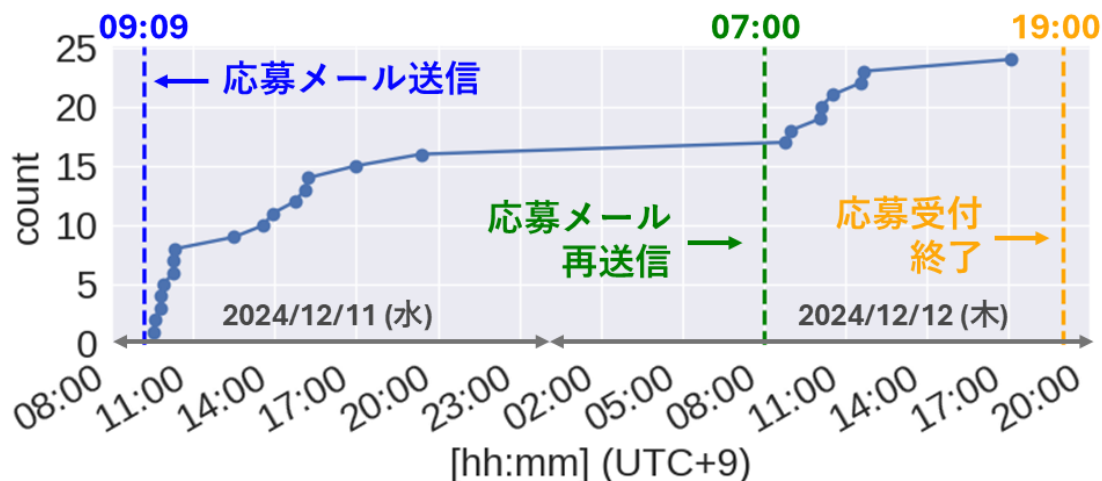


図 6.1: 実験への応募者数の推移

応募のあった 24 人のうち、1 人は実験 1 日目に時間の都合で参加できないと連絡があった。さらに、実験終了後に 4 人は一切ゲームをプレイしておらず、2 人はゲームプレイが確認できたが謝金支払い条件が未達成であった¹。したがって、実験参加同意を得て、謝金給付条件を達成した 17 人を本実験の被験者とする。被験者以外のデータ分析やプレイデータの公開は行われない。なお、応募者 24 人のうち有効な被験者数の割合は 70.83%であった。

¹6.1.5 項にある通り、謝金支払い条件が未達成であった人には 2 日目と 3 日目の実験開始時にリマインドを行った。

6.2.2 ゲーム数とゲームプレイ時間に関する結果

本実験を通して779ゲームが行われた。このうち、9ゲームは6.1.7節で述べた切断扱いによって終了し、残りの770ゲームは2.1.4節で述べたゲームルールに基づく終了条件のいずれかによって終了した。本項における終了条件の便宜上の表記の定義とともに、より詳細な内訳を以下に示す。3OUTおよびEETはおおむね半々程度の割合であった。また、DISCONNECTEDは全ゲームの1.2%を占め、PERFECTは1ゲームもなかった。

END_EXTRA_TURNS (以降, EET) : 403 ゲーム (51.7%)

山札の最後の1枚のカードが引かれた後、この手番を除き、最後のカードを引いたプレイヤーも含めた全プレイヤーが1回ずつ手番（これをEXTRA_TURNSと表現した）を完了した場合。

3OUT : 367 ゲーム (47.1%)

赤ライフトークンを3つ失った場合。

PERFECT : 0 ゲーム (0.0%)

5色すべてのスタックが完成した場合。

DISCONNECTED : 9 ゲーム (1.2%)

切断扱い。

以降では、本実験を通して779ゲームから9ゲームを除いた770ゲームを結果報告の対象とし、「全ゲーム」「すべてのゲーム」と表現したとき、この770ゲームのことを指す。また、被験者ごとのゲーム終了条件の割合にはばらつきがあり、最もEETに偏った例では95.7%を占め、少ない例では28.3%にすぎなかった。この偏りは明らかに偶然ではなく、被験者ごとにリスクを冒してでもカードを出すか、3OUTをできるだけ避けるかの選好に違いがあることを示唆している。

770ゲームの累計ゲームプレイ時間は3341.27分（2日7時間41分16秒）で、各被験者の実験を通した総ゲームプレイ時間の平均値は196.55分（標準偏差67.85分）だった。各種代表値は表6.1の通りである。謝金支払い対象となるゲームプレイ時間の下限値2時間に近い被験者は3人、上限値5時間に近い被験者は3人であった。

表 6.1: 各被験者の総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の代表値

	総ゲームプレイ時間 [分]	総ゲームプレイ数 [games]
合計	3341.27	770
平均	196.55	45.29
標準偏差	67.85	22.73
中央値	180.63	39
最小値	114.15	8
最大値	309.75	92

各被験者の総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の分布とその関係として、横軸に総ゲームプレイ時間（Total Play Time）を、縦軸に総ゲーム数（Total Play Game）をとった2次元散布図を図 6.2 に示す。1 点 1 点が被験者 1 人 1 人に対応し、青い実線が回帰直線である。相関係数は 0.856 で、総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の間には正の相関が確認された。最小 8 ゲームを 135.98 分（1 ゲームあたり 16.97 分）かけてプレイした被験者と、最大 92 ゲームを 301.15 分（1 ゲームあたり 3.27 分）かけてプレイした被験者が確認された。1 ゲームあたりの時間にこのようなばらつきがあることは、今後プレイ時間にかかわる分析をする際に考慮しなくてはならない要因を増やすことになるので望ましくなかった。このばらつきの抑制は今後の課題とする。具体的には、一手の制限時間に上限値だけでなく下限値も設けたり、一手持ち時間の設定を変えるなどの解決案を考える。

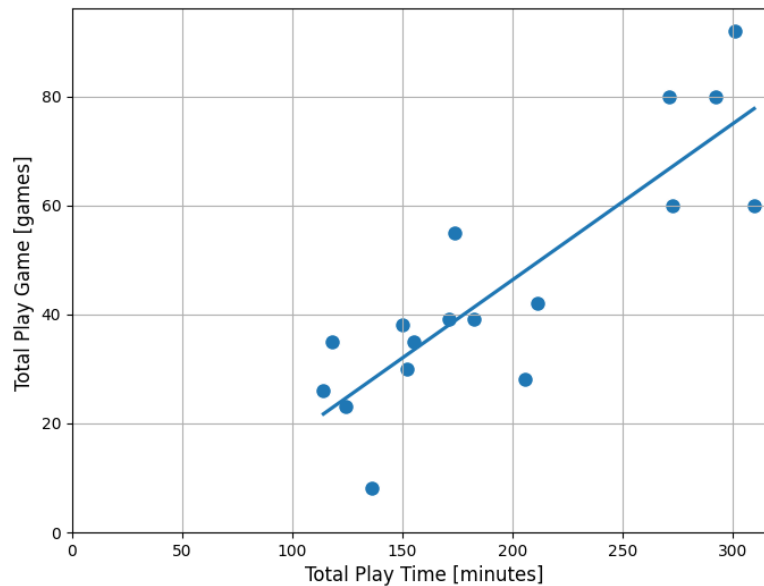


図 6.2: 各被験者の総ゲームプレイ時間と総ゲームプレイ数の分布とその関係

1 ゲームごとのゲームプレイ時間の分布として、横軸を1ゲームごとのゲームプレイ時間、縦軸をゲーム数にとったヒストグラムを図6.3に示す。平均値は4.39（標準偏差 3.59）分であり、事前情報 [14] でわかっていたゲームプレイ時間 10 分よりも短い結果となった。

1 手ごとにかけた時間の分布を図 6.4 に示す。横軸は1手ごとにかけた秒数を、縦軸は手数（10 を底とする対数スケール）を示す。平均値は 8.12（標準偏差 9.10）秒であるが中央値は 5 秒であり、5 秒以下で決めた手が半分以上を占める。また、1 手の制限時間（50 秒）に到達した手は 88 手であった。

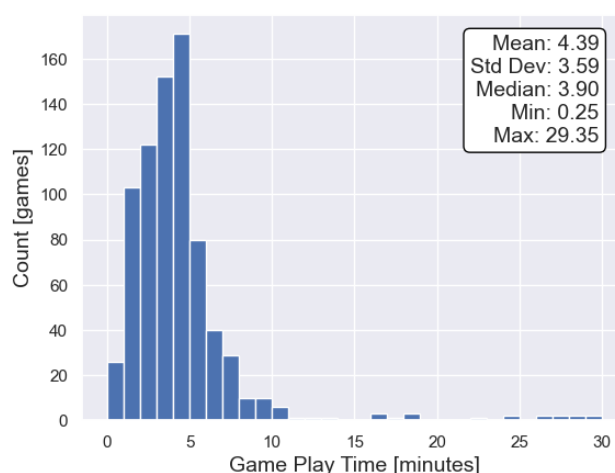


図 6.3: 1 ゲームごとの時間の分布

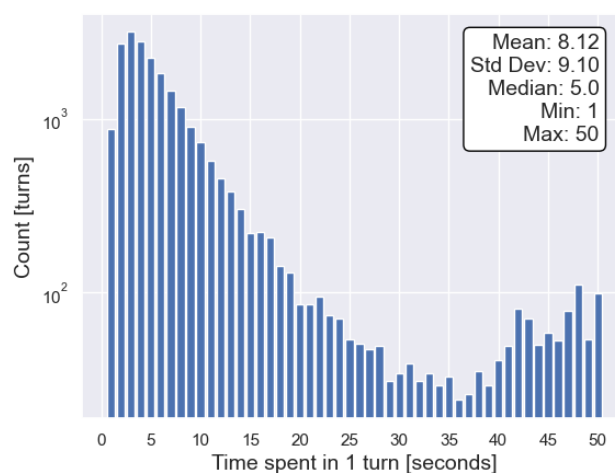


図 6.4: 1 手ごとの時間の分布

ゲーム終了時の最終手数の分布を図6.5に示す。3OUT はばらつきが大きい一方、EET は平均値 72.16（標準偏差 2.85）手を中心分布している。3OUT の最終手数の最小値は8手で、これをはじめとして3OUT の手数の平均値 41.78（標準偏差 18.24）手を大きく下回る形で早期に終了しているゲームがいくつか見られた。その原因として（1）ルールの未理解や誤解によって、適切なプレイができずに早期に終了した可能性、（2）「このゲームでは得点が伸ばせない」「状況が悪すぎる」と判断し、意図的にプレイを放棄した可能性を考える。とくに、手札の状況が悪い場合に諦める傾向があるかどうかは、今後の分析課題とする。対策として、ルール説明を必須化することで被験者の誤解を減らし、意図しない早期終了を防ぐことができると思う。また、平均得点に応じたインセンティブを導入することで、途中のゲームプレイ放棄を予防できる可能性がある。

