子ども被験者の負荷低減を目指した眼球運動測定システムの設計改良について

宮川 幹平[*1] 北濱 幹士[*2] 知念 嘉史[*3]

[*1] 東海大学 理系教育センター
[*2] 東海大学 スポーツプロモーションセンター
[*3] 東海大学 体育学部 生涯スポーツ学科

概　要

筆者らは，子どものアクティブな活動（遊び・スポーツ・運動など）における，眼球運動と身体の動きの協応動作に着目し，スポーツ指導やその他教育指導上の知見を得るべく，その研究を進めている。ここで，子ども（特に就学前幼児）に対して，物理的移動を伴いつつ，眼球運動測定（アイトラッキング）装置による測定を行う場合，測定装置設定の手間，測定装置自体の重量や発熱，利用中のズレや破損，普段と異なる測定環境などが，被験者のストレスとして影響する可能性は成年に比して大きいと考えられ，適切な測定結果を得るためには軽視できない要因となる。本稿は，子ども被験者の負荷低減を第一の目標として実施した，測定装置の改良について報告するものである。その成果として，ボードコンピュータをベースとした軽量かつ汎用的な PC システムを測定装置に組み込み，そのプロトタイプの予備実験を通して，アクティブな活動のなかにあっても，基本的な眼球運動測定が可能であることを確認した。

＊1 東海大学 理系教育センター
＊2 東海大学 スポーツプロモーションセンター
＊3 東海大学 体育学部 生涯スポーツ学科

1．はじめに

近年，子どもの体力・運動能力について，その傾向に変化が生じている。スポーツ庁による「令和 4 年度全国体力・運動能力，運動習慣等調査」（スポーツ庁,2022）によれば，小学 5 年生児童の体力合計点は，2018 年度前後までの横ばい微増傾向から転じ，2022 年度まで連続して低下が見られた。その原因として同庁では，コロナ禍の影響を指摘しつつ，総運動時間が以前の水準まで回復していないこと，肥満児童の増加，朝食欠食・睡眠不足・スクリーンタイム[1]増加などの生活習慣の変化を挙げている。これら子どもの体力・運動能力は，その後の健康な発達成長，免疫力の維持だけでなく，認知能力の向上にも関連するとも指摘されており，この低下傾向は教育上の観点からも無視できない。

一方，運動能力と密接な関係にあると考えられているのは視覚機能である。スキャモンによる発達・発育曲線が示すように，視神経を含む神経系の発達は誕生時から急速に進んで 4〜5 歳には成人の約 80%に達し，それを追うように一般系（全身の筋力・呼吸器など）が向上するといわれている（藤井,2013）。また，視覚機能は，対象物をどれだけ詳細に見分けることができるかを意味する「視力」，対象物をはっきりと映し出すように眼球運動（前庭動眼反射・跳躍性眼球運動・追従性眼球運動など）を行う「両眼運動機能」，そして対象物が何か，どのような動きをしているのかを把握し，手足と協応（かみ合って動作）させる「視覚情報処理機能」の３つに分類でき（本田・北出,2003），子どもは日常的な遊びや運動・スポーツを通して，眼球運動と身体の動きの協応を学習していく。即ち，子どもの視覚，特に眼球運動の傾向と体力・運動能力，生活習慣との関わりを分析することは，運動能力・身体能力が著しく発達するゴールデンエイジ（9 歳〜12 歳ごろ）を迎える子どもへのスポーツ指導・教育指導上の知見を得る上でも有効と言えよう。

なお，子どもの眼球運動について調べた研究は少なくない。しかし，その先行研究の多くは，被験者もしくは「見る」対象物が固定された測定の事例であり，眼球運動測定に関するランドの総説（Land,2006）にあるように，子どもの身体活動中における眼球運動に関する研究はほとんど見られない。

