

インタラクション研究用実験装置における 入出力遅延の測定および設計上の注意点

尾形 晃¹ 福地 健太郎^{1,a)}

概要：HCI 研究や知覚心理学の分野では実験装置に PC を用いることが多いが、入出力の速度は実験結果に大きな影響を及ぼす。例えば被験者の反応速度をミリ秒単位で測定するような実験では、装置における遅延の把握とその制御が不可欠である。遅延は入出力デバイスがもたらす遅延および PC 内部での処理時間が原因となる。実験装置の設計にあたってはそれぞれを注意深く選定および設定すべきだが、それぞれがどの程度の遅延を生じさせ、それが実験結果にどれほどの影響を及ぼしうるかについては、広く理解されているとは言い難い。また遅延を精密に測定する手段もこれまで整備されていなかった。本研究では入力から出力までの遅延を精密に測定する装置を開発し、様々な条件下での遅延測定を行った。その結果、入力デバイスの性能差、ディスプレイのリフレッシュレート、アプリケーションが使用する画面モード、入力受付期間の設定などが遅延に大きく影響することを示した。このことから、実験用システムの構築においては機器の選定や設定、アプリケーションの開発において十分な注意を払うことが必要であることが示された。

1. はじめに

コンピュータの入出力環境では、入力から出力までの過程の各段階で遅延が発生する。原則として遅延の少ない方が、入力精度が高くなり、快適に操作できる [6]。遅延の低減のためには、ハードウェア・OS・ユーザーアプリケーションのそれぞれで工夫が必要となる。例えば入出力デバイスにおいては、コントローラ・マウス・キーボードおよびディスプレイのそれぞれにおいてハイエンドゲーム向けに低遅延をうたう様々な製品が販売されている。また高性能なグラフィクスボード (GPU) の使用も遅延低減に貢献する。Human-Computer Interaction (HCI) 分野においても遅延の問題は注目されつつあり、入力デバイスの遅延がもたらす影響や [1][2]、ディスプレイの表示遅延がもたらす影響 [3][5] が議論されている。

HCI 研究では種々の新規提案について、その評価をコンピュータ上で行うのが通例であり、評価項目として入力速度や反応速度、またそれらの精度が指標として用いられることが多い。同様のことが知覚心理学や認知科学の研究においても行われており、そうした実験プログラムの作成を支援するフレームワークも作られている (例えば PsychoPy[9])。

しかしながら、こうした実験システムにおける遅延の影響は、その問題を指摘する調査も報告されているにも関わらず [7][10]、あまり省みられない。実験によっては反応速度における 10 ミリ秒単位の差を対象に検討しているものもあるが (例えば文献 [13] を参照)、後述するように我々の調査によると、遅延時間において 40 ミリ秒程度のランダムな変動は容易に起こりうるものであるため、実験システムの設計についての注意を促す必要があると我々は考えている。

そこで我々はこれまでに、市販品のゲームコントローラおよび液晶ディスプレイを対象に、フォトカプラでコントローラのボタン入力を生成し、それに応じてディスプレイの一部を点灯させ、それをフォトトランジスタを用いて検出することにより入力から出力までの遅延を測定する機器を作成し、様々な条件下での遅延測定を行った [12]。

その結果、コントローラの応答性能は製品によって 30 ミリ秒程度の差が生じること、液晶ディスプレイは高フレームレートのものを用いることで、遅延を最大 20 ミリ秒程度にまで抑えることが可能であること、一方で遅延の変動幅が 40 ミリ秒程度あることがわかった。加えて、ソフトウェアの作り方次第でフレーム単位での遅延が発生することもわかった。