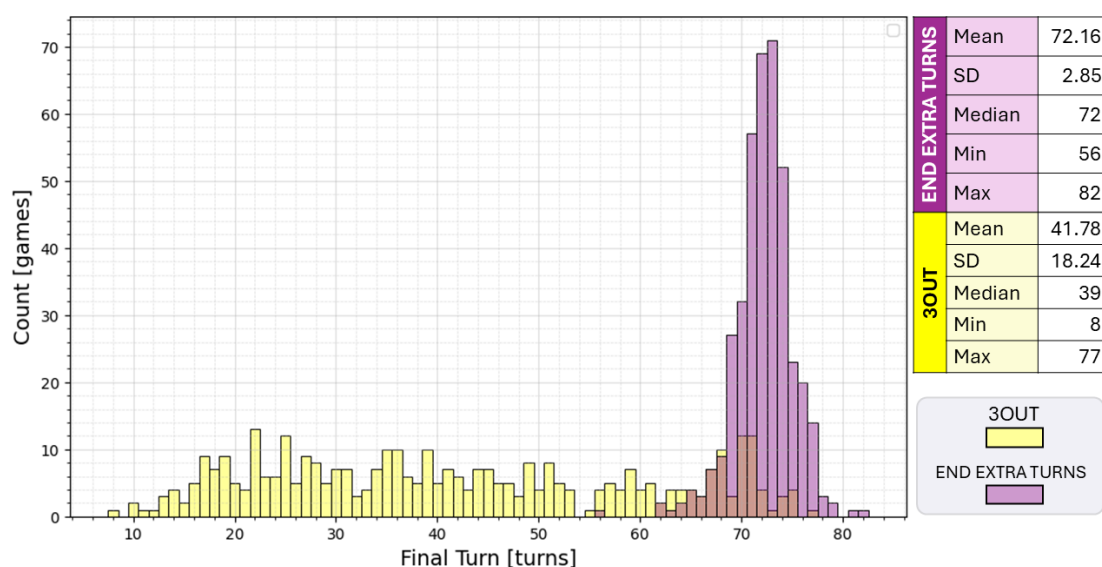


図 6.5: ゲーム終了時の最終手数の分布（ゲーム終了条件別）

6.2.3 アンケート結果

事前アンケート（付録 C）の結果を報告する。Hanabi アプリが事前アンケートに回答しないとゲームプレイを開始できない仕様になっているため、被験者 17 人全員の回答を得た。

本実験を対面で実施した場合を想定したときの参加意思について報告する。「あなたは本実験が対面の場合でも参加してくれていましたか？」という質問に対し、17 人中 8 人が「参加した」と回答し、9 人が「参加しなかった」と回答した。オ

オンラインで任意の時間に参加できる形式にしたことにより、対面で実施した場合に参加が見込めなかった層からも実験参加してもらえたことがわかる。また、「参加しなかった」とした9人のうち、理由として「時間がないから」と答えたのが4人、「現地に集まるのが面倒だから」と答えたのが3人であった。さらに2人は自由記述で「人に会うのが苦手だから。」および「AIと協力型の研究がどのようなものか興味があったため。」と回答している。最後の1人については質問の意図を適切に伝えることができていなかったと予測される。

被験者のボードゲームや Hanabi の経験について報告する。「ボードゲームやカードゲーム全般にどのくらい経験がありますか?」という質問に対する回答の分布を図 6.6 の左に示す。回答は5段階リッカート尺度で、数字が大きいほど経験があることを意味する。ボードゲームやカードゲーム全般に経験がある（回答項目 4,5）としたのは計 10 人で被験者のうち 58.8%，逆に経験がない（回答項目 1,2）としたのは計 5 人で被験者のうち 29.4%であった。一方、Hanabi の経験については「未プレイ」と回答した人が 17 人中 16 人で、被験者のうちほとんど（94.1%）が未経験であった。残る 1 人について、1～10 回の Hanabi の経験があると回答し、経験があると回答した被験者にのみ行われる追加質問では、最後に Hanabi を遊んだのは 3 か月前から 1 年前で、平均スコアは 21 点以上であると回答した。なお、この被験者はボードゲームやカードゲーム全般の経験（図 6.6 左）に関しては「4: ある程度経験がある」と回答しており、獲得得点も全被験者の中でも上位だった。

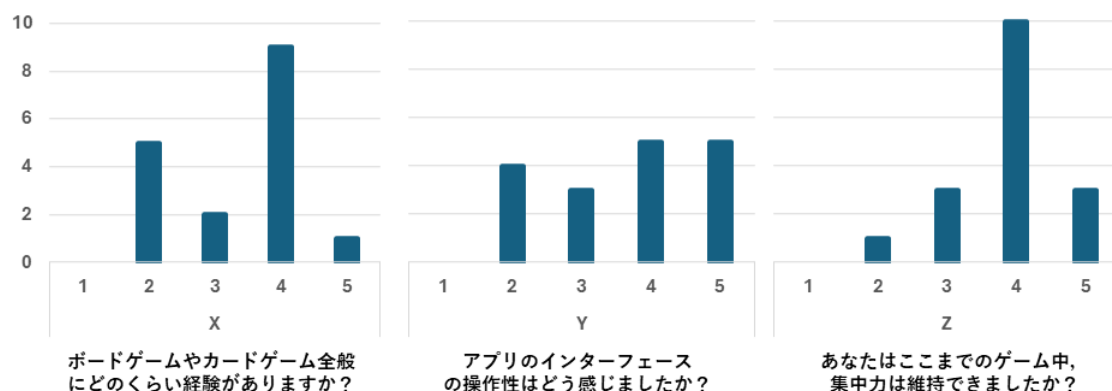


図 6.6: アンケートのうち、被験者ごとに質問された項目の回答結果

ゲームごとアンケート（付録 D）の結果について報告する。総計 779 ゲームから、切断扱いの 9 ゲームを除いた、770 ゲームと同じ数だけの回答を得た。質問項目は AI プレイヤの印象などを問うもので、AI プレイヤ Alpha, Beta ごとの比較を行うためここでは取り扱わず、6.2.4 項で述べる。

6 ゲーム後に実施されたアンケート結果について報告する。こちらは6 ゲーム後に1 度だけ実施されるため、6 ゲームまで遊んだ被験者数ぶん（17 人全員）の回答を得た。結果を図 6.6 の真ん中と右に示す。回答は5 段階リッカート尺度で数字が大きいほど UI を使いやすいこと、集中力を維持できたことを意味する。「アプリのインターフェース（UI）の操作性はどう感じましたか？」という質問について、「1: 非常に使いにくい」という回答はなく、それ以外の回答項目でなんらかの傾向はみられなかった。また「あなたはここまでのゲーム中、集中力は維持できましたか？」という質問については、集中力をある程度以上維持できた（回答項目 4,5）と回答した人は計 13 人おり、被験者のうち 76.5%であった。この2 つの回答結果を横軸、縦軸にとりヒートマップをプロットした結果（付録 F）、には若干の正の相関が見てとれ、UI の操作性改善により集中力が維持される可能性が示唆された。

また、Hanabi アプリに改善してほしい点を自由記述で記入してもらい、回答は以下の通りであった。捨て札の常時表示といった UI への改善要望を中心に、時間制限への不満も挙がった。

Hanabi アプリに改善してほしい点（自由記述）

- 選択のキャンセル機能が欲しい。捨てるなどのコマンドが邪魔で番号が見えない
- 履歴を遡って全て見えるようにしてほしい。
- 時間が短い
- 捨てたカードが常に表示されるようにしてほしいです。
- 相手の行動をもっとわかりやすく表示できるとユーザー側は使いやすいのではないかと感じた。AI の行動が一瞬で表示されこちら側としては理解するのに少し時間がかかる。しかしタイマーは刻一刻と進むため猶予があるとはいえず少し焦りを覚えた。実際に AI の意図や私の最善手について考えていると 50 秒を超えることが何度かあった。
- 数字ではなくカードのオブジェクトを積み上げる形にもらえるると視覚的に分かりやすいです (Windows のソリティアのように)
- ヒントのテキストのカードに色をつけるなど強調表示が欲しい
- AI 側にこちらからヒントを与えたいのに連続でヒントを与え続けてくる

カード選択後に表示されるアクション選択ボタンが邪魔であるという指摘については、ボタンを再度押すことで非表示にできる仕様になっているが、その説明が不足していた。時間制限に対する不満については、一手の制限時間を 50 秒の固定値とする現在の仕様を変更し、一手ごとに持ち時間に一定の時間を追加するルールを導入することで、持ち時間が減少するプレッシャーを軽減できる可能性がある。また、場のスタックやアクション履歴の表示についての改善は、UI デザインの工夫により対応可能である。いずれも一定の時間をかけさえすれば改善可能であるため、今後の課題とする。最後のものは、我々が記入を求めたアプリへの不満ではなく、個別の AI への不満である。しかし、有益なデータを収集するためには、ある程度の時間やゲーム数をプレイしてもらう必要があり、その意味ではどのような AI プレイヤを搭載し、モチベーションを維持するかは重要な課題である。

6.2.4 2つのAIプレイヤーの獲得得点とアンケート結果

2種のAIプレイヤー Alpha, Betaが被験者相手に全ゲームを通して獲得した得点の分布を図 6.7 に示す. 全 770 ゲームのうち, Alpha が 387 ゲーム, Beta が 383 ゲームの分布となっている. ゲーム数の偏りはDISCONNECTEDのゲームを報告対象のゲームから除外したためである². Betaの方が高い平均得点を記録しており(平均 14.90 点, 標準偏差 3.87 点), Alpha との平均得点(平均 10.25 点, 標準偏差 4.73 点)との差は 4.65 点であった. Beta の平均得点に関しては, 実装の記述がある論文 [16] で報告された平均得点(平均 14.99 点, 標準偏差 4.17 点)と, 実験条件が多少違うものの結果的にはほぼ一致している.