このような状況にあって,筆者を含む北濱らの研究グループは,竹井機器工業(株)開発の TalkEye Lite[2]をもとに，遊びや運動・スポーツ中の子どもの眼球運動測定を行う研究に取り組んでいる（北濱・知念・宮川・石橋・山田,2022）。現行の TalkEye Lite は，眼球運動の測定自体を担うカメラ・センサー部（ヘッドユニット）と，測定のソフトウェア処理と結果の記録を担う処理ユニットからなり，被験者はヘッドユニットを頭部に装着，処理ユニットをバックパックに背負って測定に臨むことに

[1] テレビ，スマートフォン，ゲーム機等による映像の視聴時間を意味する
[2] TalkEye Lite Wireless；https://www.takei-si.co.jp/

なる。つまり，ヘッドユニットと処理ユニットのみで測定が可能であることから，被験者の行動に制約がない点に大きな特徴がある。北濱ら（2022）は，ヘッドユニットについて従来型のゴーグルタイプを改め，新たに眼球運動測定ヘッドバンドを作成し，調整機構によって成長度合い（サイズ）の異なる子どもにも幅広く装着できるようにしただけでなく，ヘッドバンドと顎紐による固定により，遊びや運動・スポーツ中にあっても上下左右のズレを最小限にしつつ，子ども被験者の重量付加を頭部全体に分散するようするよう工夫を行った（図 1）。また，移動系動作（歩く・走る・跳ねる），器具を使用した遊び（キックスケート），用具を操作する動作（持つ・掴む・当てる・取る・渡す・投げる），視線と身体の協応動作（真似をして踊る）のそれぞれについて，上記機器を実際に用い，子ども 3 名（幼稚園年少・年中・年長）に対する眼球運動測定を行うことによって，視野映像内の何処を子どもが注視しているか（映像内での注視点プロット，図 2），及び，サンプリング間隔（30Hz）毎の角度・注視時間・角速度等の情報（データテーブル・CSV 形式）を得ている。さらにその分析結果として，成年被験者と比較して子どもの被験者は跳躍性眼球運動[1]の速度が大きくなる傾向が示された。この結果は，幼児は頭部運動よりも眼球運動を優先するという研究知見（山田,1993）にも合致し，現行機器は注視点情報の測定精度について研究分析に耐えうるデータが得られることを確認できている。



図 1 改良ヘッドユニット

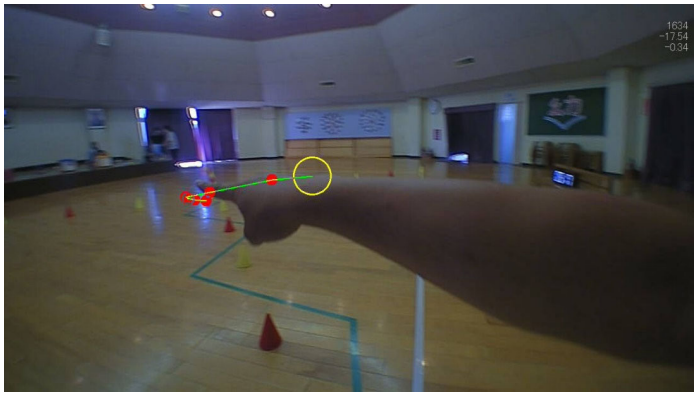

図 2 視野映像に合成された注視点情報

またその一方，上記研究を通じて，子どもを対象とした遊びや運動・スポーツ中の眼球運動測定をさらに進めるためには，現行機器の処理ユニットのハードウェア・ソフトウェアについて，以下に示すような要件・課題が明らかとなった：

