

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Kognitív képességek vizsgálata szemmozgás paraméterek kiértékelésével

Készítette: **Vámos Balázs**
másodéves mérnökinformatikus hallgató

Témavezetők: **Dr. Katona József, PhD**
egyetemi docens, tanszékvezető

Prof. Dr. Kővári Attila, PhD
egyetemi tanár



Dunaújváros, 2023

Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék	iv
Táblázatjegyzék.....	v
1. Bevezetés	6
1.1. Kutatás feltételei.....	6
1.2. Kutatás célkitűzései	7
1.3. Kutatás módszerei	7
1.4. A dolgozat felépítése	7
2. Az emberi szem felépítése	9
2.1. A szem anatómiájának rövid áttekintése	9
2.2. Az emberi szem képképzésének folyamata	10
2.3. Szemmozgás követéssel kapcsolatos alapfogalmak.....	10
2.4. A koncentráció és az éberség kapcsolata a szemmozgás paraméterekkel.....	11
3. Szemmozgáskövetést megvalósító technikák alkalmazása	12
3.1. Pupilla központú szaruhártya tükröződés (PCCR) elve	12
3.2. Pupilla megvilágítási technikák részletezése.....	13
3.2.1. Világospupilla-módszer.....	13
3.2.2. Sötétpupilla-módszer	14
3.3. PCCR elvet alkalmazó szemmozgáskövető eszközök csoportosítása.....	14
3.3.1. Képernyő alapú szemmozgáskövetők	14
3.3.2. Fejre csatolható szemmozgáskövetők	16
3.3.3. Szemmozgáskövető eszközök összehasonlítása.....	16
3.3.4. Szemmozgáskövető rendszerek alkalmazási lehetőségeinek elemzése.....	17
4. Szemmozgáskövetést megvalósító szoftver implementálása	19
4.1. Követelményspecifikáció	20
4.2. Fejlesztői környezet kiválasztása	21
4.3. A szemmozgáskövető szoftver nagyvonalú logikai terve	21
4.4. A megvalósítandó szoftver statikus modelljének megalkotása	22
4.5. A megvalósítandó szoftver dinamikus modelljének megalkotása.....	23

4.6.	Implementáció	25
4.6.1.	Kapcsolatteremtés az EyeTribe eszközzel.....	25
4.6.2.	Kalibráció elvégzése.....	25
4.6.3.	Az adatok fogadása az EyeTribe szervertől	26
4.6.4.	A gyűjtött adatok tárolása és feldolgozása	27
4.7.	A saját készítésű szemmozgáskövető modul illesztése az OGAMA adatelemző alkalmazáshoz.....	28
4.7.1.	Az OGAMA alkalmazás nagyvonalú körbejárása.....	28
4.7.2.	A továbbfejlesztett OGAMA alkalmazás kitűzött céljainak összefoglalása 30	
4.7.3.	A hozzáadott és frissített modulok ismertetése	30
4.8.	Tesztelés, validáció.....	39
4.9.	A továbbfejlesztett alkalmazás jövőbeli életciklusa, frissítése.....	39
5.	A kognitív éberségi, figyelem tesztek lefolytatása és az eredmények kiértékelése, valamint a következtetések levonása.....	41
5.1.	A kognitív vizsgálatok lefolyásának körülményei	41
5.1.1.	Vizsgálati személyek	41
5.1.2.	Vizsgálati tesztek.....	41
5.1.3.	Vizsgálat eljárása és környezet.....	42
5.2.	Teljes mintán végzett kísérlet eredményeinek kiértékelése	43
5.2.1.	PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs számával	44
5.2.2.	PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs időtartammal 45	
5.2.3.	PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos pupilla átmérővel.....	46
5.2.4.	PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs számmal	46
5.2.5.	PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs időtartammal 47	
5.2.6.	PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos pupilla átmérővel	48
5.3.	Következtetések	49
6.	A kutatás korlátai	50