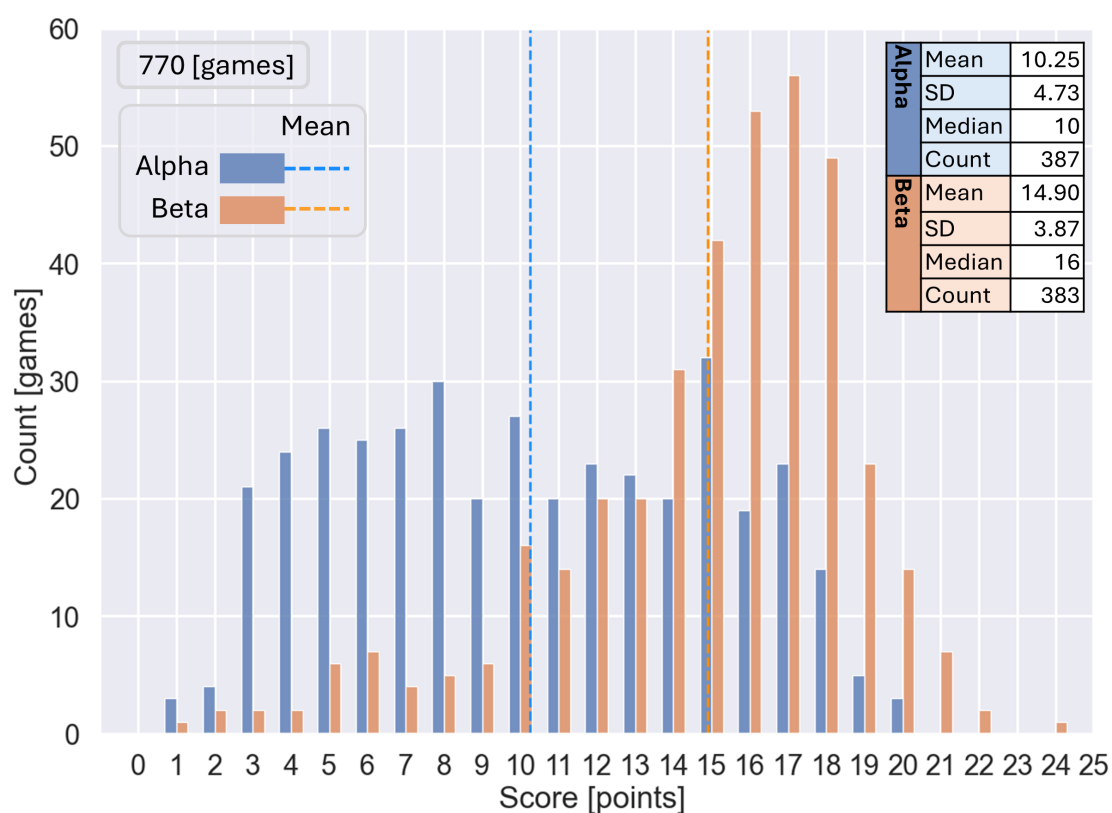


図 6.7: 全ゲームにおける得点分布 (AI プレイヤ別)

²切断扱いになったゲームを除外しても偏りが発生しないよう工夫すべきであった. 今後の課題とする.

被験者ごとの獲得得点については、詳細を付録 E に示した。さらに、各被験者の平均得点の分布を示すのが図 6.8 である。この図では、各点が 1 人の被験者に対応し、横軸が Alpha との平均得点 (Mean Score for Alpha)、縦軸が Beta との平均得点 (Mean Score for Beta) を表している。例えば、青の領域内にある 1 点は、ある被験者の Alpha とのゲームの平均得点が 14.18 点、Beta とのゲームの平均得点が 12.58 点であることを示している。青の領域とオレンジの領域の境界線は、この線上に点があれば、2 つの AI プレイヤとの平均得点が一致することを意味する。オレンジの領域に点がある場合、その被験者は Beta との平均得点の方が高いことを意味する。17 人 (点) すべて Alpha との平均得点と Beta との平均得点になんらかの差があったが、これは Alpha, Beta のアルゴリズムの違いのほか、被験者の AI プレイヤへの理解度や適応性³、あるいは各被験者のゲームプレイ傾向が偶然その AI プレイヤにかみ合ったかどうか、といった要因が複合的に影響して差が発生したと考える。また、17 人中 16 人が Beta との平均得点の方が高く、これらの被験者において Beta の方がより良く協力プレイできた結果と推測できる。要因の 1 つとして Beta には Alpha にはない意図を込めたヒントを出すアルゴリズムを備えており (詳細は 5.2 節の Beta のアルゴリズム参照)、これが得点を向上させる作用があったと考える。

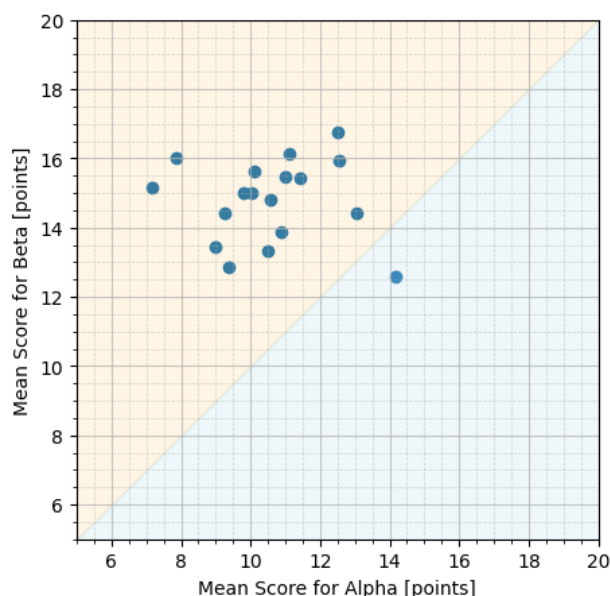


図 6.8: 被験者ごとの Alpha および Beta との平均得点分布

³ここでは、理解度とは被験者が AI プレイヤのゲームプレイの特性を把握すること、適応性はその AI プレイヤ相手に高得点を獲得できるようゲームプレイを変化させられる度合いを指す。

ゲームごとアンケートの AI プレイヤ別の回答結果を図 6.9 に示す。ゲーム数と同じ数の回答，すなわち全 770 件の回答が得られ，Alpha とのゲーム後に回答したものが 387 件，Beta とのゲーム後に回答したものが 383 件であった。各質問項目で「覚えていない」とした回答が見られたが，今回は無視可能であると判断した。5 段階のリッカート尺度の各回答の平均と標準偏差を表 6.2 に示す。全質問項目において Beta との方が平均値が高く，総合的に被験者に好まれる傾向にあったことが示唆される⁴。

表 6.2: ゲームごとアンケートの AI プレイヤ別回答結果の平均と標準偏差（5 段階リッカート尺度）

質問項目	Alpha		Beta	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
この AI と次にゲームをプレイしたとき，さらにスコアを伸ばせそうですか？	2.55	1.09	3.03	1.13
この AI の出すヒントは有益でしたか？	2.13	1.06	2.80	1.18
この AI の挙動は読めましたか？	2.46	1.12	3.01	1.18
今回のゲームは楽しかったですか？	2.53	1.11	3.14	1.15

⁴好まれるか，という主張をするのであれば，プレイヤの出したヒントが AI が活かしてくれたかどうかを質問し，AI はヒントの送り手，受け取り手，両方でよい評価であったか検討すべきであった。今後の課題とする。

