

次第に速くなる虚偽心拍フィードバックを用いた ゲーム体験の向上

小川 紗也加¹ 藤原 幸一¹ 山川 俊貴² 阿部 恵里花¹ 加納 学¹

概要: 面白いビデオゲームでプレイヤーが興奮を感じると、発汗や心拍数上昇などの生理反応が現れる。そこで本研究では、次第に速くなる心拍音を提示することでプレイヤーに興奮の高まりを錯覚させ、ゲーム体験を変化させることを目指す。実験では、参加者30名を(A)虚偽心拍提示、(B)実心拍提示、(C)提示なしの3条件に振り分け、心拍音を聞きながらアクションゲームをプレイした時のゲーム体験および生理反応を調べた。実験結果から、虚偽心拍フィードバックによりゲームに対する飽きを抑制でき、没入感を高められることが示された。さらに、プレイヤーに負担をかけることなくゲームプレイ中の心拍数を計測し、音と振動によって心拍を提示できるゲームコントローラを開発し、その心拍計測性能を評価した。

False Increasing Heart Rate Feedback For Improvement of Game Experience

SAYAKA OGAWA¹ KOICHI FUJIWARA¹ TOSHITAKA YAMAKAWA² ERIKA ABE¹ MANABU KANO¹

Abstract: When a player feels excited by an interesting video game, physiological responses such as sweating and rising heart rate appear. In this work, we propose false heart rate (HR) feedback for improving game experience by letting a player perceive such physiological responses. 30 experimental participants were equally divided into three conditions: (A) false HR feedback group; (B) measured HR feedback group; and (C) no feedback group. We examined effect of false HR feedback on game experience by questionnaire ratings and physiological reactions of the participants. The results indicated that false HR feedback could enhance players' immersion without getting tired of the game. After confirming the results, we developed a new game controller that can present HR information audibly and tactually. Finally, we evaluated its HR measurement performance through experiments.

1. はじめに

ビデオゲームをプレイしている間の生体計測は、新たなゲームインタラクションの創出につながる可能性を秘めている。これまでもプレイヤーの生体情報を活用した様々なゲームシステムが提案されてきた。Nogueiraら[1]は心拍、皮膚電気反応、顔表面筋電図などの生体情報に基づきゲームイベントを引き起こすことで、ホラーゲームでプレイヤーが感じる恐怖を強調および緩和することに成功したと報告している。また、手指から容易に取得可能な脈波は、ゲー

ム体験を損なうことなく計測できるため、脈波センサによるゲーム中の心拍計測を提案する研究もある。たとえば、阿部ら[2]は脈波センサを組み込んだゲームコントローラを開発した。このように従来研究では、生体情報からプレイヤー感情を推定し、それに基づきゲーム体験を変化させることを目指している。しかし、主観的感情と生理的状態の関係には個人差があり、万人に向けたゲームシステムを構築するのは困難であると考えられる。

そこで本研究では、虚偽心拍フィードバックによってプレイヤーに生理的興奮の高まりを錯覚させることで、ゲーム体験を向上させることを目指す。ここで虚偽心拍フィードバックとは、実際の心拍よりも高い、もしくは低い心拍を視覚や聴覚、触覚に訴える形で提示することをいう。虚

¹ 京都大学
Kyoto University

² 熊本大学
Kumamoto University

偽心拍フィードバックによってユーザに自身の生理的状態の変化を錯覚させ、主観的体験を転ずる試みとしては、Valins [3] の研究が知られている。この研究は、実際の心拍より高い、もしくは低い心拍を聴覚提示することで、異性の写真に対して感じる魅力を強められることを示したものである。西村ら [4] は、ボイスコイルを用いた心拍の触覚提示で同様の実験を行い、実際よりも高い心拍の提示によって異性への好意を操作できる可能性を示した。このように、虚偽心拍フィードバックは主観的体験に影響を与える。

本研究では、まず、心拍の聴覚提示とともにシンプルなアクションゲームを繰り返しプレイする実験を通じて、虚偽心拍フィードバックによるプレイヤーのゲーム体験への影響を調べる。2節で本実験の詳細と結果について報告する。さらに、実験で虚偽心拍フィードバックがゲーム体験を向上させることを確認した後、心拍を聴覚・触覚提示できるゲームコントローラを開発し、その心拍計測精度を評価する。3節ではゲームコントローラの仕様と、心拍計測精度の検証結果について述べる。最後に4節で、結果のまとめと今後の課題を述べる。