7.	Összefoglalás	51
8.	Irodalomjegyzék	53
9.	Mellékletek	57

Ábrajegyzék

1. ábra: A szem felépítése	10
2. ábra: A PCCR módszer működési elve.....	12
3. ábra: A csillogás-pupilla vektor meghatározása	13
4. ábra: Az Eye Tribe szemmozgáskövető eszköze	16
5. ábra: Az OGAMA adatrögzítő felülete.....	19
6. ábra: A szemmozgás követő alkalmazás nagyvonalú folyamatábrája.....	22
7. ábra: A szemmozgás paramétereket analizáló objektumok leírása, osztálydiagramja	23
8. ábra: Szekvenciadiagram a szemmozgás követő eszköz adatainak kiolvasásáról.....	24
9. ábra: Egy saját készítésű szemmozgáskövető alkalmazás, amely adatmentést tesz lehetővé	28
10. ábra: Projektkészítő ablak felülete	32
11. ábra: Szoftver állapota a kalibrálás elvégzése után.....	35
12. ábra: Az élő adat részletező modul grafikus felülete	36
13. ábra: Fixációs számolást nagyvonalúan leíró folyamatábra.....	37
14. ábra: Az élő statisztika modul felépítésének statikus modellje, osztálydiagramja.....	38
15. ábra: Sightcan, saját fejlesztésű, tervezési fázis alatt álló alkalmazás előnézete	40
16. ábra: Pillanatfelvétel a Változás-észlelés (PEBL Change Detection) (a), valamint a Mackworth óra (PEBL Clock Test) (b) tesztekéről.	42
17. ábra: Véletlenszerűen kiválasztott tesztalanyok szemmozgás paramétereinek megfigyelése, rögzítése és kiértékelése a PEBL féle tesztek végzése során	43
18. ábra: PCT teszt adatainak hisztogramja és Q-Q plot diagramjai	44
19. ábra: PCD teszt adatainak hisztogramja és QQ-plot diagramjai.....	44
20. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs szám viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,001$).....	45
21. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,013$).....	45
22. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,011$).....	46
23. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs szám viszonyának vizuális leképezésére ($p<0,001$)	47
24. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,016$).....	47
25. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyának vizuális leképezésére ($p<0,001$).....	48

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A szemmozgás követéssel kapcsolatos elengedhetetlen alapfogalmak.....	11
2. táblázat: Szemmozgáskövető eszközök specifikációinak részletezése.	17
3. táblázat: Az Eye Tribe eszköz kommunikációteremtéséhez szükséges függvények.	25
4. táblázat: A kalibrációs pontosság értékelése.	26
5. táblázat: GazeData osztály szolgáltatásai.....	27
6. táblázat: Az Eye osztály adattagjainak részletezése.....	27
7. táblázat: OGAMA modulválasztó felület elemeinek részletezése	29
8. táblázat: A projektkészítő modul összetételeinek részletezése	31
9. táblázat: A projektfájl XML attribútumainak részletezése.....	33
10. táblázat: A RawData tábla részletezése.....	34
11. táblázat: A Subjects tábla részletezése	35
12. táblázat: A korrelációk eredményeinek összefoglaló táblázata (N=32).....	48

1. Bevezetés

A szemmozgáskövetés módszerét számos kutatásban alkalmazták már, mint például az olvasás [1], [2], [3], vizuális figyelem [3], [4], [5] vagy marketing célú elemzésekre [6], [7]. A programozás összetett problémamegoldást és koncentrációt kívánó összetett kognitív folyamat, amely kulcsfontosságú a jól átgondolt és helyesen implementált kód megvalósításához. Azonban, ha ezt a folyamatot vizsgálni szeretnénk, akkor olyan vizsgálati eljárásra lenne szükségünk, amely a programozás végzése közben is alkalmazható lehet. Korábbi vizsgálatok azt mutatták, hogy a programozás hatékonysága és a koncentráció, éberség összefüggenek egymással [8], [9]. A koncentráció és az éberség különböző pszichológiai tesztekkel vizsgálható, azonban a tesztek végzése alatt más tevékenység nem folytatható, így ezek nem alkalmazhatók például a programozási tevékenység folytatása közben. Ezért a célom egy olyan szoftver-hardver környezet elkészítése, amely alkalmas a koncentráció és éberség megfigyelésére akár a programozási tevékenység végzése folyamán. Ennek egyik módszere a szemmozgáskövetés, amely egy tetszőleges tevékenység közben alkalmas a belső kognitív folyamatok közvetett megfigyelésére is.