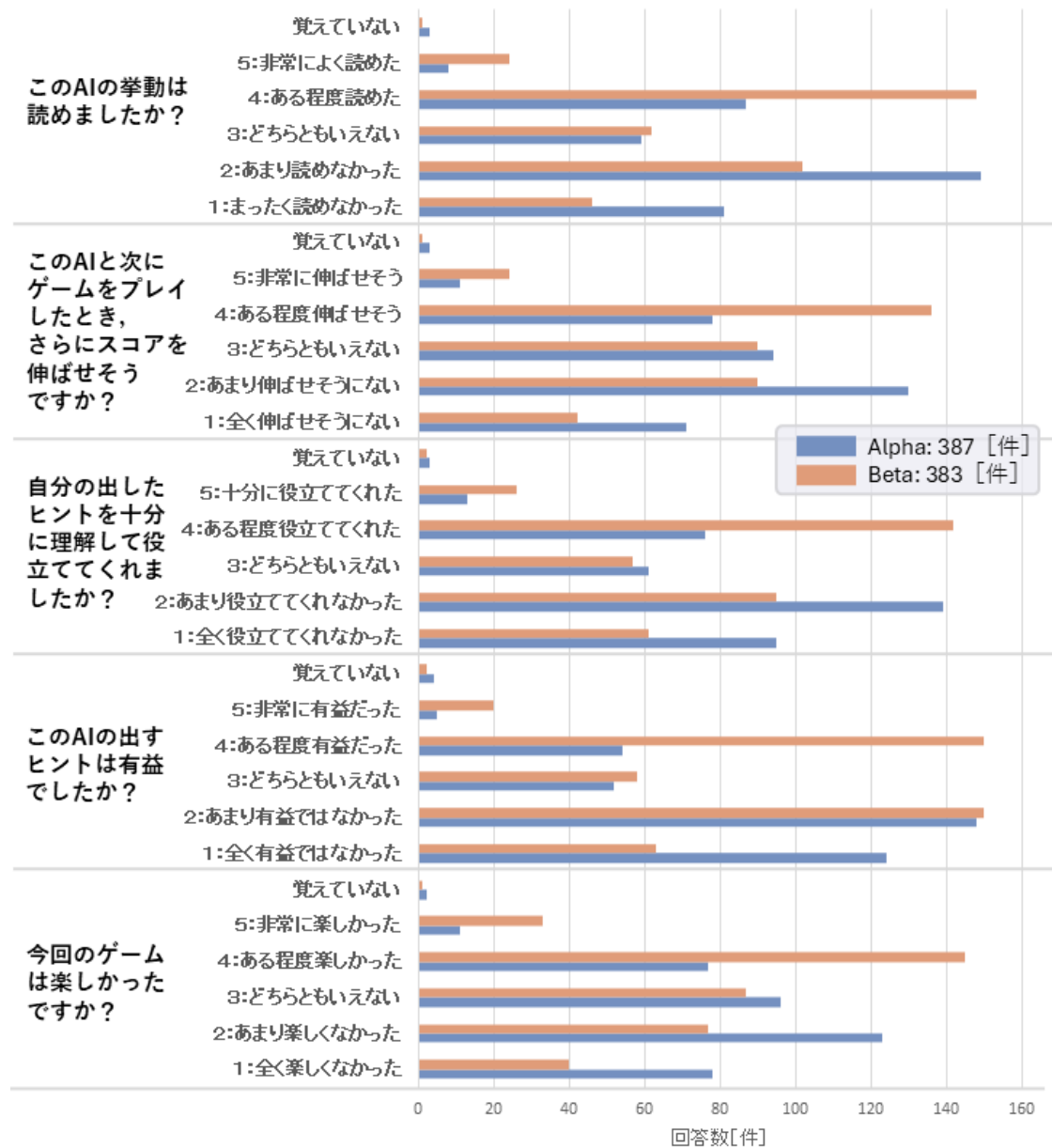


図 6.9: ゲームごとアンケートの AI プレイヤ別の回答結果

6.3 知見と考察

6.3.1 プレイ時間について

時給制の報酬制度の有効性

図 6.2 の被験者のプレイ時間を分類すると、(1) 2 時間ほばちょうどで終了した被験者：3 人、(2) 140～200 分程度プレイして終了した被験者：9 人、(3) 5 時間ちょうどで終了した被験者：3 人の 3 つのパターンに分けられる。なお、5 時間を超えてプレイした被験者はいなかった。(1) は謝金の支給条件を満たしたため、それ以上プレイする動機を持たず終了した可能性が高い。(2) はある程度の時間プレイしたものの、飽きや疲労などの要因により終了したと推測される。(3) は最大報酬額を得ることを目的としてプレイを続けたと考えられる。5 時間を超えてプレイした被験者はいなかったが、もし存在した場合は、金銭的な動機を超えて純粋にゲームを楽しんでいた可能性がある。

この結果から特定の時間実験を行い、一定の謝金を支払う報酬制度に比べ、実験参加時間に応じて謝金が増える時給制の報酬制度の導入にはいくつかのメリットがあったと考える。まず、参加者の増加という点では「2 時間以降は飽きるかもしれないが試してみよう」と考える人でも気軽に応募しやすくなるだろう。また、データ収集の点でも、2 時間以降もゲームプレイできる被験者がいた場合、その分多くのデータが得られるかもしれない。さらにデータの質の維持という点では、飽きた状態で適当にプレイするよりも、適切なタイミングでゲームプレイをやめてもらう方がデータの質の面で望ましい。以上をふまえると、オンライン環境で時間制約の少ないゲームプレイ実験では、時給制の報酬制度を導入することで、被験者のプレイ時間が延び、データ収集の効率向上が期待できると考える。

ゲームプレイ時間の上限設定の必要性

本実験では、被験者のゲームプレイ時間に上限を設けなかった。しかし、極端に長時間プレイする被験者がいた場合、その被験者のデータが平均値を押し上げたり、分散を大きくしたりすることで、全体の傾向を適切に評価できなくなる恐れがある。したがって、データの偏りを防ぐために 5 時間以上のプレイを許可しない、などの制限を設けるべきであった。データを多く収集できることが必ずしも望ましいとは限らず、慎重にゲームプレイ時間の上限を設定することを検討すべきである。

ゲームプレイ時間が短い要因

事前情報 [14] では Hanabi は 1 ゲームに約 10 分を要するとされており、これは主観的にも妥当な値である。しかし、Hanabi アプリでの平均プレイ時間は 4.39 分と大幅に短い値が確認された。AI が 1 秒で着手することを考慮しても、短い時間であると考ええる。理由として (1) 対面でのプレイ環境では被験者間の会話などのコミュニケーションに時間を要するのに対し、本実験ではそれが存在しなかったこと、(2) 相手が AI プレイヤーであるため、失敗しても問題がないと考え慎重なプレイをしなかった可能性、(3) 報酬制度が得点と無関係であったため被験者のモチベーションが低下し効率的なプレイを重視しなかったこと、これらが影響したと考える。

対策として、得点にインセンティブを設定することで、被験者の得点獲得への動機を強化することが考えられる。具体的には、得点に応じた金銭報酬、ランキング、称号制度⁵などが挙げられる。ただし、インセンティブの設計が不公平または不適切であると、得点を伸ばせない被験者のモチベーションが低下する可能性があるため、慎重に検討する必要がある。

被験者間のゲームプレイ時間のばらつきの抑制

1 ゲームあたりのプレイ時間に被験者間で最大 13 分の差が生じており、これは今後プレイ時間に関係した分析を行う際、考慮しなければいけない要因を増やすことになるため望ましくない。プレイ時間のばらつきを抑えるためには、長時間のプレイと短時間のプレイの双方に対策を講じる必要がある。

まず、1 ゲームあたりの時間が長くなりすぎることに対しては、持ち時間に一定の時間が追加されるフィッシャー方式を導入することで、ある程度の緩和が可能である。この方式では、各手番で追加される時間よりも長く考えると持ち時間が減少するため、被験者は適度に時間配分を意識する必要がある。結果として、1 ゲームの極端な長時間化を防ぐことができる。

一方、1 ゲームあたりの時間が短すぎることにに対しては、早指しを防止する仕組みが有効である。一つの方法として、一手ごとに最低考慮時間を設定し、例えば 3 秒間は手を打てないようにすることで、被験者が一瞬でも立ち止まって考えることを促せる。ただし、この制約は被験者にとってストレスになる可能性があるため、慎重に設計する必要がある。また、一定時間以下で連続して手を指した場合に、持ち時間の削減などのペナルティを課すことも考えられる。ただし、こ

⁵称号制度とは、特定の条件を満たした際に与えられる肩書きのことである。例えば、累計 20 回のゲームプレイが確認できた場合、「Hanabi 愛好家」といった称号を付与することができる。

ちらの方法も即座に手を決定できるシンプルな局面が連続した場合には、理不尽に感じられる恐れがある。さらに、ゲームの進行中 3OUT が発生するかもしれない手の直前に、確認画面を表示することも有効である。ただし、過度な警告はストレスとなるため、表示回数や条件を限定する工夫が求められる。例えば、ライフトークンの UI を点滅させるなど、軽微な警告にとどめる方法もよいと考える。加えて、得点に応じたインセンティブの導入も慎重なプレイを促す一つの手段となるが、6.3.1 項で述べた通り導入は慎重に行わなければならない。

以上のように、各対策にはそれぞれ問題があるため、より適切な対策の検討は今後の課題とする。

6.3.2 被験者募集について

被験者の集まり具合

図 6.1 の被験者の集まり具合は、本学の学生を対象とした過去の本研究室の被験者実験と比べても、集まりが早い部類に入る。過去の将棋を題材とした対面の実験では、18 人の被験者を集めるのに 5 日間を要していた。一方、Hanabi アプリでは、24 名の被験者を 2 日で集めることができた。オンライン形式で時間の制約が少なく、参加へのハードルが低かったことが、被験者の集まりが早かった要因の一つと考える。また、参加者がどのような動機で実験に参加したのかについて自由記入形式で尋ねることで、今後の被験者募集の工夫につながる知見を得られた可能性があった。今後の課題とする。

被験者の Hanabi の経験の偏り

本実験の被験者の多くが Hanabi をプレイしたことがない初心者で、特に工夫しない限り被験者は Hanabi 初心者に偏る可能性があることを示す一事例となった。もし、初心者と熟練者の両方と協力できる AI プレイヤの開発を目的とする場合、被験者の経験の偏りは望ましくない。経験者を対象とした実験を行う際は、ボードゲームのコミュニティなどで被験者の募集をかけることが有効な手段になると考えられる。

実験日程の柔軟性

Hanabi アプリは一度のサーバを立ち上げれば、その後の運用に手間はかからなかったため、日程を広く設定することで、被験者の都合に合わせやすくなり、結

果として参加率の向上やデータの充実につながった可能性がある。今後の実験では、日程の柔軟性を高めることを検討すべきである。

被験者の適切な募集人数

本実験では、謝金支払い総額の制約から、被験者数を 20～25 人程度に設定し、最大 25 人をめどに募集を受け付けた。実際には 24 人の応募があったが、結果として有効なデータが得られたのは 17 人であり、7 人が脱落した。これは約 3 割の脱落率に相当し、対面で実施する実験よりも高い値であると推測する。対面実験では、実験者が被験者を直接監督し適宜フォローできることに加え、決められた時間と場所に拘束されるため、途中離脱が生じにくい。一方、本実験はオンラインで実施したため、このような拘束力がなく、被験者が途中で参加をやめたり、最初から実験に参加しないケースが発生しやすかったと考える。