・可搬性：普段通りの「遊びや運動・スポーツ」をストレスなく行えるように，子どもの身長・体重を踏まえて，できるだけ小型・軽量であることが望ましい。

・排熱性：上記同様。特に，夏場や屋外において 30 分以上の連続測定を行っても，被験者がバックパックの発熱を感じないようにあることが望ましい。

[1] サッカードもしくはサッケード。対象を網膜の中心に捉えるために生じる，短時間（20ms～200ms 程度）かつ高速（ピーク時数百度／秒）な眼球運動のこと。

・耐振動性：子どもが普段通りの「遊びや運動・スポーツ」を行うことを想定する以上，転ぶことやぶつけることにも一定の耐性が必要である。特に，ディスプレイ部やコネクタ部の破損対策が必要である。
・拡張性：測定タスクに応じて，音声・頭部の向きなどのセンサーデータの追加取得が可能であること。その他，アプリケーションの追加が容易，もしくはプログラマブルであることが必要である。
・リモート接続:子どもが不安なく･飽きることなく測定に臨むことができるよう，バックパックから処理ユニットをいちいち出し入れすることなく，指示者が一連の測定及び調整処理を行えること，また，保護者や教師（指導者）が子どもの状況を簡便に閲覧できることが必要である。

本稿は，この北濱ら（2022）の研究の系譜にあって，子どもの負担軽減を念頭に，上に述べた課題を解決すべく実施した，測定機器，特に処理ユニットの改良について報告するものである。本研究は，筆者らの研究遂行に向けて必要不可欠な過程であるだけでなく，多くの読者にとり，遊びや運動・スポーツ中の子どもの眼球運動測定を行うにはどのような環境が必要であるのかを検討する際の一助になるものと期待される。次節以降，遊びや運動・スポーツ中の子どもの眼球運動測定に適した測定機器・測定環境に関する検討を示したうえで，新たに設計しなおした処理ユニットとそのプロトタイプの特徴，予備実験の内容と結果，最後に今後の研究方向について述べる。

２．要件に適した測定機器に関する比較検討

筆者らが一連の研究で明らかにしようと試みているのは，子どもが普段の「遊びや運動・スポーツ」を行う中で，子どもはどこに注視しているのか，またその眼球運動の特徴はどのようなものか，という点にある。この目的に資するには，まず，普段通りの「遊びや運動・スポーツ」を行えるような測定機器・測定環境であることが望ましい。その観点から考えると，子ども被験者には一切の測定装置の装着を必要としないことが理想になろう。その候補としては，a)スクリーンベースの測定機器[1]，b)データ駆動アプローチ[2]の二種類が考えられる。a)スクリーンベースの測定機器は，入手性が容易で高い測定精度を持つものの，センサーの特性上，高々1m 程度の測定可能距離であり，被験者の動ける範囲が制約されてしまう。また b)データ駆動アプローチは近年の研究発展著しく，高解像度のカメラだけで複数人の同時解析も可能であるなど，将来的な期待値は大きいものの，被験者がどこを向くかわか

[1] Tobii Pro Fusion（https://www.tobii.com/ja/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-fusion）のように，被験者の前に赤外線等のセンサーカメラを設置して視線を測定するもの
[2] 顔の画像と視線情報からなるデータセットをもとに学習した機械学習モデルを用いて，カメラから取得した画像情報より視線を推定するもの。詳しくはアキニエルらの総説参照（Akinyelu&Blignaut,2020）。

らない前提においては測定環境全方位にカメラを用意しなければならず，技術およびコスト面でのハードルは高い。さらに，当該測定環境を設置・撤去するには相応の時間を要し，測定会場の幼稚園・学校等から協力を得ることは難しいと懸念する。

以上から，現時点の筆者らの研究においては，子ども被験者に測定装置を装着するタイプを改良していくことが現実的との判断に至った。なお，このタイプについても，現行の TalkEye Lite に限らず，様々な製品が商品化されており，その性能も様々であるが，猿楽・北濱・山田（2021）の比較にあるように，本研究が求める測定精度（遊びや運動・スポーツ中の注視点測定）での差は認められない[1]。また，Tobii Pro Glass 3[2]は，組み込みの超小型の処理ユニット（130x85x27mm，312g）を用いる有力な製品であるが，動き回るような動作にヘッドユニット（眼鏡タイプ）が適していないこと，処理ユニットの拡張性に制約があることが懸念点となった。そのほか，USB デバイスサーバを用いて，ヘッドユニットと処理ユニットを繋ぐ有線 USB ケーブル自体を無線化するアプローチを検討したが，無線途絶によって測定そのものが中断するリスクがあることから，処理ユニットを被験者から分離するメリットよりもデメリットが大きいと判断した。