本論文では上記の結果に加え、その後の実験で実験用アプリケーションの画面がウィンドウ表示か、それともフル

¹ 明治大学

^{a)} kentaro@fukuchi.org

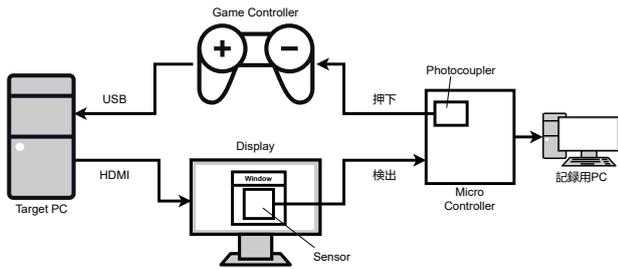


図 1 計測システムの概要図

スクリーン表示かで遅延が変化することが分かったため、あらためて実験システム設計で考慮すべき点を整理して報告する。

2. 関連研究

Neath らは、画面点灯をフォトランジスタで検出し、キーボードのキーをソレノイドにより押下する機器を用いて、画面点灯からキーの押下検出までの時間を計測した [7]。その結果、反応時間の標準偏差は 2.5~10 ミリ秒の間で変動することを報告している。Neath らは、測定したい反応時間の差が少なくとも 20~40 ミリ秒以上であるような実験であれば、汎用 PC による実験でも十分とする一方、実験環境の精度確認を推奨している。

Reimers らは、オンライン実験では環境が統制されていないことに注目し、ブラウザや OS の違いが遅延に与える影響を調査している [10]。同調査では、同一システム内での反応時間の標準偏差はおおむね 10 ミリ秒未満で、結果への影響は小さいとしつつも、システム間での差異については注意を喚起している。

Wimmer らは Raspberry Pi 2 上で動作する Linux の usbid ドライバが押下イベントを検出するまでの時間を計測した結果、その結果、遅延量の平均値は 1 ミリ秒から 17 ミリ秒の範囲に収まることを報告している [11]。

NVIDIA 社は“Latency and Display Analysis Tool (LDAT)”という遅延測定のための測定機器およびソフトウェアを開発しているが [8]、機器の技術的詳細は明らかではなく、またその制御ソフトウェアのソースコードや API は公開されていない。

3. 計測手法

本調査では入力からその結果が出力されるまでの遅延時間を精密に測定することを目的とする。なお、心理実験においては画面に視覚刺激が出力されてから被験者がそれに反応してボタンを押下するまでの時間を反応時間として計測することが一般的であるため、心理実験への影響を検討する上では出力を生成した時点から計測を開始し、それに反応してなされた入力が検知されるまでの経過時間を計測する方がより実態に近い測定ができるが、測定される総遅

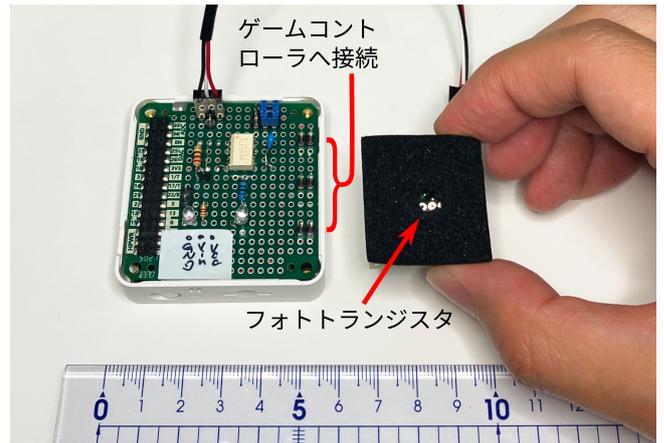


図 2 計測機器の写真。左がマイクロコントローラおよびボタン押下制御用回路で、右が受光部である。マイクロコントローラと受光部は導線で接続されている。

延量は両者の間でほとんど変わらないことが予想されたため、今回は前者の手法で測定を行った。

3.1 計測装置

ボタン押下を入力してから画面出力を検出するまでの経過時間を計測するために、一般には高速度カメラを用いることが多いが、高精度に測定しようとするが高価な機器が必要となり、また計測の自動化・高速化に困難を生じるため、本研究ではマイクロコントローラを利用した計測機器をあらたに開発した。システムの概要図を図 1 に、また開発した計測装置の写真を図 2 に示す。詳細については [12] を参照されたい。

計測対象とした PC は DELL G5 (DG80VR-ANLCB) で、搭載 CPU は Core i7-10700F、搭載 GPU は NVIDIA GeForce RTX 2060 であった。PC とゲームコントローラの接続は PC 本体搭載の USB ポートを用い、PC とディスプレイとの接続にはウルトラハイスピード HDMI (48Gbps) 対応のケーブル (ELECOM DH-HD21ES20BK) を用いた。使用ゲームコントローラは、比較実験の結果、遅延時間が十分に短く改造も容易であった、Brook Gaming Universal Fighting Board (UFB) を採用した。