2. 虚偽心拍フィードバックのゲーム体験への影響

虚偽心拍フィードバックがプレイヤーのゲーム体験に与える影響を調査するため、実験参加者にシンプルなアクションゲームをプレイしてもらう実験を行った。実験参加者は18~34歳の健常者30名であり、うち男性は17名、女性は13名であった。なお、本実験は京都大学大学院情報学研究科倫理委員会によって承認された。

実験では、1分間の休憩、4分間のゲームプレイ、その後の質問紙回答から構成されるセッションを5回繰り返した。参加者は(A)虚偽心拍提示、(B)実心拍提示、(C)提示なし(コントロール)の3条件に10名ずつ振り分けられた。条件Aでは実心拍数より次第に速くなっていく虚偽心拍数に基づいて心拍音を提示し、条件Bでは参加者から計測した実心拍数に基づいて心拍音を提示した。条件間で参加者のゲームスキルに偏りが生じないように、参加者の振り分けは事前にプレイしてもらったアクションゲームのスコアに基づいて行った。

2.1 実験システム

本実験では、Unityで開発したシンプルなアクションゲームを用いた。ゲーム画面を図1に示す。プレイヤーはゲームキャラクターの進行方向をキー操作で切り替え、落ちてくるアイテムをできるだけ多く獲得するように教示された。

先行研究では、虚偽心拍フィードバックを用いてユーザ体験を変化させようと試みる際に、魅力的だと考えられる女性の写真を採用したり [3], [4], 次第に恐怖感を煽るよう



図1 実験で用いたビデオゲーム

Fig. 1 Video game used in the experiment

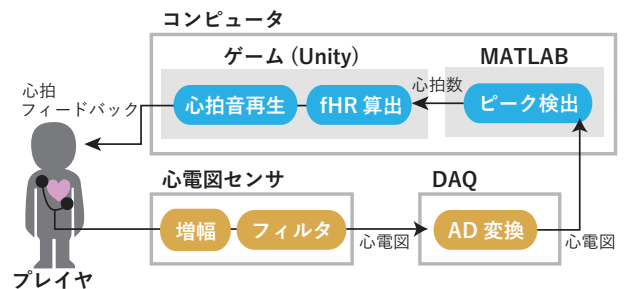


図2 実験システムのブロック図

Fig. 2 Block diagram of experimental system

なホラームービーを用意したりするなど [5], ある程度強い刺激を用いて実験を行っている。これは、虚偽心拍フィードバックが単独でユーザ体験を変化させるのではなく、心拍フィードバックと併せて提示した写真や映像などの刺激を強調することによって、ユーザ体験を変える効果を持つからだと考えられる。この仮定の下では、実験で提示する刺激が弱すぎる場合、ユーザ体験の変化が観察できない恐れがある。そこで、本実験ではゲームが退屈になりすぎないように、ゲーム開始直後からゲームスピードが徐々に速くなるよう設計した。

図2に、実験システムの構成を示す。実験中、心電図センサ [6] により参加者の心電図を計測し、A-D変換器 (cDAQ-9171, National Instruments) によりサンプリング周波数 250Hz で取得した。心電図 R 波のピーク検出は MATLAB で行い、10 秒間移動平均心拍数を算出した。本研究ではこれをプレイヤーの実心拍数 HR とする。算出した心拍数はリアルタイムにゲームへ送信され、心拍フィードバックに用いられるとともに、ゲーム体験評価のため記録された。

2.2 心拍フィードバック

ゲームプレイ中、参加者が身につけたヘッドフォンから心拍音を再生した。実験条件を統一するため、心拍音を提示しない統制群 (条件 C) でも参加者はヘッドフォンを装

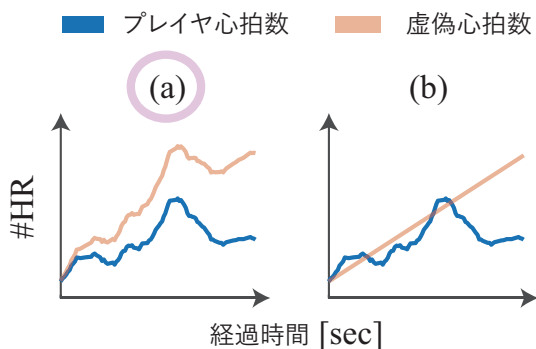


図 3 次第に速くなる虚偽心拍数 (本研究では (a) を採用)

Fig. 3 False increasing HR ((a) was used in the experiment)