これらの検討結果を総合的に勘案し，筆者らは，現行の TalkEye Lite の処理ユニットとして，一般のノート PC を用いていた点を改め，マージシステム株式会社[3]の

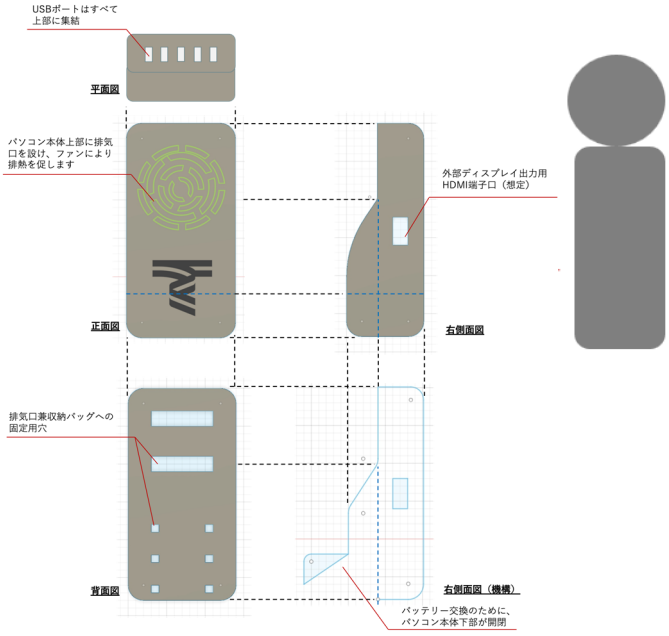

図 3 処理ユニットの設計案

※設計案はマージシステム株式会社提供

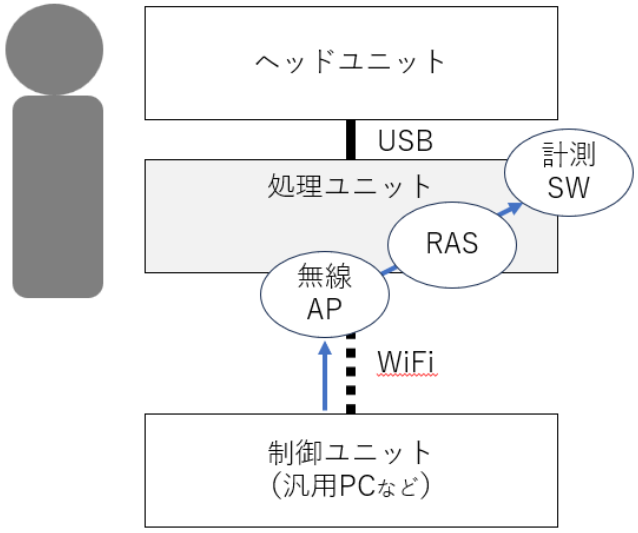

図 4 システムの構成図

[1] 注視点を変更する跳躍性眼球運動は１秒間に３～４回であり，注視点とその座標を得るには数十 Hz のサンプリング周波数があれば十分である。なお，脳神経科学等において眼球の詳細な挙動を測定する際には，より高いサンプリング周波数が必要となる。例えば以下を参照されたい：
https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/61/12/61_12_1774/_article/-char/ja/

[2] https://www.tobii.com/ja/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3