また、今回の場合であれば、有効な被験者を 20 人確保するために脱落を見越して 28 人程度の募集を行うのが適当であったと推測される。このように、オンラインかつ時間の制約が少ない形式で実験を行う際には、おおむね 3 割の脱落を考慮に入れ、被験者数を多めに募集することが望ましいと考える。

6.3.3 ゲームの進行について

1 手にかけた時間の分布と制限時間前の駆け込み現象

本実験では、1 手にかけた時間の分布が凹型の形状を示した。具体的には、図 6.4 に示すように、2 秒をピークとして短時間で手を打つケースが多く見られた。一方で、36 秒から 50 秒にかけて時間を要する手も増加する傾向があり、これは一手の制限時間である 50 秒に到達する前に、駆け込みで手を打つ現象によるものと考ええる。

6.3.4 その他の課題と改良点

被験者のルール理解を担保する仕組みの必要性

本実験では、実験同意と事前アンケート回答が確認できない限りゲームを開始できない仕様になっていた。しかし、Hanabi のルール説明については事前にメールで PDF を添付する形式にとどまり、被験者が必ず目を通す仕組みにはなっていなかった。そのため、一部の被験者がルール説明を読まずに実験に参加し、ゲームの

序盤でルールを十分に理解しないままプレイしていた可能性がある。対策として、ルール説明を閲覧しないとゲームを開始できない仕組みを導入することで、この影響を緩和できると考える。

第7章 おわりに

本研究では、協力ゲーム Hanabi を題材に、AI プレイヤと人間のゲームプレイ実験（被験者実験）の負担を軽減し、プレイデータ収集を効率化する枠組みを提案した。持たせるべき機能を検討し、プロトタイプ「Hanabi アプリ」による実験を行い、実験の実施に関する知見と今後の課題を整理した。

枠組みの機能の検討では、(1) 被験者実験に時間と労力がかかる理由、(2) 理想的な実験環境のあり方、(3) その理想を実現するために必要なソフトウェアの機能について議論した。そのうえで、実現可能性を考慮し、必要最小限の機能を備えたアプリケーションとしてプロトタイプ「Hanabi アプリ」を提案した。Hanabi アプリは、研究者がサーバを立ち上げることで、被験者は自分の都合の良い時間にオンラインで AI プレイヤと Hanabi をプレイし、アンケートに回答できるようにすることを特徴とする。これにより、時間や場所の制約を緩和しつつプレイデータ収集を効率化することを基本的な方向性とした。

このために、Hanabi アプリはオンラインで AI プレイヤと人間の協力プレイを実施できる環境を提供する。さらに研究者が容易に実験を実施できる環境を提供するため、seed 値の固定やデータベースの構築、マルチデバイス対応、Hanabi の AI 研究で広く用いられている AI 入出力フォーマットへの対応、CUI 上での AI 同士のゲームプレイ機能などを実装した。

Hanabi アプリを使った実験では、2つの AI プレイヤの性能を比較し、オンライン形式での実験実施に関する知見と今後の課題を整理した。この形式の利点として、被験者が素早く集まることが確認された。一方で、応募はあったものの参加しない人がいたり、1ゲームあたりのプレイ時間被験者間で平均 16.97 分～平均 3.27 分という大きな差が生じるなど課題も明らかになった。後者は今後のプレイ時間が関係した分析において、考慮しなくてはならない要素を増やすため望ましくなかった。実験全体を通して、被験者の多くがゲーム初心者に偏る傾向も見られた。これらの課題に対する具体的な対策案も提示した。

今後の Hanabi のゲーム AI 研究のため、本研究の被験者実験のプレイログを蓄えたデータベースを公開¹し活用できるようにした。なお、Hanabi アプリの公開そ

¹<https://www.jaist.ac.jp/is/labs/ikedalab/hanabi/>

のものは検討中である．本研究で行った機能の検討，また，機能の検討過程や得られた知見・課題は Hanabi に限らず，他のゲーム AI 研究で似たような研究課題に取り組む際にも応用可能である．今後，人間を相手にしたゲーム AI の実験が盛んにおこなわれることを期待する．

付 録 A Hanabi アプリのホーム画面 に記載した説明事項

ここでは、Hanabi アプリのホーム画面に記載した説明事項を示す。

- 異なるアルゴリズムで動作する 2 種類の AI がいます。それぞれ、alpha, beta で識別できます。
- ゲーム開始を押しても画面が読み込まれなかった場合、ブラウザのリロードをお願いします。
- 【ご協力をお願い】 基本自由な時間帯にプレイいただいて構いませんが、なるべく連続したゲームプレイをお願いします。
- 実施可能期間：12/18(水), 12/19(木), 12/20(金)
- 実施可能時間：午前の部：各日 9:00～12:30（ゲーム開始は 12:00 まで）、午後の部：各日 13:30～17:30（ゲーム開始は 17:00 まで）
- 上記の期間中、ご自身の都合の良い日程・時間帯に自由にゲームプレイをお願いします。
- 【注】上記の期間中、「合計で最低 2 時間のゲームプレイ」という謝金給付条件があります。本条件が満たされない場合、謝金はお支払いできません。ゲームプレイ時間にご注意ください。

付 録 B 実験募集時に送付したメールの内容

ここでは、実験募集時に送付したメールの内容を示す。なお、メールアドレスなどの内容は伏せる。

From: 奥田 真 <xxxxxxx@yyyy.zz>
To: 本学博士前期課程，後期課程の学生宛て <xxxxxxx@yyyy.zz>
Date: 2024 年 12 月 11 日 09:09 (JST)
Subject: 協力ゲーム Hanabi のプレイデータ収集アプリのプレイヤ募集

JAIST 石川キャンパスの学生のみなさま

池田心研究室所属，M2 の奥田真です。

【研究について】

本研究では

- ・被験者の方はオンラインで気軽に AI と Hanabi をプレイ可能
 - ・協力ゲーム Hanabi の研究者は貴重なプレイデータを収集可能
- そんなモバイルブラウザゲームアプリ『Hanabi アプリ』を提案しています。

今回，研究のためにモバイルブラウザで遊べる『Hanabi アプリ』を用いて Hanabi をプレイしていただける方を募集しています。

【実施場所】

- ・ JAIST 学内のネットワークに接続可能な環境で，オンライン実施

【実験概要】

- ・被験者の方には Hanabi アプリを用いて、2種の AI を相手に Hanabi を複数回プレイしてもらいます。
- ・プレイ後や途中でいくつかの簡単なアンケートにもお答えいただきます。

【日時】

実験日

12/18(水), 12/19(木), 12/20(金)

実施時間帯

- ・午前の部：各日 9:00～12:30（ゲーム開始は 12:00 まで）
 - ・午後の部：各日 13:30～17:30（ゲーム開始は 17:00 まで）
- ・上記の期間中、ご自身の都合の良い日程・時間帯に自由に参加いただけます。
- ・上記の期間を通して、2時間以上のゲームプレイをお願いします。いずれか1日に集中してゲームプレイしていただいても、複数日にわたってゲームプレイすることも可能です。

【謝金】

- ・謝金は、従事時間（予備時間＋ゲームプレイ時間）に基づきお支払いします。
- ・本学規定時給相当額：1時間あたり 1000 円
- ・アンケート回答など、ゲームプレイ以外の時間として 30 分の予備時間を設けています。
- ・「ゲームプレイ時間が最低 2 時間」という謝金給付条件があります。本条件が満たされない場合、謝金は支払われません。
- ・ゲームプレイ時間が 2 時間を超える分については、最大 5 時間まで謝金をお支払いします。

【注意事項】

- ・収集したデータは研究利用目的で公開されますが、個人が特定可能な情報は一切公開されません。
- ・繰り返しになりますが「最低2時間のゲームプレイ」という謝金給付条件があります。本条件が満たされない場合、謝金はお支払いできません。
- ・実験的取り組みのため、なんらか技術的トラブルなどでゲームプレイができない可能性があります。このとき、事実上実験に全く参加できていない状態とみなされる場合、謝金をお支払いできません。ご了承ください。
- ・ただし、すでにゲームプレイしている状態で、かつ当方の技術的トラブルにより途中で実験の履行ができなくなった場合は、その時点での従事時間に基づき謝金をお支払いします。

【募集人数】

- ・最大20人程度

【参加条件】

- ・JAIST 石川キャンパスに在籍の学生の方
- ・日本語での読み書き、会話による意思疎通を円滑に行える方(国籍は問いません)
- ・JAIST 学内のネットワークに接続可能な環境が整っている方
- ・以下のブラウザのいずれかを利用可能なスマートフォンまたはPCを所持している方 (Chrome, Microsoft Edge, Safari)
- ・注意事項にご納得いただける方

【応募締め切り】

- ・12/16(月) 17:00 まで
- ・予定より早く締め切る可能性があります。

【参加申し込み】

- ・以下の Google フォームにご回答ください。

://xxxx/yy/zz

・参加申し込みをしても、人数超過などの理由で参加できない場合があります。ご了承ください。

・参加可否や詳細については 12/17(火)12:00 までに随時メールにてご連絡させていただきます。

・参加可否を問わず、ご応募いただいた方にはご連絡をさせていただく予定です。もし 12/17(火)12:00 までに自分の手元にメールが届いていない、という場合、フォームでの入力うまくいっていないか、こちらからのメール送信に漏れがある可能性があります。

その場合は下記問い合わせ先へご連絡ください。

【お問い合わせ先】

ご質問やご不明な点がございましたら、下記の連絡先にお問い合わせください。

研究実施者

奥田 真(おくだ まこと)

北陸先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科 融合科学共同専攻

池田 心 研究室 修士 2 年

Mail: xxxxxxxx@yyyy.zz

研究代表者

北陸先端科学技術大学

教授

池田 心(いけだ こころ)