3.1.1 ボタン押下制御部

一回の計測では、まずマイクロコントローラは計測を開始した後、フォトカプラを通じて、ゲームコントローラのボタンの正極と負極とを短絡し、ボタン押下を電氣的に行う。

ゲームコントローラはボタンが押されたと認識すると、それを USB を通じて接続先の PC に伝達する。今回の調査では、USB のボーリングレートは標準設定から変更していない。

3.1.2 受光部

PC では後述する測定用アプリケーションを動作させる。このアプリケーションは OS からゲームコントローラのボ

表 1 ディスプレイ仕様

ディスプレイ	メーカー	最大リフレッシュレート	画面サイズ	解像度	液晶方式	バックライト	最大輝度 (cd/m ²)
ZOWIE XL2540	BenQ	240Hz	24.5 型	フル HD	TN	LED	320
Alienware AW2720HF	DELL	240Hz	27 型	フル HD	FastIPS	WLED	400
JN-IPS215FHD-C	JAPANNEXT	75Hz	21.5 型	フル HD	IPS	E-LED	250
REGZA 32ZP2	TOSHIBA	60Hz	32 型	フル HD	IPS	LED	不明

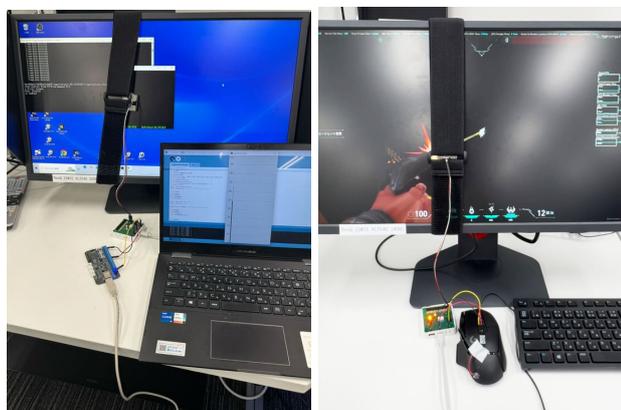


図 3 計測機器を用いた遅延測定。受光部はディスプレイにゴムバンドを用いて密着させている。左: UFB および評価用アプリケーションを使用しての測定。右: マウスおよび市販の FPS ゲーム (Valorant) を使用しての測定では、マズルフラッシュの光をフォトトランジスタで計測している。

タン押下イベントを受け取った後、ウィンドウ内を最大輝度で点灯させる。

PC に接続されたディスプレイには、フォトトランジスタ (日清紡マイクロデバイス NJL7502L) を内蔵した受光部 (図 2 右) をゴムバンドで密着させている (図 3)。フォトトランジスタの周囲は外光を遮蔽するために黒いスポンジで覆っている。

フォトトランジスタからの電圧は 12 ビット (4096 階調) の解像度で計測される。この値が閾値を超えたときに、ディスプレイが点灯したと判断する。今回は暫定的に、最大計測値の 95% を閾値として設定した。

3.1.3 ファームウェア

マイクロコントローラ内のプログラムは上記で述べたように、電氣的にボタン押下を制御してから、受光部がディスプレイの点灯を検出するまでの経過時間を計測する。このボタン押下は、999,907 マイクロ秒間隔で周期的に繰り返す。この秒数は次に述べる理由により、1 秒よりわずかに短く、かつマイクロ秒単位で素数となるように設定した。このように設定すると、計測される遅延時間は図 7 などに見るように、鋸状の形状となる。これは押下イベントを発行する周期とディスプレイの画面更新周期とを一致させていないためである。こうすることで、後述するスパイク遅延のような、突発的に生じる遅延を捕捉することができる。

3.1.4 PC 上で動作する計測用アプリケーション

ゲームコントローラおよびディスプレイが接続された

PC 上では、ボタン押下イベントに反応してウィンドウ内を白く光らせるアプリケーションを走らせておく。このアプリケーションは、画面表示およびゲームコントローラ入力の処理のためのライブラリとして SDL 2.0 を使用した。SDL は主にグラフィクスコントローラへの描画指示を抽象化するライブラリで、Windows 上で動作する際はそのバックエンドとして DirectX を使用し、GPU アクセラレーションが有効となる。

ウィンドウは 400 ピクセル四方であり、ボタン押下が検出されるとその域内が白く光る。ボタン押下イベントの入力受付と描画処理は別スレッドで動作させ、ボタン押下イベントの取り零しや処理遅延のないようにした。