[3] https://www.merges.co.jp/

協力を得て，ボード型コンピュータをベースに，要件に示した可搬性・排熱性・耐振動性・拡張性を持つようにハードウェアを設計しなおすこととした（図 3）。また，拡張性・リモート接続性の要件から，処理ユニット上にソフトウェア的な無線 LAN アクセスポイント（AP）とリモートアクセスサーバ（RAS）を用意し，無線ネットワークを介して制御ユニット（別途用意する汎用 PC）から遠隔操作するアプローチを採用した（図 4）。制御ユニットは処理ユニットを文字通り遠隔操作しているだけであり，測定中に無線が途絶しても，処理（特に記録の保持）に全く影響がない。なお，猿樂ら（2021）は現行の処理ユニットに HDMI 無線トランスミッタと Bluetooth を用いることによって映像・操作のリモート接続を実現したが，本研究では，処理ユニットそのものの改良を施したこと，汎用的なリモートアクセスサーバを用いることで制御ユニットの自由度を高めている点にその大きな違いがある。即ち，制御ユニットはリモートアクセス可能（無線 LAN 接続可能）であればその性能は問わない。例えば，制御ユニットとしてタブレット型端末を用い，指導者が端末からリアルタイムに子どもの視野情報及び注視点情報を得つつ，指導者が動き回りながら適応的に子どもへの声掛けを行うことも容易に実現可能である。このことは，一連の研究において，眼球運動との関連を調べる遊びや運動・スポーツのバリエーションを今後増やしていく上でも有効と考えた。

3．処理ユニットのプロトタイプ

本節では，前節で検討した改良方針のもと実際に開発した処理ユニットのプロトタイプ（図 5）について述べる。プロトタイプはボード型コンピュータ（Latte Panda3