付 録C 事前アンケート

ここでは、事前アンケートの質問、回答項目について示す。

1. あなたは本実験が対面の場合でも参加してくれていましたか？

- 参加しなかった
- 参加した（追加質問：1-1）

1-1. 参加しない理由はなぜですか？

- 時間がないから
- 現地に集まるのが面倒だから
- その他（追加質問：1-1-1）

1-1-1. その他の場合、理由を具体的に教えてください。（自由記述）

2. ボードゲームやカードゲーム全般にどのくらい経験がありますか？

- 全く経験がない
- あまり経験がない（追加質問：2-1）
- どちらともいえない（追加質問：2-1）
- ある程度経験がある（追加質問：2-1）
- 非常に豊富な経験がある（追加質問：2-1）

2-1. ゲーム「Hanabi」の経験はありますか？

- 未プレイ
- 1-10 回（追加質問：2-1-1, 2-1-2）
- 10-30 回（追加質問：2-1-1, 2-1-2）
- 30-50 回（追加質問：2-1-1, 2-1-2）
- 50 回以上（追加質問：2-1-1, 2-1-2）

2-1-1. 最後に Hanabi をプレイしたのはいつですか？

- 覚えていない
- 1 年以上前
- 3 か月から 1 年前
- 3 か月以内

2-1-2. あなたの Hanabi（25 点満点）の平均スコアは？

- 覚えていない
- 5 点以下
- 6-10 点
- 11-15 点
- 16-20 点
- 21 点以上

付 録D ゲームごとアンケート

ここでは、ゲームごとアンケートの質問、回答項目について示す。なお、それぞれの回答項目は「覚えていない」ものと自由記述のものを除き5段階リッカート尺度である。

今回のゲームは楽しかったですか？

- 1. 全く楽しくなかった
- 2. あまり楽しくなかった
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度楽しかった
- 5. 非常に楽しかった
- 覚えていない

この AI の出すヒントは有益でしたか？

- 1. 全く有益ではなかった
- 2. あまり有益ではなかった
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度有益だった
- 5. 非常に有益だった
- 覚えていない

自分の出したヒントを十分に理解して役立ててくれましたか？

- 1. 全く役立ててくれなかった
- 2. あまり役立ててくれなかった
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度役立ててくれた
- 5. 十分に役立ててくれた
- 覚えていない

この AI と次にゲームをプレイしたとき、さらにスコアを伸ばせそうですか？

- 1. 全く伸ばせそうにない
- 2. あまり伸ばせそうにない
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度伸ばせそう
- 5. 非常に伸ばせそう
- 覚えていない

この AI の挙動は読めましたか？

- 1. 全く読めなかった
- 2. あまり読めなかった
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度読めた
- 5. 非常によく読めた
- 覚えていない

以降は6ゲーム後のみ、1度限り追加で質問が行われる。

アプリのインターフェース（UI）の操作性はどう感じましたか？

- 1. 非常に使いにくい
- 2. やや使いにくい
- 3. どちらともいえない
- 4. やや使いやすい
- 5. 非常に使いやすい

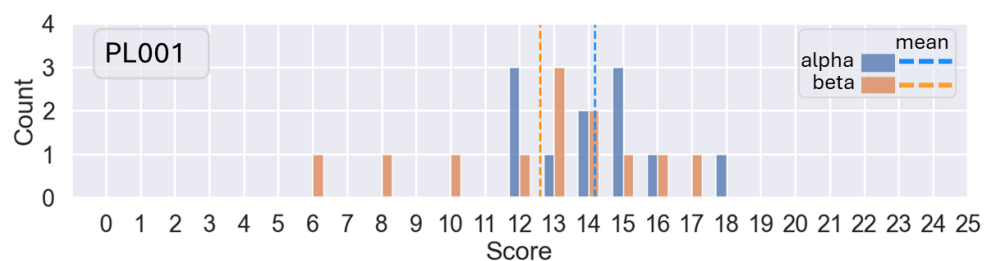
あなたはここまでのゲーム中、集中力は維持できましたか？

- 1. 全く維持できなかった
- 2. あまり維持できなかった
- 3. どちらともいえない
- 4. ある程度維持できた
- 5. 完全に維持できた

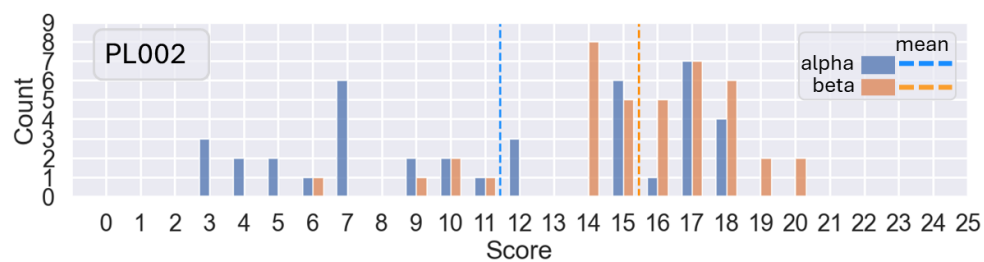
アプリに改善してほしい点があれば自由に記入してください（AI以外。特になければ「なし」と記入ください。）（自由記述）

付 録E 各被験者の獲得得点

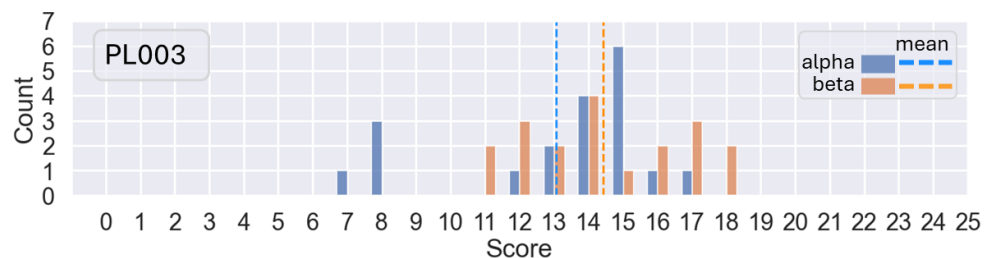
次ページ以降で、各被験者ごとの獲得得点の分布を示す。縦軸がゲーム数 (Count)、横軸が得点 (Score) で、右に各種代表値を示す。



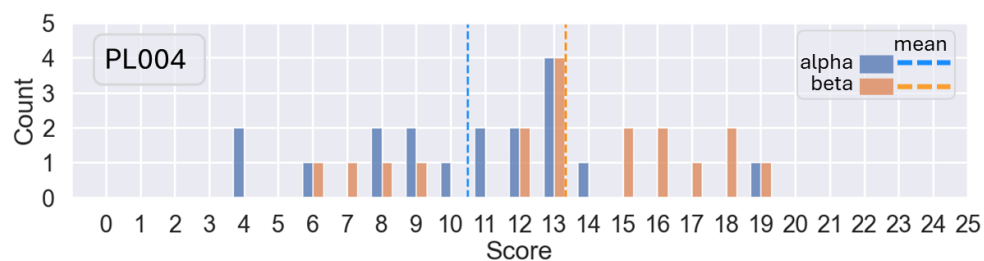
alpha	mean	14.18
	s.d.	1.89
	median	14.0
	count	11
beta	mean	12.58
	s.d.	3.20
	median	13.0
	count	12



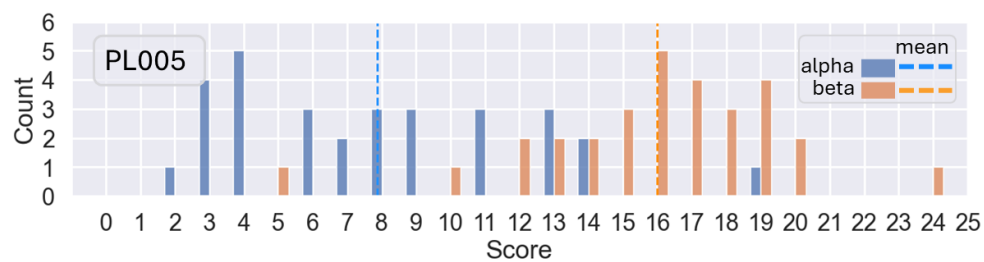
alpha	mean	11.43
	s.d.	5.21
	median	12.0
	count	40
beta	mean	15.45
	s.d.	3.00
	median	16.0
	count	40



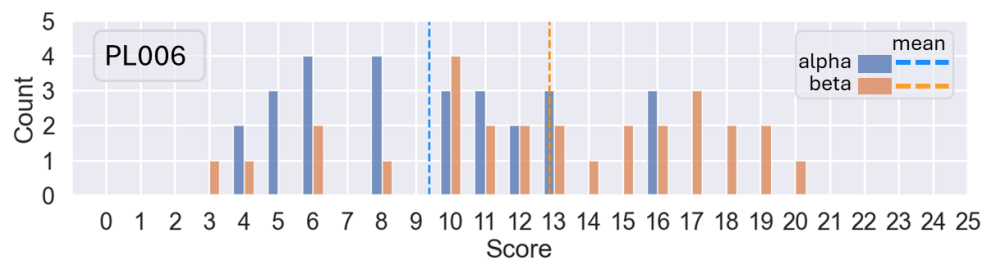
alpha	mean	13.05
	s.d.	3.03
	median	14.0
	count	19
beta	mean	14.42
	s.d.	2.32
	median	14.0
	count	19



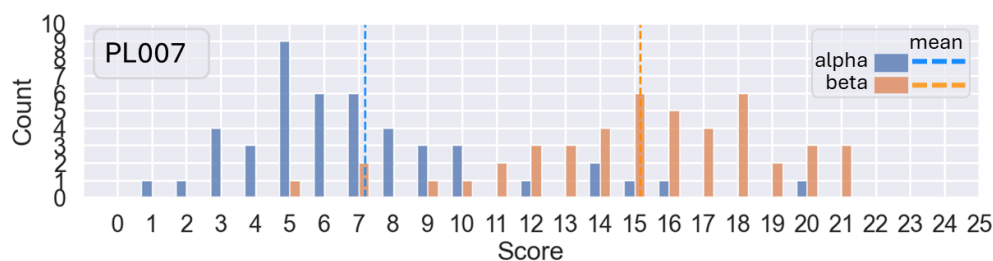
alpha	mean	10.50
	s.d.	3.73
	median	11.0
	count	18
beta	mean	13.33
	s.d.	3.87
	median	13.0
	count	18