Többféle tekintetkövető, rögzítő és kiértékelő hardver és szoftver eszköz elérhető az ilyen jellegű vizsgálatok elvégzésére és elemzésére. Azonban az ingyenesen elérhető szemmozgás paramétereket rögzítő és kiértékelő alkalmazások funkcionalitása alacsony, támogatottságuk csekély, a fizetős alkalmazások pedig rendkívül költségesek. A dolgozatban bemutatandó munka egyik célja egy olyan szoftver készítése, amely lehetővé teszi a szemmozgás paraméterek rögzítését, elemzését és azok kiértékelését a mai korszerű szoftverimplementációs technológiák, technikák alkalmazásán keresztül. A fejlesztés megkezdése előtt széleskörű hazai és nemzetközi irodalmi áttekintést tettem annak érdekében, hogy a megvalósítandó rendszer a lehető legjobban kiszolgálja az ilyen jellegű kutatási célokat. A dolgozat másik célja, hogy a megvalósított szemmozgás követésen alapuló elemzéseket lehetővé tevő informatikai rendszer segítségével olyan vizsgálatot végezzek el, amely során egyes szemmozgást jellemző paramétereket összevetem a pszichológiai kognitív koncentráció és éberség tesztek eredményeivel. Az így kapott összefüggések lehetőséget adhatnak egy olyan eljárás kidolgozására, mely segítségével a koncentráció és éberség a programozási folyamat során megfigyelhető akár valós időben, vagy utólagos kiértékeléssel.

1.1. Kutatás feltételei

Saját szoftver fejlesztése mellett egy úgynevezett EyeTribe szemmozgás követő kamera, laptop, vizsgálathoz elfogadható átmérőjű másodlagos monitor, valamint különböző kognitív

tesztek kerültek felhasználásra. A vizsgálatokhoz használt algoritmusok futtatásához a Microsoft Visual Studio Community fejlesztői, továbbá a kísérlethez kapcsolódó tesztek implementálásához a PEBL (The Psychology Experiment Building Language) felhasználói környezet került alkalmazásra. A kutatásban résztvevő 18 év feletti vizsgálati személyeket a Dunaújvárosi Szakképzési Centrum Rudas Közgazdasági Technikuma és Kollégium diákjai alkották, akik önkéntes alapon jelentkeztek a kísérletre, továbbá semmiféle gyógyszeres kezelés alatt nem álltak.

1.2. Kutatás célkitűzései

A kutatómunka célkitűzései 3 fő pontba sorolhatók:

1. Egy olyan informatikai rendszer kialakítása, mely képes meghatározni egy szemmozgáskövető eszköz alkalmazásával egyes szemmozgásra jellemző paramétereket.
2. Koncentrációra és éberségre vonatkozó kognitív tesztek lefolytatása közben a szemmozgás megfigyelése és ezek eredményeinek összevetése.
3. A kísérletben elvégzett tesztek eredményeinek kiértékelése, valamint azok összevetése az informatikai rendszer által szolgáltatott szemmozgás paraméterekkel, végezetül a következtetések, kutatási korlátok megfogalmazása és a jövőbeni tervek meghatározása.

1.3. Kutatás módszerei

A fejlesztés és kutatás során a témával kapcsolatos széleskörű nemzetközi és hazai szakirodalom került áttanulmányozásra, annak érdekében, hogy a kutatásban kitűzött célokat, továbbá megvalósítás során alkalmazható technikákat minél szélesebb ismeret alapján tudjam teljesíteni. A vizsgálathoz a PEBL környezetben implementált kognitív tesztek kerültek felhasználásra. A kísérlet során folyamatosan megfigyelésre és rögzítésre kerültek a szemmozgás paraméterek, amelyekből különböző paraméterek analízise és jellemzői kerültek elemzésre Shapiro-Wilk normalitás teszt és Spearman korreláció statisztikai módszerek alkalmazásával.