同アプリケーションでは描画指示を発行した後はすぐに垂直同期 (VSync) を待つ。このとき、同期待ちの間にボタンが押下されイベントが伝達された場合、それはすぐに処理されずにイベントキューに蓄えられ、同期待ちが解除された後に処理されるため、最大で 1 フレーム分の遅延を生じることとなる (図 4 下)。ここで、同期待ちが解除されてからしばらくの間、入力を受け付ける待機時間を設けると、次の同期待ちまでの間に入力処理が可能となり、遅延低減の効果がある (図 4 上)。操作の快適性や低遅延への要求が厳しいゲームアプリケーションなどでよく用いられる手法である。本稿ではこれを**入力待機期間**と呼ぶ。本測定用アプリケーションにおいては入力処理および描画処理は簡潔であるため、入力待機期間を長く確保することが可能である。今回の調査では、入力待機期間の長さは 1 フレームの時間間隔から、入力処理および描画処理などの固定処理時間として 1500 マイクロ秒を引いた値を設定した。したがって、例えばリフレッシュレートが 240Hz であれば、入力待機期間は 2667 マイクロ秒となる。

4. ディスプレイ比較実験

次に、ディスプレイの種類による影響を調査した。表 1 に今回の調査で用いたディスプレイの仕様を示す。このうち REGZA は家庭用テレビとして、それ以外はコンピュータ用のディスプレイとして販売されている。

いずれのディスプレイも最大輝度に設定した上で、ブルーライト軽減モードや、残像低減のためにバックライト LED を明滅させる設定 (DyAc) など、表示品質に影響のある付加機能はすべてオフにした。参考までに、DyAc をオ

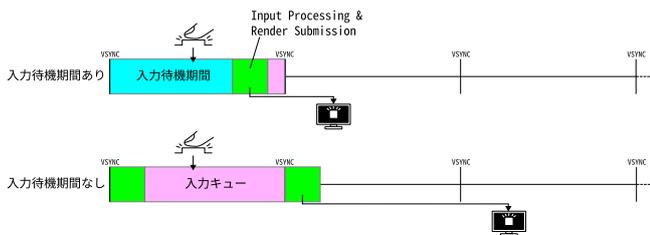


図 4 入力待機期間の説明。入力待機期間の有効期間中にボタン押下イベントが伝達された場合は、次の垂直同期までの間にそれを受け付け、描画指示に反映することが可能となる（上図）。もし入力待機期間が有効化されていないと、その処理は垂直同期後になる（下図）。

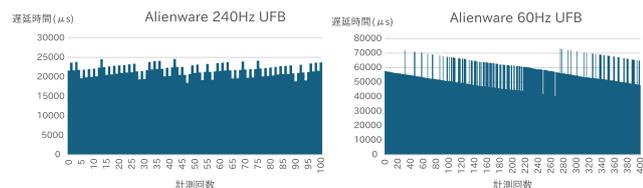


図 5 Alienware AW2720HF における遅延時間の推移。

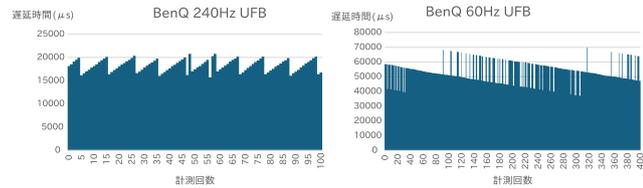


図 6 BenQ ZOWIE XL2540 における遅延時間の推移。

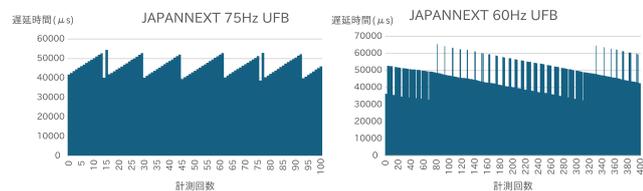


図 7 JAPANNEXT JN-IPS215FHD-C における遅延時間の推移。

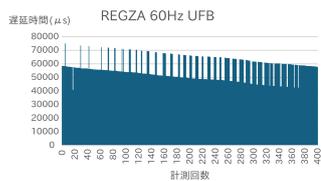


図 8 REGZA 32ZP2 における遅延時間の推移。

ンにすると誤ってディスプレイの消灯をフォトトランジスタが検出する場合があります、また高速度カメラでの撮影に支障があった。

ボタン押下イベントの発生回数は、リフレッシュレートが 60Hz のディスプレイでは 400 回、それ以外のディスプレイでは 100 回計測した。これは、リフレッシュレートの低いディスプレイを用いた場合、押下イベントの発生間隔の関係で鋸状の波形の周期が長くなり、少ない計測回数では 1 周期分のデータを取得できないためである。