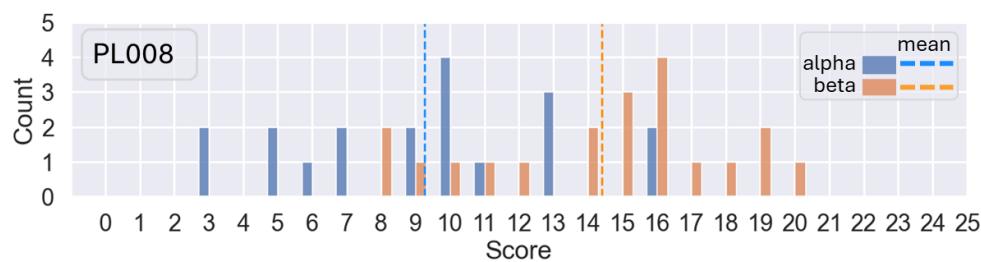
alpha	mean	7.87
	s.d.	4.26
	median	7.5
	count	30
beta	mean	16.00
	s.d.	3.55
	median	16.0
	count	30



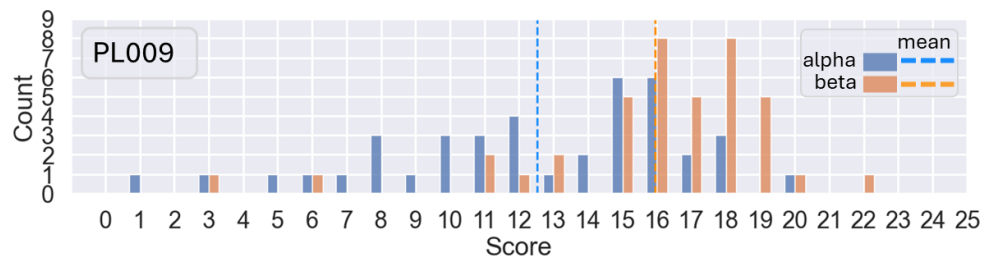
alpha	mean	9.37
	s.d.	3.73
	median	10.0
	count	27
beta	mean	12.86
	s.d.	4.70
	median	13.0
	count	28



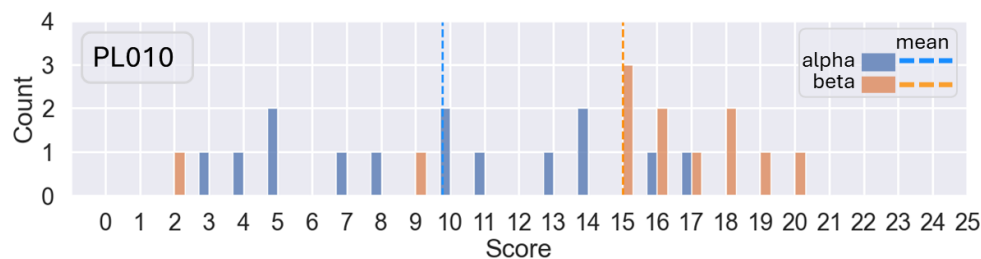
alpha	mean	7.02
	s.d.	4.01
	median	6.0
	count	46
beta	mean	15.17
	s.d.	3.81
	median	15.5
	count	46



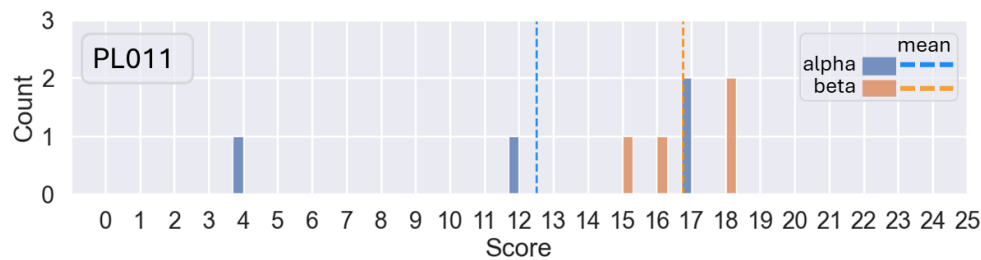
alpha	mean	9.26
	s.d.	3.90
	median	10.0
	count	19
beta	mean	14.40
	s.d.	3.65
	median	15.0
	count	20



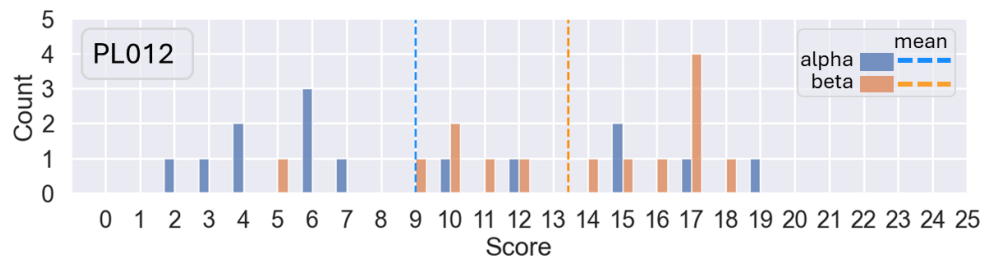
alpha	mean	12.53
	s.d.	4.40
	median	13.5
	count	40
beta	mean	15.95
	s.d.	3.55
	median	16.5
	count	40



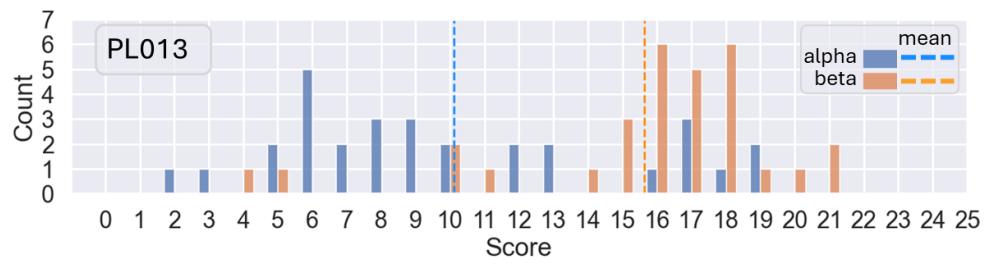
alpha	mean	9.79
	s.d.	4.59
	median	10.0
	count	14
beta	mean	15.00
	s.d.	4.95
	median	16.0
	count	12



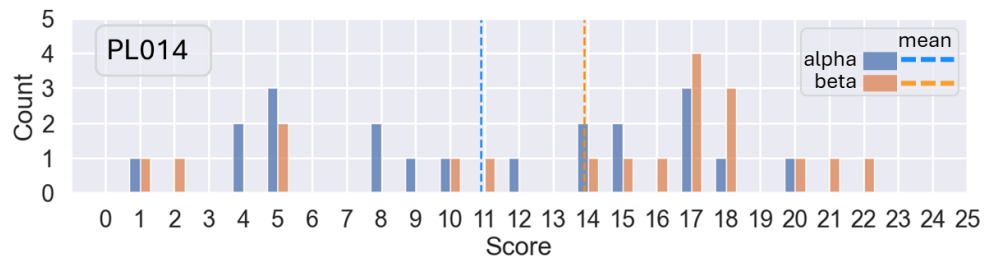
alpha	mean	12.50
	s.d.	6.14
	median	14.5
	count	4
beta	mean	16.75
	s.d.	1.50
	median	17.0
	count	4



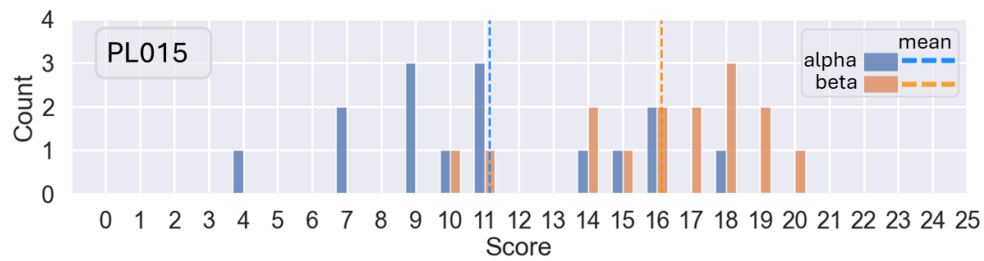
alpha	mean	9.00
	s.d.	5.63
	median	6.5
	count	14
beta	mean	13.43
	s.d.	3.96
	median	14.5
	count	14



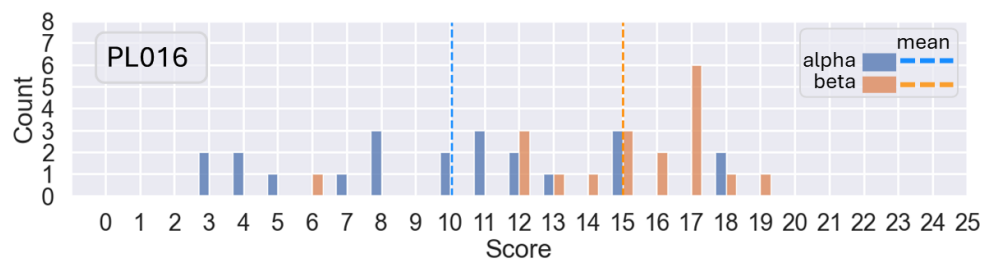
alpha	mean	10.10
	s.d.	4.95
	median	9.0
	count	30
beta	mean	15.63
	s.d.	4.02
	median	16.5
	count	30