着した。

先行研究では図 3 の (a) と (b) の虚偽心拍提示法を比較し、(a) 実心拍に基づいて上昇する虚偽心拍数のほうが (b) 線形に上昇する虚偽心拍数よりも、効果的にユーザ体験を変化させたことが報告されている [5]。そこで、本研究でも (a) の方式を採用し虚偽心拍数を算出した。条件 A では、音声提示する心拍数 fHR (feedback heart rate) を次式に従い決定した。

$$fHR = t/8 + HR \quad (1)$$

ここで、 t はゲーム開始からの経過時間 [sec]、HR は実心拍数 [bpm] である。式 (1) より fHR はゲーム開始時には実心拍数であるが、時間経過に伴い実心拍数よりも速くなることがわかる。一回のゲームプレイは 4 分間であるため、ゲーム終了時には fHR は実心拍数よりも 30 bpm 高い値となる。一方、条件 B では実心拍数をそのままフィードバックした。条件 A, B ともに、ヘッドフォンから聞こえる心拍音は実際の心拍数に基づく音であると、参加者に対して教示した。

2.3 評価法

参加者は各セッションでのゲームプレイ終了時に、表 1 に示す質問紙に回答した。各項目は 5 段階 (1: 全く当てはまらない, 2: あまり当てはまらない, 3: どちらでもない, 4: 少し当てはまる, 5: 大変当てはまる) の Likert 尺度で評価される。14 個の質問のうち 12 個はゲーム体験を評価するためのものであり、既存の英語質問紙である Game Experience Questionnaire (GEQ) [7] を参考に設定した。ゲーム体験の評価項目は楽しさ、飽き、没入感、手ごたえ、優越感、緊張感の 6 項目である。各評価項目のスコアは、対応する 2 つの質問文の評価値の平均とする。残り 2 個の質問文は心拍フィードバックに関する設問で、それぞれ心拍音に対する注意と、心拍フィードバックの効果を測ることを意図して設定した。なお、心拍音を再生しない統制群 (条件 C) には、13 番の質問文を提示しなかった。また、条件 A, B 群に対する実験後のアンケートにて、提示した心拍

表 1 質問紙

Table 1 Questionnaire

	質問文	評価項目
1	私はこのゲームが得意だ	優越感
2	ゲームは退屈だった	飽き
3	ゲームに熱中した	没入感
4	ゲームにイライラした	緊張感
5	ゲームをして疲れた	飽き
6	上手に操作できた	優越感
7	体感時間が早かった	没入感
8	ゲームは楽しかった	楽しさ
9	ゲームは難しかった	手ごたえ
10	次はもっと上手くやりたい	手ごたえ
11	ゲーム中、気分が良かった	楽しさ
12	ゲーム中、緊張していた	緊張感
13	心拍音が気になった	心拍音に対する注意
14	ゲーム中に焦りを感じた	焦り

音に実心拍からの乖離や違和感を感じたかどうか尋ねた。

2.4 結果と考察

ゲーム体験の評価項目のスコア推移 (セッション 1, 3, 5) を図 4 に示す。セッション毎に各条件群 (A, B, C) の平均スコアを算出し、セッションの繰り返しに伴う変化をプロットした。各評価項目のスコアに関して二要因混合計画 (参加者間要因: 心拍提示条件, 参加者内要因: 繰り返し回数) の分散分析を行った。なお、有意水準は 5% とした。

項目「飽き」について、心拍提示条件と繰り返し回数の交互作用が有意であった ($F(4, 54) = 3.27, p = 0.018$)。また、心拍提示条件の主効果 ($F(2, 27) = 2.27, p = 0.026$) と繰り返し回数の主効果 ($F(4, 54) = 27.6, p < 0.0001$) についても、それぞれ有意であった。多重比較を行ったところ、条件 B, C ともに 1 回目と 5 回目の間、3 回目と 5 回目の間で有意差が観察された (いずれも $p < 0.05$) が、条件 A では繰り返しに伴う有意差はみられなかった。図 4 より、条件 B, C ではゲームの繰り返しに伴い「飽き」のスコアが上昇しているが、条件 A では抑制できていることがわかる。また、1 回目には条件 A, C 間にスコアの有意差は見られなかったが、3 回目以降では条件 A のほうが条件 C よりも有意に低いスコアを示した (セッション 1: $p = 0.69$, セッション 3: $p = 0.049$, セッション 5: $p = 0.0033$)。これらの結果から、虚偽心拍フィードバックを行った条件 A では、ゲームの繰り返しに伴う飽きを抑制できたことがわかる。

項目「没入感」では、交互作用と繰り返し回数の主効果はいずれも有意でなかった一方、心拍提示条件間で有意差が観察された ($F(2, 27) = 4.23, p = 0.025$)。条件 A は条件 B, C よりも高いスコアを示しており (A, B 間: $p = 0.034$, A, C 間: $p = 0.041$)、虚偽心拍を提示した群は他群に比べ、ゲームに熱中し、強い没入感を感じられたと考えられる。