計測結果を表 2、および図 8-11 に示す。

表 2 に見るように、リフレッシュレートが高いと当然ながら遅延時間は短くなり、その標準偏差も小さく抑えることができる。また、テレビ用として販売されている REGZA は PC 用のディスプレイと比べると遅延が大きい。

BenQ ZOWIE XL2540 を 240Hz で使用した場合（図 6 左）の波形は規則的だが、同ディスプレイを 60Hz で使用した場合（同図右）、遅延時間がギザギザ状に局所的断続的に発生している。本稿ではこれを「スパイク遅延」と呼んでおり、こうした遅延は条件によって現われ方が大きく異なることが確認されている [12]。

5. 画面モード比較実験

OS によっては、アプリケーションをウィンドウ表示で実行している場合、ウィンドウマネージャが各アプリケーションウィンドウを合成した上でデスクトップに表示するため、この過程で遅延が生じる場合があることが知られている。そこで、アプリケーションの画面モードが遅延に与える影響を調査した。この調査では、市販のゲームアプリケーションでの遅延量もあわせて測定し、我々が開発した評価用アプリケーションの表示速度をそれらと比較した。なお、今回使用したゲームのうち“Valorant”はジョイスティック入力に対応していないため、今回はマウス (Logicool G502X) に同種の改造を施したものを使用した。またディスプレイはいずれも BenQ ZOWIE XL2540 を使用した。

まず、3.1.4 節で説明した、我々が開発した評価用アプリケーションをフルスクリーンモード、および「ボーダーレスモード」と呼ばれる、枠のないウィンドウを表示画面いっぱいに表示することで仮想的にフルスクリーン表示を行うモードをそれぞれ実装した。デスクトップ解像度は 1920×1080 (FullHD) で計測を行ったため、フルスクリーンおよびボーダーレスモードでは、アプリケーションの画面解像度も FullHD だが、光らせる矩形の大きさはウィンドウ表示のものと同じく 400 ピクセル四方であり、表示位置は画面の中心となるようにした。図 9 に計測結果を図示する。60Hz 表示ではフルスクリーンモードが最も遅延が少なく、次いでボーダーレスモード、ウィンドウモードであった一方で、240Hz 表示の場合は順位が逆転し、ウィンドウモードがもっとも遅延が少なく、フルスクリーンモードでは 1 フレーム強ほど遅延が増加した。ディスプレイのリフレッシュレートによって順位が逆転した理由はまだ分かっていない。

図 10 および図 11 は、それぞれ“Apex Legends” (EA) および“Valorant” (Riot Games) を使用して計測した結果を示している。これらのゲームにおいては、ゲーム中のキャラクターが持つ銃が、マウスボタンの押下によって発射された時のマズルフラッシュの光をフォトトランジスタで捉えるように設置して計測を行った。これは NVIDIA

表 2 ディスプレイ別遅延時間比較

ディスプレイ	リフレッシュレート (Hz)	計測回数	遅延時間 (μ秒)			
			最大	最小	平均	標準偏差
Alienware	240	100	24620	18526	21742.79	1423.45
	60	400	73341	38290	54593.16	6623.43
BenQ	240	100	20758	15715	18273.91	1258.97
	60	400	68357	34952	51278.28	6708.13
JAPANNEXT	75	100	54463	38818	46266.87	3873.04
	60	400	65320	33317	48210.75	7175.41
REGZA	60	400	75082	40969	57403.18	6663.55