1.4. A dolgozat felépítése

A dolgozat 5 fő részre bontható, az alábbiak szerint:

1. A dolgozat 2. fejezetében a hazai és nemzetközi szakirodalom felhasználásával, ismertetésre kerül a szem általános felépítése, továbbá az, hogy hogyan is működik ez az érzékszervünk.
2. A dolgozat második részében, a 3. fejezetben ismertetésre kerülnek a főbb szemmozgáskövetés lehetséges technikái, amelyek fontos szerepet töltenek be a tekintet

követésére szolgáló eszköz folyamatos kezelése az integrált szoftver-hardver környezetben.

3. A dolgozat 4. fejezetében a szemmozgás követés paraméterek feldolgozásra alkalmas szoftver kialakításának tervezete és a tervekre épülő megvalósítás kerül részletesebb bemutatásra.
4. A dolgozat, az 5. fejezetben a bemutatásra kerülnek PEBL féle kognitív tesztek, majd a vizsgálat eredményeinek részletes kiértékelése történik, amelyből a levonható következtetések kerülnek megfogalmazásra.
5. A dolgozat végén, a 6. és 7. fejezetekben a kutatás korlátai, valamint az összefoglalás olvasható.

A dolgozatban az irodalmi hivatkozások IEEE szabvány szerint kerültek beillesztésre. Az átláthatóság és terjedelmi okokból a magyarázatokhoz kapcsolódó ábrák egy része a mellékletben kerültek elhelyezésre.

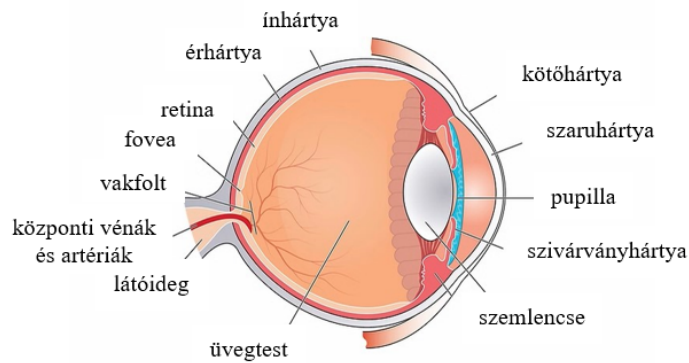
2. Az emberi szem felépítése

Ez a fejezet az emberi szem működésére és anatómiájára fókuszál, hiszen a kutatás szempontjából fontos megértenünk, hogy hogyan is működik az egyik – ha nem a legfontosabb – érzékszervünk.

A szem azon érzékszervünk, amely a legtöbb információt szolgáltatja a külvilágból. Szemgolyóink (*bulbus oculi*) felfogják a külvilágból érkező fényimpulzusokat, majd ezeket elektromos jelekké alakítják, ezek a jelek pedig az ehhez alkalmas idegpályákon az agyba jutnak, ahol aztán az agy értelmezi őket [10]. Az emberi szem egy olyan összetett szerv, amely képes érzékelni a különböző hullámhosszú fényt, vagyis a színeket, amíg a legprimitívebb szemek csak arra képesek, hogy eldöntsék, hogy van-e fény vagy nincs. [10], [11], [12], [13]