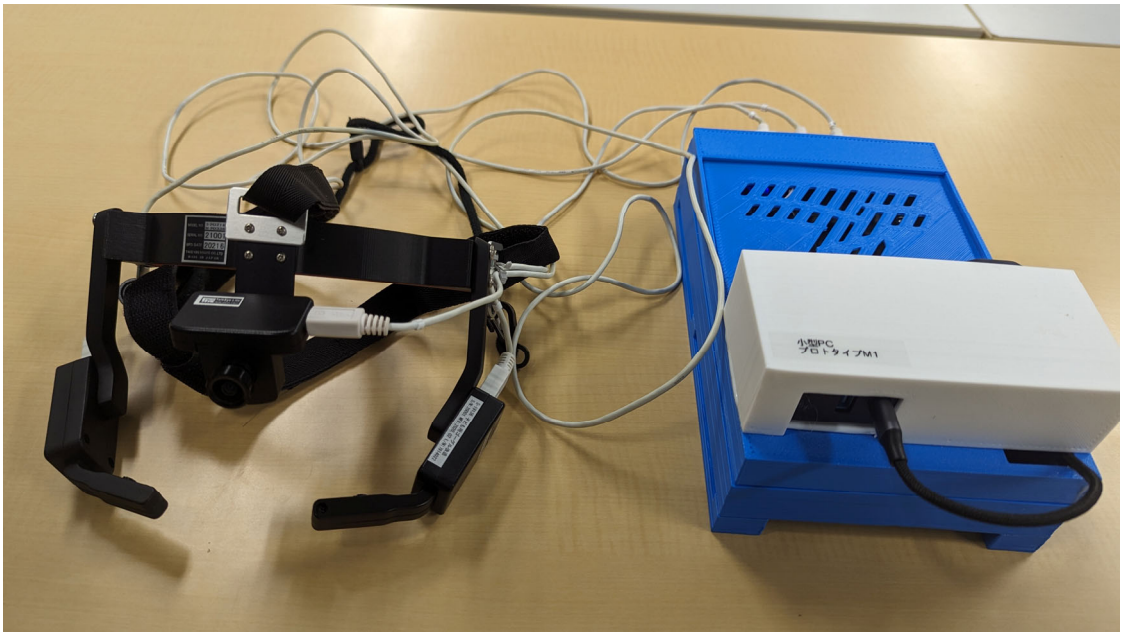

図 5 プロトタイプの概観

表 1 プロトタイプの主な仕様

OS	Windows 10 IoT Enterprise LTSC
CPU	Intel Celeron N5105
Memory	8GB
Graphics	Intel UHD Graphics
Storage	M.2 SSD 1TB
Network	Wi-Fi6, Bluetooth 5.2, Gigabit Ethernet
Interface	USB×6
Battery	Anker 733 Power Bank (10,000mAh, 65W, USB PD)
Size	縦 20cm×幅 12cm×高さ 8.8cm（最大）
Weight	本体 528.0g，バッテリー 314.5g

Delta[1]）をベースとしており，表 1 に示す通り，TalkEye Lite の測定ソフトウェアやリモートアクセスサーバ等の稼働に充分な機能・性能を持っている。OS は一般的な Windows であり，空き USB 端子も十分にあることから，必要に応じて汎用のセンサーやその測定アプリケーション等を追加で用意にセットアップもしくは独自にプログラミングできる拡張性を持つ。また，(1)機械的に破損しやすい液晶ディスプレイ自体を廃したこと，(2)ヘッドユニットと接続するための USB 端子（x3）を運動中の接触が最も少ない処理ユニット上部に集中配置したこと，(3) 3D プリンタによって形成したプラスチックカバーによって処理ユニットへの衝撃を緩和したこと，の 3 点により，耐振動性を確保した。また上述の(3)は，処理ユニットによる熱が子ども被験者に伝わりにくくする効果も狙っている。重量はバッテリーを含めて 1kg を切っており，一般的なモバイルノート PC と比較すれば軽量部類に入るが，液晶ディスプレイを有しないことも含めて最軽量とはいえず，子ども被験者の装着負荷軽減のために更なる軽量化を図る必要があるかどうかは，性能バランスと合わせ，今後の実験を通じて検討が必要と考える。

4．予備実験

本節では，開発したプロトタイプの動作を確認するために実施した予備実験について述べる。予備実験は，筆者を被験者として，測定ソフトウェアの起動・較正ののち，ポールを立てた会場にて予め定めた注視行動（約 10 分）を行いながら眼球運動を測定・記録するものである。結果，予備実験において，本プロトタイプにおける測定ソフトウェアの動作に支障は生じなかった。また測定ソフトウェアの出力結