** : $p < .01$, * : $p < .05$

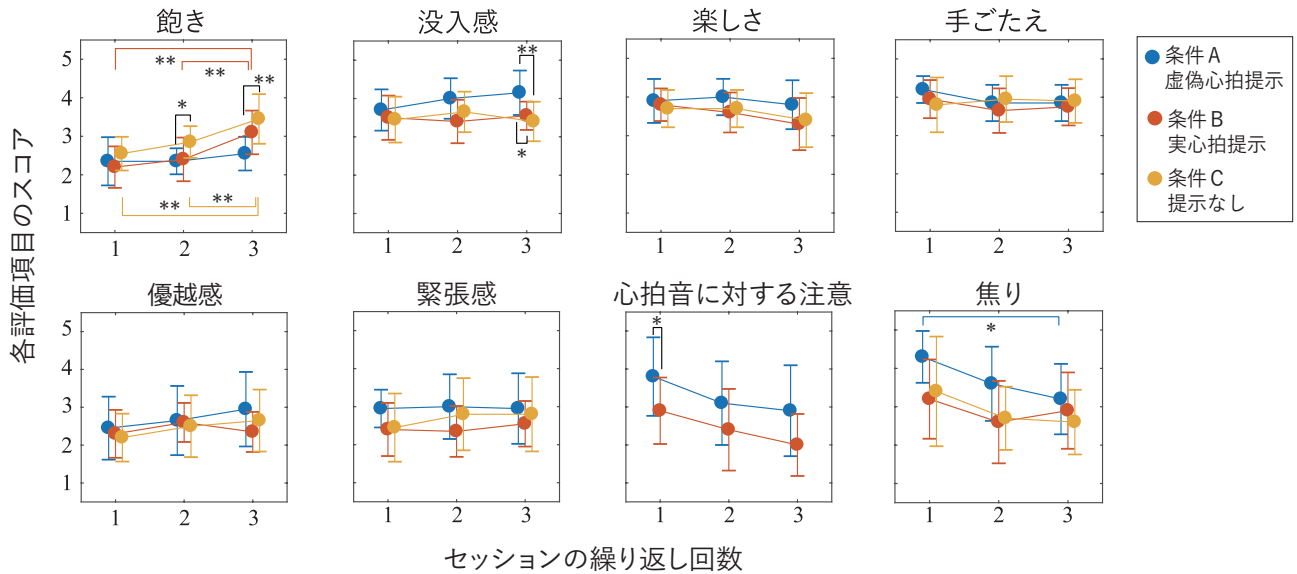


図 4 条件群ごとの質問紙回答の推移 (セッション 1, 3, 5 回目)

Fig. 4 Mean questionnaire scores of the 1st, 3rd, and 5th sessions

他の評価項目では、「楽しさ」について繰り返し回数の主効果が有意であった ($F(4, 54) = 0.81, p = 0.021$) が、交互作用はなく、心拍提示条件間の有意差も確認できなかった。図 4 からも繰り返しに伴い各群で「楽しさ」のスコアが減少する様子が見取れるが、条件群間の差は有意でなかった。また、項目「手ごたえ」「優越感」「緊張感」については、交互作用、両要因の主効果ともに有意でなかった。

一方、条件 A, B 群のみに対して質問した項目「心拍音に対する注意」では、交互作用はみられず、繰り返し回数間 ($F(2, 36) = 6.27, p = 0.0046$) と心拍提示条件間 ($F(1, 18) = 5.76, p = 0.027$) で有意差が見られた。条件 A では上昇していく心拍数を提示したことで、条件 B よりも高い注意を引きつけたと考えられる。スコアはセッション 1 回目から 5 回目にかけて有意に減少しており ($p = 0.023$)、いずれの群でも次第に心拍フィードバックへの慣れが生じ、心拍音へ向ける注意が小さくなっていったことがわかる。

また、項目「焦り」についても、交互作用はなく、繰り返し回数間 ($F(4, 54) = 7.94, p = 0.00094$) と心拍提示条件間 ($F(2, 27) = 3.72, p = 0.037$) で有意差が観察された。「心拍音に対する注意」と同様に、繰り返し回数が増えるにつれてスコアは減少した (1 回目と 3 回目, 1 回目と 5 回目: $p < 0.05$)。図 4 中では統制群 (条件 C) でも次第にスコアが減少していることから、これらのスコアの減少には、繰り返しに伴うフィードバックへの慣れだけでなく、ゲームそのものへの慣れも影響していると考えられる。しかし、虚偽心拍フィードバックを繰り返すとプレイヤーの刺激への慣れを誘発する恐れがある点には、ゲームをデザインする際に留意すべきであろう。