2.1. A szem anatómiájának rövid áttekintése

Az emberi látószerv (1. ábra) fő részét képezik a szemgolyók, melyek az ínhártya felszínébe kapcsolódó izmoknak a segítségével, több irányba mozoghatnak összehangoltan. Fontos megemlíteni a látóidegeket, melyek a szem hátsórészén elhelyezkedő retinából továbbítják az információkat az agy felé. Összességében az emberi szem egy két részből álló gyűjtőlencse. Külső része a szaruhártya (*cornea*), a belső része pedig a szemlencse (*lens oculi*). E két rész között helyezkedik el egy lapos, gyűrű alakú, lágy lemez, a szivárványhártya vagy írisz (*iris*). Az írisz meghatározza a szem színét, a közepén elhelyezkedő rés, a pupilla, melyen keresztül jut el a látható fény, az üvegtesten (*corpus vitreum*) át a retinához, szabályozza a szem belsejébe jutó fény mennyiségét, védve a retinát az intenzív fény elől: erős fényre összeszűkül, míg sötétben kitágul, ezzel a tulajdonsággal gyakorlatilag a fényképezőkben is megtalálható rekesz szerepét tölti be. Miután a fényt a pupillánk beengedte a szemünk belsejébe, a szemlencse feladata azt a megfelelő területre fókuszálni, ez a megfelelő hely pedig nem más, mint az ideghártya más néven a retina, ez tíz egymásra épülő rétegből áll, melyből csak a legelső réteg képes a fény érzékelésére. A fényérzékeny receptorok alakjuk miatt csupán pálcikák és csapok. A csapok a nappali, az éles és a színlátásért felelősek, a pálcikák pedig gyenge fényben teljesítenek jobban, ebből következik, hogy ezek a receptorok sokkal érzékenyebbek a fényre. A szem belső burkán, a pupillával szemben található egy 2mm átmérőjű folt. Ez a sárgafolt, közepén a látógödör (*fovea centralis*) az éleslátás helye, itt csak csapok helyezkednek el. A sárgafolttól oldalra található a vakfolt (*discus opticus*), másnéven látóidegfő. Ezen keresztül lépnek be és ki az erek a retinába. A látóidegfőhöz kapcsolódik a látóideg (*nervus opticus*), ez egy 2-3mm átmérőjű érzékszervi, komplex funkciójú ideg. Mivel mindkét szemgolyónkból kilép egy látóideg, ezek egymást keresztezve képezik a látóidegkereszteződést (*chiasma opticum*). [10-17]



1. ábra: A szem felépítése

Forrás:

https://static.wixstatic.com/media/0057cc_82d52cc30fdc4a38915ed311f876d9b5~mv2.png/v1/fill/w_740,h_555,al_c,q_90,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/0057cc_82d52cc30fdc4a38915ed311f876d9b5~mv2.png

2.2. Az emberi szem képalkotásának folyamata

A képalkotás egy összetett és bonyolult biokémiai folyamat. A tárgyról és a környezetünkről alkotott kép a látásközpontban jön létre. Szemünk képalkotása hasonlóan működik, mint egy mai modern fényképezőgép. A fényútja egész egyszerű: a környezetünkben lévő tárgyról a megfelelő hullámhosszúságú fény visszaverődik, ezt pedig a szemünk felfogja. A fény elsőnek a szaruhártyán halad keresztül, majd az üvegtesten, így rávetül a retinára. Itt a retinán képződik le a tárgyról alkotott fordított kép, hiszen szemünk úgy működik, mint egy *camera obscura*, később ezt a képet fordítja vissza az agyunk értelmezése közben. [10], [15]

2.3. Szemmozgás követéssel kapcsolatos alapfogalmak

Az 1. táblázatban összegyűjtésre kerültek a kutatás ismertetéséhez elengedhetetlen alapfogalmakat, kifejezéseket elsősorban a nemzetközi szakirodalmak alapján.

1. táblázat: A szemmozgás követéssel kapcsolatos elengedhetetlen alapfogalmak [18-20]

Fogalom	A fogalom magyarázata
Fixáció	Az az időszak, amikor a szemünk egy adott dologra figyel, tekintetünk ide szegeződik. Általában 100-300 milliszekundum.
Szakkád	Két fixáció közötti gyors, hirtelen szemmozgás.
Tekintetpont	Alapvető mértékegység. Egy tekintetpont egy, a szemmozgás követő eszköz által rögzített minta.
Hőtérkép	A tekintetpontok és a fixációk dinamikus vagy statikus összesítései. A figyelem eloszlását mutatják, általában színekkel.
Érdeklődési terület	Az adatok vizsgálata során részletesebb információkat ír le egy megadott területről, például hányszor tekintette a képernyő azt a részét, fixációk számát, továbbá eltelt idő a terület első pillantásáig.
Első fixáció hossza	Mennyi ideig tartott az első fixáció.
Tekintet hossza	A fixációk összessége.
Perceptuális terjedelem	Olvasás közben egy fixáció, fókuszpontban mennyi szót vagyunk képesek feldolgozni.