[1] https://www.lattepanda.com/lattepanda-3-delta

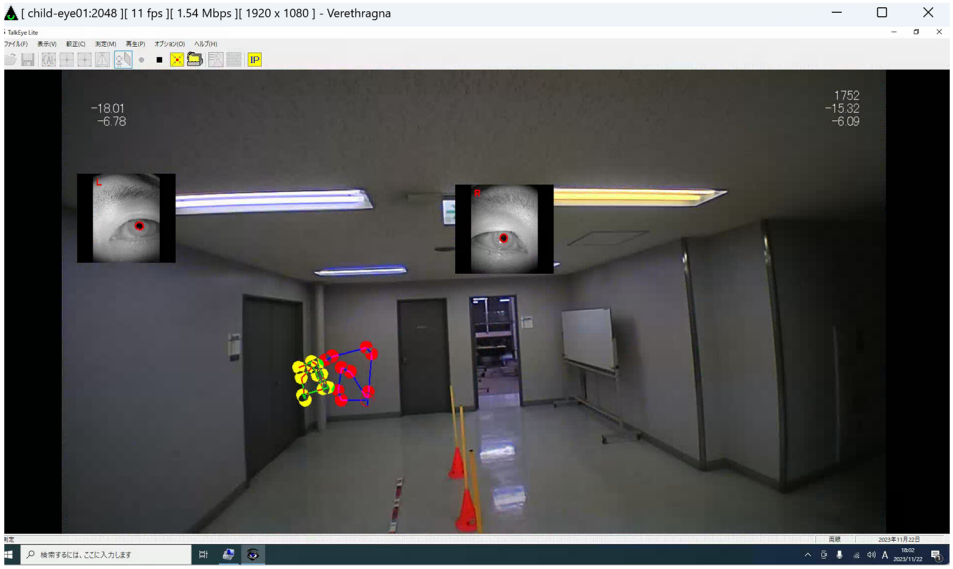

図 6 予備実験中の画面（制御ユニットでの表示）

果としても，両眼の測定データ，及び，注視点を視野映像にプロットした動画から，注視点の位置や軌跡を明確に読み取ることができた（図 6）。なお，図 7（CPU 利用率・橙色破線）で示す通り，制御ユニットからのリモート接続及び較正処理をしている間までは CPU 負荷も少なかったが，測定開始後はほぼ 100 %に張り付いた状態となった。しかし，制御ユニットとのリモート接続は維持できており，実験中の被験者視野カメラ及び測定ソフトウェアの状況を確認することは可能であった。また，プロトタイプの処理ユニット表面のうち，最も高温となる排気口付近にサーマルセンサーを設置して測定した結果（図 7：表面温度・青色実線）では，表面温度は 39

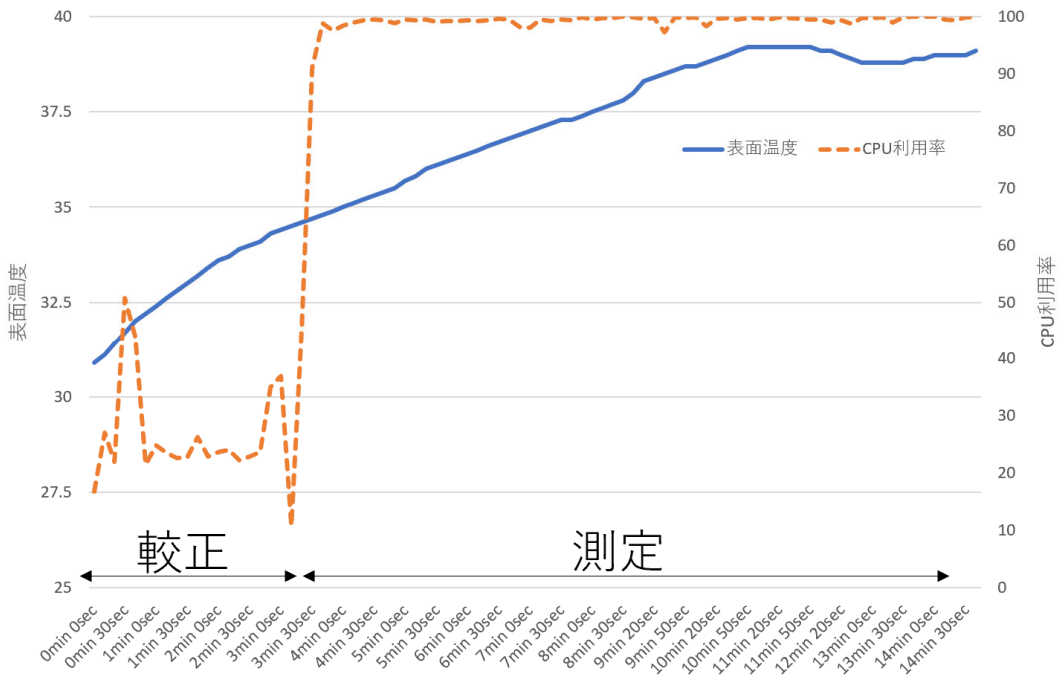

図 7 予備実験中の処理ユニット CPU 利用率・表面温度推移

度程度で頭打ちとなっており，長時間の測定にも耐えうる設計になっていることを確認できた。ちなみに，処理ユニットとしてノート PC（Panasonic CF-RZ6）を用いて同一の実験工程（起動・較正・測定・記録）を実施したところ，測定時も発熱は 35 度程度で収まっているところから，小型化によって排熱のハードルが上がっていることが示唆される。特に夏場での実用に耐えるかどうかは追加検証が必要であろう。