さらに、実験後のアンケートで条件 A, B 群に対し、心拍音に対して実際の心拍との乖離や違和感を感じたか尋ねたところ、条件 A 群では 10 名中 4 名、条件 B 群では 10 名中 5 名が違和感を感じたと答えた。条件 A にて、心拍音に違和感を感じなかった群 A' と違和感を感じた群 A'' でゲーム体験のスコアに違いがあるか調べたが、全ての評価項目において有意差は観察されなかった。条件 B でも同様に、違和感の有無によって全評価項目に有意差は見られなかった。

条件 A では最終的に実心拍数より 30 bpm も高い心拍数をフィードバックしているが、違和感を感じた人数は条件 B とほぼ同じであった。提示する心拍音は 240 秒間かけて速くなり、併せてゲームの要求する操作量も多くなるため、A' 群の参加者は自身の生理的興奮の高まりによって心拍数が上昇したと錯覚し、提示心拍数と実心拍数の乖離に気づかなかつたと考えられる。このように、A' 群には虚偽心拍フィードバックの効果が狙い通りあらわれたと予想されるが、A'' 群との間でゲーム体験に関する有意差はなかった。この結果から、虚偽心拍フィードバックによりゲーム体験を向上させるには、必ずしもプレイヤーが提示された虚偽心拍数を自身の心拍数だと感じる必要はないことが示唆された。一方、実際の心拍数に基づくフィードバックを行った条件 B でも、参加者の半数程度は提示された心拍音に疑問を抱いた。プレイヤーの心拍数に対する知覚は曖昧であり、虚偽の心拍を提示しても気づかれにくいと考えられる。どのような提示法であればプレイヤーが心拍音に違和感を感じにくいのか、また、提示される心拍音が虚偽であると確信していてもゲーム体験は向上するののかについて検討するに

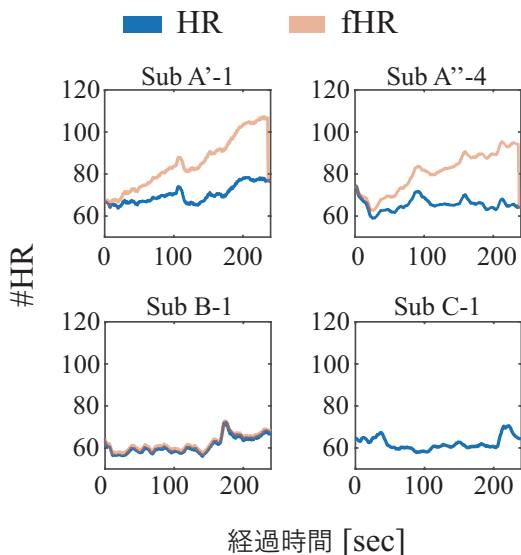


図 5 実心拍数変化の代表例 (セッション 3)

Fig. 5 Examples of measured HR during the 3rd session (player A'-1, A''-4, B-1, and C-1)

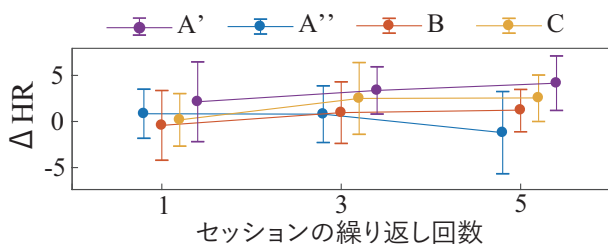


図 6 条件群・セッションごとの心拍上昇量の変化

Fig. 6 Increase in HR during game play of each condition

は、更なる実験が必要である。

続いて、プレイヤーの実際の実心拍数変化について考察する。図 5 には各条件を代表して、参加者 A'-1, A''-4, B-1, C-1 における 3 回目のゲームプレイ時の実心拍数を示す。条件 A 群では、参加者 A'-1 のように経過時間に伴い心拍が上昇すると予想していたが、A''-4 のように心拍の上昇が見られない参加者もいた。

条件 A 群を A' 群と A'' 群に分け、改めてゲーム序盤から終盤にかけての実心拍数上昇量について二要因混合計画 (参加者間要因: 条件 A', A'', B, C 群, 参加者内要因: 繰り返し回数) の分散分析を行った。ゲーム開始直後の心拍はゲームスタート時の身体動作や精神的負荷の影響を受けるため除外し、ゲームスタート後 40 ~ 70 秒における実心拍数の平均値と、210 ~ 240 秒における実心拍数の平均値の差を心拍数上昇量とした。図 6 に、各群における心拍数上昇量のセッションごとの推移を示す。条件群と繰り返し回数の交互作用、および繰り返し回数の主効果は確認されなかったが、条件群間には平均心拍数の上昇傾向がみられた ($F(3, 26) = 2.83, p = 0.058 < 0.1$)。単純主効果は、A' 群と B 群 ($p = 0.075$) と A' 群と A'' 群 ($p = 0.078$) で有