2.4. A koncentráció és az éberség kapcsolata a szemmozgás paraméterekkel

A szemmozgás leírására főként három jellemző paramétert használnak: fixációk, szakkádok és a pupilla átmérő. A fixációk alatt azt értjük, hogy a résztvevő vizuális figyelme egy bizonyos pontra fókuszál, míg a szakkádok gyors szemmozgásokat jelölnek két fixációs pont között, amelyek ábrázolják, hogy hogyan és milyen úton mozgott a szem egyikről a másikra. Emellett olyan vizsgálati szempont is lehet, ami az adott területre való visszatérést figyeli. A három paraméterből egyéb más következtetések levonhatók, ami információt írhat le a résztvevő figyelmi szintjéről, éberségéről, továbbá kognitív státuszáról [21]. Ha valaki sok időt tölt egy bizonyos ponton, akár kisebb területen belül, egy lehetséges indoka lehet az, hogy bizonyos információ értelmezésével nehézségbe ütközik, összességében jobban koncentrálni, figyelni, vagyis nagyobb kognitív terhelést is jelenthet [21-24]. A szemmozgás paraméterek alapján olyan térképek hozhatók létre, amely további vizsgálatokat tesz lehetővé [25]. Just illetve a Loftus kutatásai [26-28] olyan eredményeket mutattak, hogy a kognitív terhelések és a fixációk között kapcsolat figyelhető meg, aminek következtében minél nagyobb a kognitív terhelés, annál hosszabb a fixáció időtartam és több a darabszám. A pupilla tágulása szintén egy gyakori kutatási szektor a pupilla tágulás és a kognitív terhelés kapcsolat jelenléte miatt [29]. Kutatások megállapították, hogy a pupilla aktuális mérete kimutathatja a különböző feladatok megoldásának nehézségeit, viszont kognitív terhelés mértékét nem minden esetben tudja azt érzékeltetni [30]. Ezt figyelembe véve, ha az ember valamilyen mentális terhelésnek van kitéve, akkor a szem pupillájának átmérője jelentősen növekszik, amely a feladat megoldás nehézsége alapján függ össze [31-33]. Ezen a területen a tágulás megfigyelésére használt változó a vizsgálat során mért pupilla átmérő átlaga a kísérleti idő függvényében.

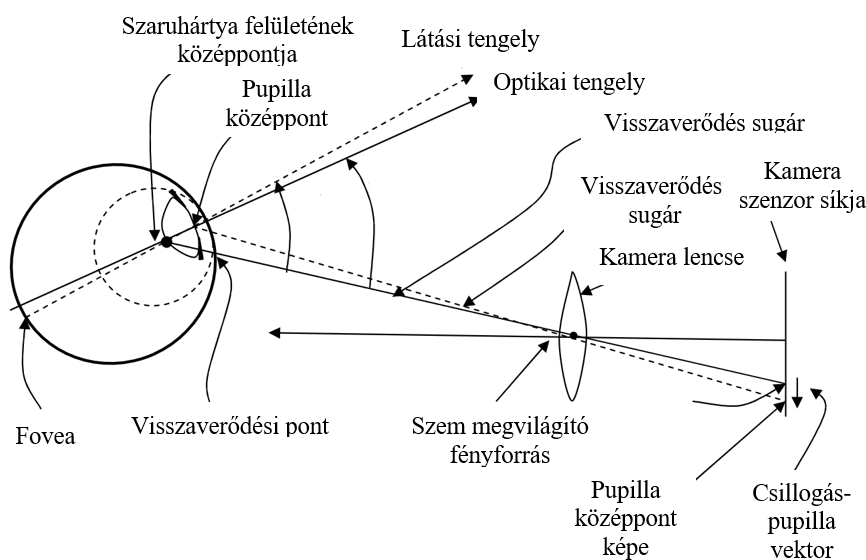
3. Szemmozgáskövetést megvalósító technikák alkalmazása