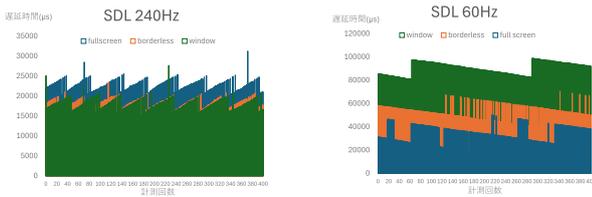


図 9 画面モード比較: 計測用アプリケーション (SDL 2.0) を使用。

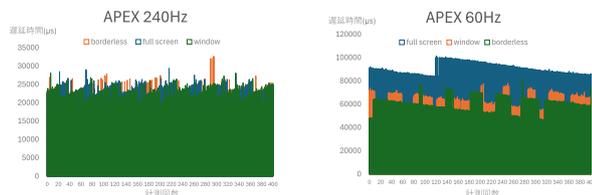


図 10 画面モード比較: 市販ゲーム (Apex Legends) を使用。

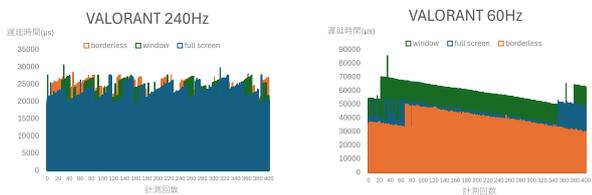


図 11 画面モード比較: 市販ゲーム (Valorant) を使用。

LDAT を用いた計測でも採用されている手法である。

結果を見ると、いずれのゲームも 240Hz 表示時にはモード間での差はわずかである。一方、60Hz 表示においては、Apex Legends では後述する測定用アプリケーションを動作させるボーダーレス表示が最速であり、Valorant ではボーダーレス表示が最速と、ゲームによって異なる傾向が観測された。いずれも理由は不明である。

また、両者と比べて我々の開発した評価用アプリケーションは、240Hz・60Hz のどちらの表示においても、適切な画面モードであれば両ゲームアプリケーションと同等以上の性能を達成していることが分かった。

6. 議論

以上の測定結果から、実験環境の構築にあたって留意すべき点を述べる。

まず単純に、操作の快適性や入力精度の向上を目的とす

る上で、遅延の少ない機器を選択し、遅延の絶対量を減らすことは十分に意味があるといえる。今回調査した範囲ではハイエンド品を選択することで、入力遅延は 30 ミリ秒程度低減でき、出力遅延は 40 ミリ秒程度低減でき、あわせて 70 ミリ秒程度の軽減を見込める。Jota らは、タッチパネル上での direct-touch タスクのパフォーマンスに遅延が与える影響を調査しており、入出力遅延は 20 ミリ秒程度をひとまずの目標とすることを提案している [4]。今回調査の対象としたのはゲームコントローラでの操作であり、タッチ操作とは許容される範囲が異なるが、人間の知覚可能な遅延の下限だと捉えるならば、70 ミリ秒の削減は決して見過ごすべきではない。

遅延の絶対量以上に慎重な検討を要する可能性があるのが、遅延量のゆらぎ (ジッタ) である。遅延時間の推移グラフを見るとわかるように、ボタンを押されたタイミングによって遅延時間は異なる。60Hz 程度のリフレッシュレートではその差は 30 ミリ秒程度に達するため、反応時間における 10 ミリ秒単位の差を議論するような実験においては、得られた結果の有意性に大きな影響を及ぼしうる。加えてゆらぎが操作感に与える影響を考慮するのであれば、このゆらぎの幅を可能な限り小さく抑える工夫が求められる。このゆらぎは、高リフレッシュレートのディスプレイを用いることで小さく抑えることができる。ただし、複雑なグラフィクス表示を要するようなタスクにおいてフレームレートを上げようとする、場面の複雑さに応じてフレームレートが変化してしまう場合があり、ゆらぎをより大きくしてしまいかねないため、慎重な検討を要する。

画面モードも遅延に影響を与えるため、可能であればフルスクリーンモードを検討すべきである。またその表示方法は、ボーダーレスモードではない、真のフルスクリーンモードが望ましい。ただし、使用フレームワークによっては真のフルスクリーンモードに対応していないこともあるため、実際の表示モードについては調査を要することを考慮されたい。

実験用アプリケーションの開発においても、考慮すべき要素は多い。3.1.4 節で述べたように、入力待機期間をアプリケーション側に設けることで遅延を低減できる。ただしアプリケーションにおける画面表示負荷によって最適な入

力待機時間は異なるため、実験者はテストを繰り返して最適化を図る必要があるだろう。

また、今回詳しい調査は行っていないが、ディスプレイの設定も結果に影響を及ぼしうることが指摘しておきたい。すでに述べたように、モーションブラーの低減やブルーライトカット、あるいは「ゲームモード」「フリッカーフリーモード」「低消費電力 (ECO) モード」など、市販品のディスプレイには様々な設定が行えるものがあり、これらの設定が実験結果にどのような影響を及ぼしうかはまだよく分かっていない。