意差はなかったものの、同様の傾向がみられた。

すなわち、虚偽の心拍音に違和感を感じなかった A' 群は、違和感を感じた A'' 群や実心拍数を提示した B 群と比べ、ゲーム進行につれて心拍が上昇傾向にある。先行研究では、虚偽心拍フィードバックによって引き込み効果が生じ、実際に心拍数上昇などの生理的反応が起こることでユーザ体験が変わるとの仮説を提案しているものもある [5] が、今回の実験結果はこれに反し、明らかな生理的反応がなくともゲーム体験が変化したことを示唆している。しかし、A 群を 2 つに分けたことで A' 群は $n = 6$, A'' 群は $n = 4$ となっており、個人差の大きい生理的反応を考察するのに十分な n 数であったとは言い難い。さらに考察を進めるには、参加者数を増やした上で皮膚電気活動など他の生体情報も計測し、検討する必要がある。

3. 心拍提示ゲームコントローラの開発

実験の結果から、虚偽心拍フィードバックによってゲーム体験を向上できることが示唆された。しかし、ゲームプレイの度に心拍センサを身につけるのは面倒であり、かえってゲーム体験を損ないかねない。そこで本節では、プレイヤーに負担をかけることなく心拍数を計測し、音と振動によって心拍を提示できるゲームコントローラを提案する。開発したゲームコントローラの写真を図 7 に示す。ゲームコントローラは脈波センサを内蔵し、ゲームプレイ中の光電容積脈波 (Photoplethysmogram; PPG) を計測することで心拍数を取得する。さらに、体動アーチファクトを取り除くため光学式の体動センサを備えており、激しくゲームコントローラを操作しても体動に由来する誤検出が発生しにくい。以下では、ゲームコントローラの仕様を紹介した後、被験者実験で評価したゲームプレイ中の心拍計測性能について言及する。

3.1 構成

図 7 に示すように、ゲームコントローラの左側グリップ内側に反射型光電容積脈波センサを配置した。グリップには指を誘導するためのガイドを用意し、プレイヤーがゲームコントローラを握ると、自然に左手手中指末節内側が脈波セ

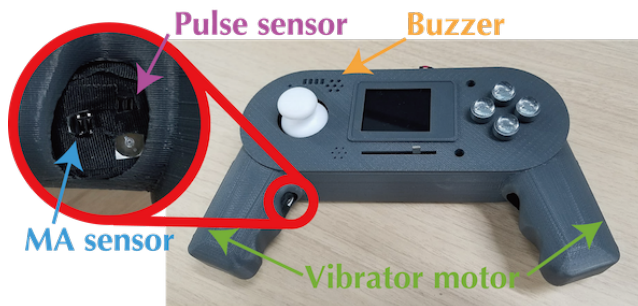


図 7 開発したゲームコントローラ

Fig. 7 Newly developed HR feedback game controller

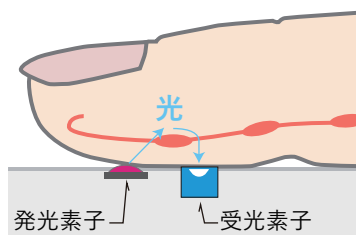


図 8 脈波センサ模式図

Fig. 8 Schematic diagram of PPG sensor

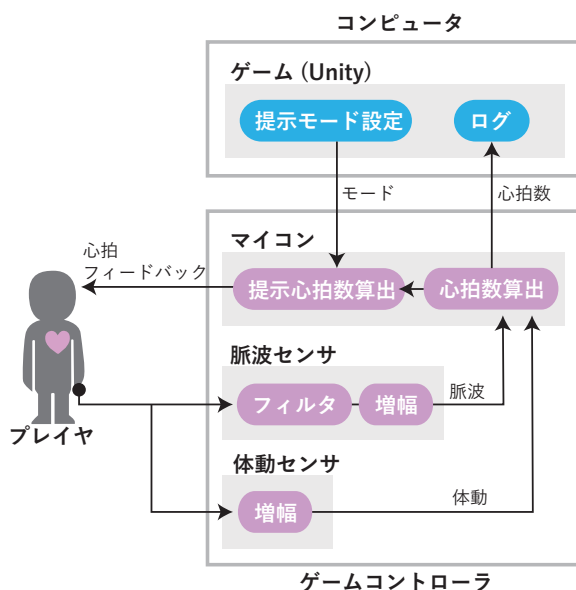


図 9 ゲームコントローラシステムのブロック図

Fig. 9 Block diagram of game controller's system

ンサに接触するようになっている。図 8 に示すのが脈波センサの模式図と回路図である。脈波センサは発光素子と受光素子によって構成される。発光素子から皮膚に対して光 (波長 940nm) を照射し、受光素子で反射光を計測すると、反射光強度は血中ヘモグロビンの増減に合わせて変動し、脈波信号が得られる。脈波信号は、ハイパスフィルタによってオフセットを取り除いた後に増幅され、Arduino Esplora によって取得される。