A szemmozgás paraméterek vizsgálatának története során, kezdetekben a kutatók különböző elektródákat alkalmaztak a pácienseken, amelyeket szem körüli bőrre szereltek fel. Ennek segítségével képesek voltak az elektromos potenciál különbségeinek mérésére, ami folyamatos kapcsolatban állt a tekintet változással [1], [16]. Későbbiekben másik megoldás volt egy speciális kontaktlencse viselése, aminek szélé fémről készült, ezáltal az elektromágneses fluktuációk segítségével mérhető volt a szem és a tekercs egyidejű mozgásának felhasználásával. Ezek a módszerek rendkívül költségesek voltak, továbbá fő hátrány egyike, hogy minden esetben orvosi beavatkozást igényeltek a vizsgálat végrehajtásához [5].

A technológia fejlődésének köszönhetően, napjainkban leginkább egy külső, infravörös kamerát alkalmaznak a szemmozgás paramétereinek rögzítésére, aminek adatait egy számítógép dolgozza fel. Az infravörös elven működő szemkamerák úgynevezett *Pupil center-cornel reflection* (magyarul pupilla központú szaruhártya tükröződés), röviden PCCR technikáját alkalmazzák. [35] Az infravörös fény alkalmazása előnyös a külső fényforrások által keltett zavarok kiszűrésére.

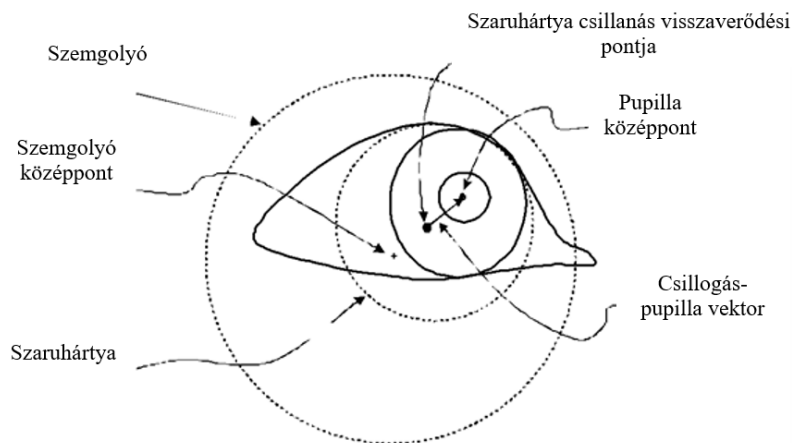
3.1. Pupilla központú szaruhártya tükröződés (PCCR) elve

A PCCR módszer (2. ábra) alapjául szolgáló elmélet azt fejezi ki, hogy egy fényforrás segítségével a szemről erősen visszaverődő, továbbá a szaruhártyán és a pupillán létrehozott reflexió alkalmazása rögzíthető egy infravörös kamera segítségével [5], [35]. Ezáltal a kamera és a reflexió között egy olyan vektor jön létre, ami alapján kiszámítható a tekintet jelenlegi iránya.



2. ábra: A PCCR módszer működési elve (Guestrin és M. Eizenman, 2006 alapján) [36]

Amikor egy személy közvetlenül a kamerába néz, a szaruhártya csillanás a pupilla középpontja kerül visszaverődésre. Ahogyan mozog a pupilla, úgy a kamera is más szögben látja a szemet. Amennyiben valaki felfelé forgatja szemeit a kamerához képest, akkor a pupilla közepe egyaránt felfele mozdul a szaruhártya csillanás közepétől, így a vektor is magasabbra mutat. Az eset ugyanúgy játszódik le bármilyen irányban, például, ha balra néz (kamera szögében jobbra), a vektor is egyaránt a baloldali irányba mozdul, a pupilla középpontjához. [37], [38], [35] A vektort gyakran nevezik csillogás-pupilla vektornak is, amelyet a 3. ábra ábrázol.