遅延の絶対量およびゆらぎを極限まで低減させる必要がある場合は、現在広く使われている、複雑な構成の PC や OS をあえて使用しないことも考慮すべきである。もし刺激として与えるのが単純な光点だけで済むのであれば、液晶ディスプレイではなく LED を点灯させる方が、OS やドライバの影響を低減できる。加えて入力装置も簡潔なボタン入力であれば、Arduino や M5Stack に代表されるようなマイクロコントローラを用いた方が、遅延のゆらぎを引き起こす要因を少なくできる。

7. まとめと今後の課題

本研究では市販品のゲームコントローラおよび液晶ディスプレイを対象に、様々な条件下で入出力遅延の量を測定した。その結果、使用する入出力機器、およびプログラム上の工夫が遅延時間に影響を及ぼすこと、また遅延量のゆらぎが生じていることを明らかにした。これらは、高い精度での反応速度の測定を必要とする実験を行う上では無視できない要因であり、慎重な運用が求められることを本稿で指摘した。

今回の調査では現行品を対象に調査したが、90年代以前に心理実験で用いられたタキトスコープなど今では使われなくなった実験用品において、どのような遅延が発生したかをあらためて検証しておくのは興味深い。Reimers らが指摘しているように [10]、新しい機材の方が構成が複雑で、かえって予測困難な悪影響を与えうるという点には今後も注意を要する。

参考文献

- [1] Claypool, M.: Game Input with Delay – Moving Target Selection with a Game Controller Thumbstick, *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol. 14, No. 3s, pp. 1–22, DOI: 10.1145/3187288 (2018).
- [2] Claypool, M., Cockburn, A. and Gutwin, C.: Game input with delay: moving target selection parameters, *Proceedings of the 10th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys '19*, ACM, pp. 25–35, DOI: 10.1145/3304109.3306232 (2019).
- [3] Crane, D. F.: Flight simulator visual-display delay compensation, *Proceedings of the 13th Conference on Winter Simulation - Volume 1*, WSC '81, IEEE Press, pp.

- 59–67 (1981).
- [4] Jota, R., Ng, A., Dietz, P. and Wigdor, D.: How fast is fast enough? a study of the effects of latency in direct-touch pointing tasks, *Proceedings of CHI '13*, CHI '13, Association for Computing Machinery, p. 2291–2300, DOI: 10.1145/2470654.2481317 (2013).
- [5] Li, M., Arning, a., Vervier, L., Ziefle, M. and Kobbelt, L.: Influence of temporal delay and display update rate in an augmented reality application scenario, *Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '15*, ACM, pp. 278–286, DOI: 10.1145/2836041.2836070 (2015).
- [6] MacKenzie, I. S. and Ware, C.: Lag as a determinant of human performance in interactive systems, *Proceedings of CHI '93*, CHI '93, ACM Press, pp. 488–493, DOI: 10.1145/169059.169431 (1993).
- [7] Neath, I., Earle, A., Hallett, D. and Surprenant, A. M.: Response time accuracy in Apple Macintosh computers, *Behavior Research Methods*, Vol. 43, pp. 353–362 (2011).
- [8] NVIDIA: NVIDIA Latency and Display Analysis Tool (online), available from (<https://developer.nvidia.com/nvidia-latency-display-analysis-tool>) (accessed 2024.6.26).
- [9] Peirce, J., Hirst, R. and MacAskill, M.: *Building Experiments in PsychoPy*, SAGE Publications Ltd (2022).
- [10] Reimers, S. and Stewart, N.: Presentation and response timing accuracy in Adobe Flash and HTML5/JavaScript Web experiments, *Behavior Research Methods*, Vol. 47, pp. 309–327 (2015).
- [11] Wimmer, R., Schmid, A. and Bockes, F.: On the Latency of USB-Connected Input Devices, *Proceedings of CHI '19*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–12, DOI: 10.1145/3290605.3300650 (2019).
- [12] 尾形 晃, 福地健太郎: 液晶ディスプレイの出力遅延の精密な測定装置の開発および実験装置設計上の注意点について, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2024-HCI-209, No. 21, pp. 1–8 (2024).
- [13] 綾部早穂, 井関龍太, 熊田孝恒 (編): 心理学, 認知・行動科学のための反応時間ハンドブック, 勁草書房 (2019).