ゲームの操作量が多くなるにつれてゲームコントローラの操作は激しくなり、センサと計測部位の位置関係がズレやすくなる。このような体動アーチファクトの発生は、心拍の計測精度に影響する。そこで、体動の発生を検出できるよう、脈波センサから 5 mm 離れた位置に光学式の体動センサを配置した。体動センサは脈波センサよりも 1 mm 突出して配置されているため、敏感に指の動きを察知することができる。

ゲームコントローラには音と振動によって心拍を提示できる機能を搭載した。音の提示には Arduino Esplora の圧電ブザーを用い、振動の提示は両グリップの外側裏に配置したバイブモータによって行う。ゲームイベントにあわせ

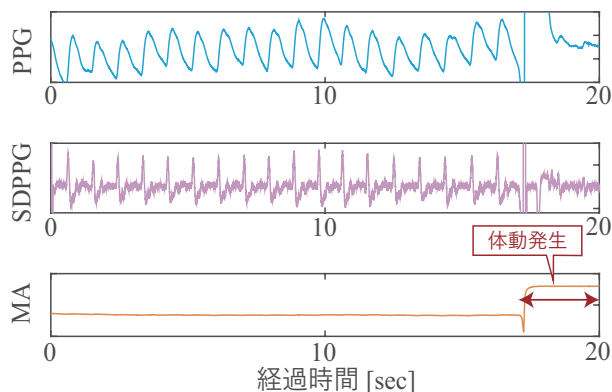


図 10 脈波 PPG, 加速度脈波 SDPPG, および体動 MA

Fig. 10 PPG, SDPPG, and MA obtained by the game controller

Algorithm 1 心拍数の算出

Input:

脈波センサの出力 PPG
 体動センサの出力 MA
 脈波センサの閾値 $\text{threshold}_{\text{SDPPG}}$
 体動センサの閾値 $\text{threshold}_{\text{MA}}$

Output:

心拍数 HR

- 1: if $\text{MA} < \text{threshold}_{\text{MA}}$ then
- 2: $\text{SDPPG} \leftarrow \text{PPG}$ の二階微分
- 3: if SDPPG が $\text{threshold}_{\text{SDPPG}}$ を上から下に超える then
- 4: ピーク間隔 p を算出
- 5: p の 10 秒間移動平均 \bar{p}_{10} を算出
- 6: $\text{HR} \leftarrow 60/\bar{p}_{10}$
- 7: end if
- 8: end if

て効果的に虚偽心拍フィードバックを実施できるように、提示する心拍数と提示のタイミングはコンピュータからシリアル通信で制御される。ゲームコントローラシステムのブロック図を図 9 に示す。

3.2 心拍数の算出

図 10 に、脈波センサによって取得した脈波 PPG と、脈波を二階微分した加速度脈波 SDPPG (second-derivative photoplethysmogram), および体動センサの出力 MA (motion artifact) を示す。心拍数を算出するにあたり脈波のピークを検出する必要があるが、脈波はなだらかな波形でありドリフトも生じるため、閾値を定めてのピーク検出に向かない。そこで、加速度脈波を算出し、加速度脈波が閾値 $\text{threshold}_{\text{SDPPG}}$ を上から下に超えるポイント間の間隔をピーク間隔とする。MA は指とセンサ部の接触状態を反映しており、指がセンサ部から外れると大きくなる。したがって、ゲーム開始前に閾値 $\text{threshold}_{\text{MA}}$ を設定し、MA がこれを超えた場合はピーク検出を行わないことで、体動アーチファクトの影響を抑制できる。

ゲームコントローラでの心拍数の算出法を Algorithm 1

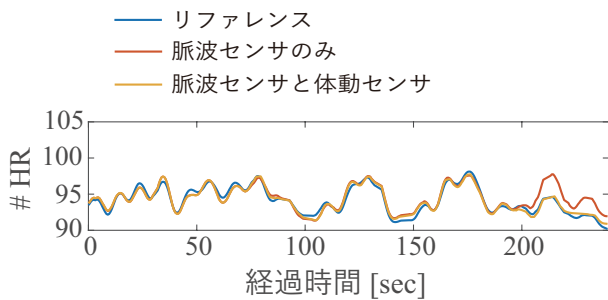


図 11 ゲームコントローラで取得した HR (脈波センサのみ, 脈波センサと体動センサ) とリファレンス

Fig. 11 HR measured by ECG sensor, PPG sensor, and PPG sensor combined with MA sensor (player 1)