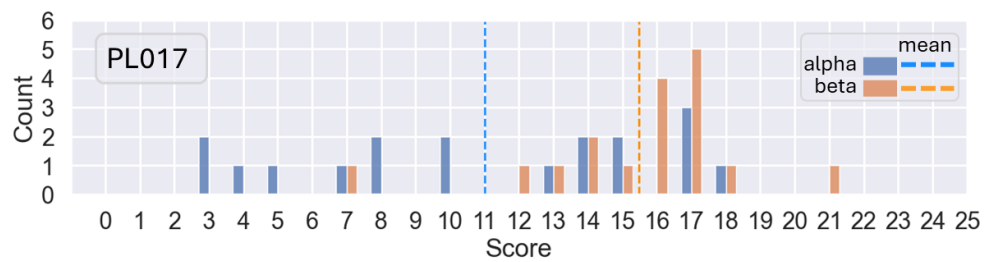
alpha	mean	10.90
	s.d.	5.70
	median	11.0
	count	20
beta	mean	13.89
	s.d.	6.40
	median	17.0
	count	19



alpha	mean	11.13
	s.d.	3.94
	median	11.0
	count	15
Beta	mean	16.13
	s.d.	2.90
	median	17.0
	count	15



alpha	mean	10.05
	s.d.	4.57
	median	10.5
	count	22
beta	mean	15.00
	s.d.	3.02
	median	16.0
	count	17



Alpha	mean	11.00
	s.d.	5.20
	median	11.5
	count	18
beta	mean	15.47
	s.d.	3.00
	median	16.0
	count	17

付 録F 6ゲーム後アンケートの回答結果のヒートマップ

ここでは、6ゲーム後アンケートの2つの質問項目の関連を示すヒートマップを示す。縦軸は「アプリのインターフェース（UI）の操作性はどう感じましたか?」という質問に対する回答結果（UI Usability）で、「あなたはここまでのゲーム中、集中力は維持できましたか?」という質問に対する回答結果（Attention Maintenance）である。回答結果はいずれも5段階リッカート尺度で、UI Usability の回答は、1に近いほどUIが使いにくく、5に近いほどUI使いやすい回答であったことを意味する。Attention Maintenance の回答は、1に近いほど集中力を維持できず、5に近いほど集中力を維持できた回答であったことを意味する。また、ヒートマップは5×5のメトリクスで構成されており、各マスの中央にはそのマスの回答をした被験者数を記載した。例えば、UI Usability を2と回答し、Attention Maintenance を3と回答した被験者数は2人である。2つの質問項目の回答結果には、若干の正の相関が見て取れる。

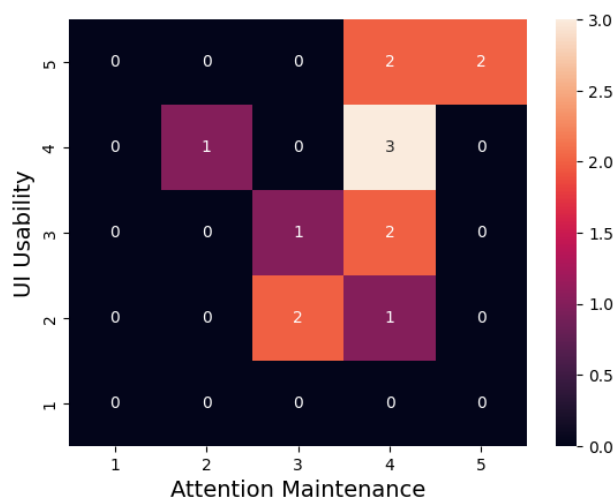


図 F.1: 6ゲーム後アンケートの回答結果のヒートマップ

参考文献

- [1] Murray Campbell, A Joseph Hoane, and Feng-Hsiung Hsu. Deep blue. *Artificial intelligence*, Vol. 134, No. 1, pp. 57–83, 1 January 2002.
- [2] David Silver, Aja Huang, Chris J Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel, and Demis Hassabis. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search. *Nature*, Vol. 529, No. 7587, pp. 484–489, 27 January 2016.
- [3] Noam Brown and Tuomas Sandholm. Superhuman AI for multiplayer poker. *Science (New York, N.Y.)*, Vol. 365, No. 6456, pp. 885–890, 30 August 2019.
- [4] OpenAI, Christopher Berner, Greg Brockman, Brooke Chan, Vicki Cheung, Przemysław Dębiak, Christy Dennison, David Farhi, Quirin Fischer, Shariq Hashme, Chris Hesse, Rafal Józefowicz, Scott Gray, Catherine Olsson, Jakub Pachocki, Michael Petrov, Henrique P d Pinto, Jonathan Raiman, Tim Salimans, Jeremy Schlatter, Jonas Schneider, Szymon Sidor, Ilya Sutskever, Jie Tang, Filip Wolski, and Susan Zhang. Dota 2 with large scale deep reinforcement learning. *arXiv [cs.LG]*, 13 December 2019.
- [5] Kokoro Ikeda, Simon Viennot, and Naoyuki Sato. Detection and labeling of bad moves for coaching go. In *2016 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*, pp. 1–8. IEEE, September 2016.
- [6] Julian Togelius, Renzo De Nardi, and Simon M Lucas. Towards automatic personalised content creation for racing games. In *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pp. 252–259. IEEE, 2007.

- [7] Juan Ortega, Noor Shaker, Julian Togelius, and Georgios N Yannakakis. Imitating human playing styles in super mario bros. *Entertainment computing*, Vol. 4, No. 2, pp. 93–104, April 2013.
- [8] 藤井叙人, 佐藤祐一, 若間弘典, 風井浩志, 片寄晴弘. 生物学的制約の導入によるビデオゲームエージェントの「人間らしい」振舞いの自動獲得. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 7, pp. 1655–1664, 15 July 2014.
- [9] Cocktail Games. Cocktail games. <https://www.cocktailgames.com/>. Accessed: 2025-1-27.
- [10] Boutiques jeux de rôles XII singes. <https://www.les12singes.com/>. Accessed: 2025-1-27.
- [11] H Siu, Jaime D Peña, K Chang, Edenna Chen, Yutai Zhou, Victor J Lopez, Kyle Palko, and R Allen. Evaluation of human-AI teams for learned and rule-based agents in hanabi. *Neural Information Processing Systems*, Vol. 34, pp. 16183–16195, 15 July 2021.
- [12] 川越敦, 大澤博隆. Hanabi ゲームにおける認知モデルを用いた協力行動分析の提案. *Hospitals & health networks 360 degrees: H&HN 360 degrees*, 2022.
- [13] Hanabi - spiel des jahres. <https://www.spiel-des-jahres.de/spiele/hanabi/>, 3 May 2019. Accessed: 2025-1-27.
- [14] Hanabi - board game arena. <https://boardgamearena.com/gamepanel?game=hanabi>. Accessed: 2024-7-9.
- [15] Nolan Bard, Jakob N Foerster, Sarath Chandar, Neil Burch, Marc Lanctot, H Francis Song, Emilio Parisotto, Vincent Dumoulin, Subhodeep Moitra, Edward Hughes, Iain Dunning, Shibli Mourad, Hugo Larochelle, Marc G Bellemare, and Michael Bowling. The hanabi challenge: A new frontier for AI research. *Artificial intelligence*, Vol. 280, p. 103216, 1 March 2020.
- [16] Markus Eger, Chris Martens, and Marcela Alfaro Cordoba. An intentional AI for hanabi. In *2017 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG)*, pp. 68–75. IEEE, August 2017.
- [17] Matthew Sidji, Wally Smith, and Melissa J Rogerson. The hidden rules of hanabi: How humans outperform AI agents. In *Proceedings of the 2023 CHI*

- Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. Article 757 in CHI '23, pp. 1–16, New York, NY, USA, 19 April 2023. Association for Computing Machinery.
- [18] 大澤博隆. Hanabi コンペティション —不完全情報下における相互協力—. 人工知能, Vol. 35, No. 3, pp. 385–389, 2020.
 - [19] Hirotaka Osawa. Solving hanabi: Estimating hands by opponent’s actions in cooperative game with incomplete information. In *Computer Poker and Imperfect Information - Papers Presented at the 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence, Technical Report*, pp. 37–43. AI Access Foundation, 2015.
 - [20] IEEE conference on computational intelligence and games, 14-17 august 2018, maastricht (the netherlands) – IEEE conference. <https://project.dke.maastrichtuniversity.nl/cig2018/>. Accessed: 2025-1-31.
 - [21] Joseph Walton-Rivers, Piers R Williams, and Richard Bartle. The 2018 hanabi competition. In *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, pp. 1–8. IEEE, August 2019.
 - [22] James Goodman. Re-determinizing MCTS in hanabi. In *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, pp. 1–8. IEEE, August 2019.
 - [23] hanabi-learning-environment: hanabi_learning_environment is a research platform for hanabi experiments.
 - [24] Adam Lerer, Hengyuan Hu, Jakob Foerster, and Noam Brown. Improving policies via search in cooperative partially observable games. *Proceedings of the ... AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 34, No. 05, pp. 7187–7194, 3 April 2020.
 - [25] Hengyuan Hu, Adam Lerer, Alex Peysakhovich, and Jakob Foerster. “Other-play” for zero-shot coordination. In Hal Daumé III and Aarti Singh, editors, *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*, 第 119 卷 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pp. 4399–4410. PMLR, 13–18 Jul 2020.
 - [26] Claire Liang, Julia Proft, Erik Andersen, and Ross A Knepper. Implicit communication of actionable information in human-AI teams. In *Proceedings*

- of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. Paper 95 in CHI '19, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2 May 2019. Association for Computing Machinery.
- [27] Hengyuan Hu and Dorsa Sadigh. Language instructed reinforcement learning for human-AI coordination. *International Conference on Machine Learning*, Vol. 202, pp. 13584–13598, 13 April 2023.
- [28] 加藤拓也, 大澤博隆. 他者視点の推定を用いたエージェント評価の向上: カードゲーム hanabi の AI との対戦分析から. 人工知能学会全国大会論文集 第 32 回 (2018), 2018.
- [29] Kansei Miyata and Hirotaka Osawa. Analysis of implicit signals in the cooperative card game hanabi. *HAI symposium 2024*, 2024.
- [30] ShogiHome. <https://sunfish-shogi.github.io/shogihome/>. Accessed: 2025-1-31.