５．終わりに

本稿では，遊びや運動・スポーツといった子どものアクティブな活動中における眼球運動測定を行うための測定環境として，処理ユニットのハードウェア改良及びソフトウェア構成の工夫について述べた。本改良により，より子どもの負担・不安を減じた状態で実施できるようになるものと期待される。しかし，その実際の効果については未検証であり，今後，実際に子どもを対象とした眼球運動測定を行いながら，子どもに対する質的アンケートの実施を含め，効果検証を行う必要があるだろう。特に，耐振動性について十分な予備実験ができていない点は留意する必要がある。これらの内容を踏まえながら，現在のプロトタイプから更なる改良を進め，子どもの負担軽減に資する測定環境の開発に取り組んでいく所存である。特に，ボード型コンピュータのプラスチック外形，処理ユニットを格納するバックパックの設計は，子どもの体感荷重に大きく影響するため，慎重に設計・開発を進めていきたい。またあわせて，処理ユニットの汎用性を活かし，北濱ら（2022）が課題と指摘した，頭部の向きや角度を測定できるようにすることを検討している。

本研究は，東海大学「人を対象とする研究」の倫理審査を受け，その承認を受けて実施したものである（承認番号 21028）。

謝辞

本研究を進めるにあたり，処理ユニットの改良に向けた TalkEye Lite に関する基礎資料を提供いただいた竹井機器工業株式会社の皆様，処理ユニットの設計・開発にご協力いただいたマージシステム株式会社の皆様に深く感謝する次第である。なお，本研究は，科学研究費の助成を受けて実施したものである（研究課題／領域番号：23K02264「幼児の視と体の運動機能における協応動作の発達を促す遊びや運動・スポーツの研究」）。

参考文献

A. A. Akinyelu and P. Blignaut (2020), Convolutional Neural Network-Based Methods for Eye Gaze Estimation: A Survey, IEEE Access, vol. 8, pp.142581-142605. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3013540.
https://ieeexplore.ieee.org/document/9153754

藤井 勝紀 (2013), 発育発達と Scammon の発育曲線, スポーツ健康科学研究, 35 巻, pp.1-16, DOI: 10.50909/tspe.35.0_1.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tspe/35/0/35_1/_article/-char/ja

本多 和子・北出 勝也 (2003), 「見る」ことは「理解する」こと 子どもの視覚機能の発達とトレーニング, 山洋社

北濱 幹士・知念 嘉史・宮川 幹平・石橋 宏之・山田 光穂 (2022), 視線と体の協調について効果的な発達を促す指導法の提案へ向けた幼児の眼球運動測定, 東海大学体育学部紀要, Vol. 52, No.1, pp.11-19
https://www.u-tokai.ac.jp/uploads/sites/18/2023/04/18e8a5ebe3f7db96ad1216c7b546e0fd.pdf

Land MF (2006), Eye movements and the control of actions in everyday life, Prog Retin Eye Res. 2006 May; 25(3): pp.296-324. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2006.01.002.
https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16516530/

猿樂 拓也・北濱 幹士・山田 光穂 (2021), 眼球運動測定装置を用いたスポーツ選手のスキル分析, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol. 23, No. 1, pp.29-42 ; DOI: 10.11184/his.23.1_29.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/his/23/1/23_29/_article/-char/ja/

スポーツ庁 (2022), 令和 4 年度全国体力・運動能力, 運動習慣等調査結果,
https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/kodomo/zencyo/1411922_00004.html

山田 光穂 (1993), 頭部・眼球協調運動の年齢による変化の分析, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース研究論文集（Progress in Human Interface）, Vol. 2, pp.27-34. https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=200902035261069750

（2024 年 1 月 15 日 受理）