に示す。心拍数は算出される度に、シリアル通信でコンピュータへ送信される。なお、これらの処理は Arduino Esp32 に搭載されたマイコンによって行われる。

3.3 計測性能評価

実際にゲームをプレイしているときの心拍を計測することで、ゲームコントローラの心拍計測性能を評価した。実験参加者は 18~22 歳の男女 5 名である。2 節の実験で用いたゲームを本ゲームコントローラによって 4 分間操作してもらい、その間の心拍数を取得した。リファレンスには 2 章と同様の心電図センサを用いた。

参加者 1 から計測した心拍数の変化を、図 11 に示す。赤線が脈波センサのみで計測した心拍数、黄線が近接センサと組み合わせて取得した心拍数、青線が心電図で取得したリファレンスである。ゲームは時間経過とともに難易度が上がり操作量が増えるように設計されているため、脈波センサのみを使った計測ではゲーム終盤となる 200 秒以降にエラーが生じている。これは頻繁に体動アーチファクトが生じたことに由来する誤検出によると考えられる。しかし、脈波センサと体動センサを組み合わせて計測した心拍数では、エラーが抑制されていることがわかる。

根平均二乗誤差 (RMSE) と相関係数を計算したところ、脈波センサ単独の使用ではそれぞれ 1.1 [bpm] と 0.81 であった。一方、体動センサと脈波センサを組み合わせて計測した際にはそれぞれ 0.6 [bpm] と 0.93 となった。体動センサの導入により心拍計測精度が向上し、ゲームプレイ中でも高い精度で心拍数を計測できたことがわかる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、虚偽心拍の聴覚フィードバックをシンプルなアクションゲームに導入し、ゲーム体験への影響を調べた。実験結果から、虚偽心拍フィードバックを行うことでゲームに対する飽きを抑制でき、没入感を高められることがわかった。さらに、心拍を音と振動によって提示できるゲームコントローラを開発し、ゲームプレイ中でも高い精

度で心拍を計測できることを確認した。

一方、本研究では次第に速くなる虚偽心拍フィードバックしか検討しておらず、効果的な虚偽心拍の提示方法を知るためには、他の条件の虚偽心拍フィードバックも試す必要がある。また、今回の実験では心拍の聴覚フィードバックを用いたが、ゲームコントローラを用いた音響・振動フィードバックの効果も検証する余地がある。今後は更なる実験を行い、プレイヤーの生理的反応の検討や、プレイヤーの生理的・心理的状态によって心拍フィードバックの効果が変化するのかを検討する。

参考文献

- [1] Nogueira, P. A., Torres, V., Rodrigues, R., Oliveira, E. and Nacke, L. E.: Vanishing scares: biofeedback modulation of affective player experiences in a procedural horror game, *Journal on Multimodal User Interfaces*, Vol. 10, No. 1, pp. 31–62 (2016).
- [2] Abe, E., Chigira, H., Fujiwarai, K., Yamakawa, T. and Kano, M.: Heart rate monitoring by a pulse sensor embedded game controller, *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2015 Annual Summit and Conference (APSIPA)*, IEEE, pp. 1266–1269 (2015).
- [3] Valins, S.: Cognitive effects of false heart-rate feedback., *Journal of personality and social psychology*, Vol. 4, No. 4, p. 400 (1966).
- [4] Nishimura, N., Ishi, A., Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Facilitation of affection by tactile feedback of false heratbeat, *CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 2321–2326 (2012).
- [5] Ueoka, R. and Ishigaki, K.: Development of the horror emotion amplification system by means of biofeedback method, *International Conference on Human Interface and the Management of Information*, Springer, pp. 657–665 (2015).
- [6] Yamakawa, T., Fujiwara, K., Miyajima, M., Abe, E., Kano, M. and Ueda, Y.: Real-time heart rate variability monitoring employing a wearable telemeter and a smartphone, *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2014 Annual Summit and Conference (APSIPA)*, IEEE, pp. 1–4 (2014).
- [7] IJsselstein, W., De Kort, Y., Poels, K., Jurgelionis, A. and Bellotti, F.: Characterizing and measuring user experiences in digital games, *International conference on advances in computer entertainment technology*, Vol. 2, p. 27 (2007).