3. ábra: A csillogás-pupilla vektor meghatározása

Forrás:

[https://www.researchgate.net/publication/32889349 Eye Tracking A Perceptual Interface for Content Based Image Retrieval/figures](https://www.researchgate.net/publication/32889349_Eye_Tracking_A_Perceptual_Interface_for_Content_Based_Image_Retrieval/figures)

3.2. Pupilla megvilágítási technikák részletezése

Az infravörös alapú szemmozgáskövető kamerák a pupilla és a pillantás meghatározásához valamilyen megvilágítási módszert vesznek igénybe [40]. Ezt kétféle úton megtehető, amelyek a következők:

3.2.1. Világospupilla-módszer

Ebben az esetben az infravörös fény megvilágítja a szemet, ami a retináról visszaverődik egyenesen a kamerába. Ennek következtében a pupilla fényesen jelenik meg az adatfeldolgozó képen. Ugyanaz a jelenség játszódik le a „vörösszem effektusnál” is [41], [42], amikor valakit lefényképezünk vaku használatával. A szemmozgás követő algoritmusok úgy azonosítják a pupillát, hogy fényes, ellipszis alakú formát keresnek a képen. Amennyiben a fényforrás kamera optikai tengelyével egybeeső, akkor a világospupilla-módszer alkalmazása javasolt pupilla megvilágítása céljából, továbbá a környezeti feltételeknek egyaránt meg kell felelni. Mivel az algoritmus fényesebbnek érzékeli a pupillát, mint a szivárványhártyát, így nagyon fontos, hogy a vizsgálat sötét térben történjen meg, illetve világos szemű (például kék) résztvevő legyen. [40], [43-45]

3.2.2. Sötétpupilla-módszer

A sötétpupilla-módszerhez hasonlóan kamera szintén megvilágítja pupillát infravörös fénnel, azonban, ha a személy szeme és kamera egybeesési szöge eltérő, így a pupilla sötétebbnek tűnik, mint a képen látható szem többi része. Ebben az esetben a szemmozgás követő algoritmusok sötét elliptikus formát keresnek a szemképen. Ezt a módszert normál megvilágítású helyszíneken történő vizsgálatoknál célszerű alkalmazni, továbbá a fent említett problémát jobban tolerálja. Ha az alany barna szemű, esetleg sötét színű szempillafestéket használ, akkor ezek a hatások kevésbé befolyásolják a mérést. A szemmozgás követő termékekben általában mindkét módszer elérhető, legtöbbjükben beépített szoftver algoritmus határozza meg adott környezetben melyik működik precízebben, a nagyon speciális kamerákban pedig felhasználó ki tudja választani az adott helyszínen. [40], [43-45] A kutatásban alkalmazott eszköz is minkét módszert képes használni.

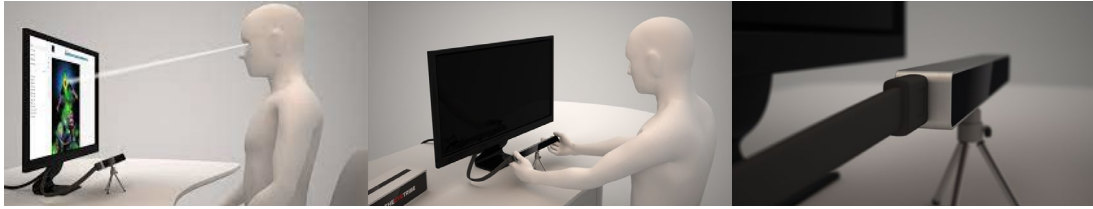
3.3. PCCR elvet alkalmazó szemmozgáskövető eszközök csoportosítása

A videóalapú szemmozgáskövető eszközök két nagyobb csoportba oszthatók: képernyő alapú (statikus) és fejhez csatoltak (dinamikus). A képernyő alapú kamerákról akkor beszélünk, amikor a tekintetkövető egy megjelenítő eszköz (például számítógépes monitor, televízió), alatt helyezkedik el, így a kamera nagy távban nem mozdítható. Ekkor a szemmozgást vizsgáló alkalmazás végrehajtja a feladatokat, és a kijelzőn lévő alkalmazások megjelenítését, miközben a személy a megjelenítőn látottakat vizsgálja. A dinamikus, a statikussal szemben pedig, a kamera nem fix helyzetben, hanem szemüvegként üzemel, és ezt viselnie kell a tesztalanyoknak a vizsgálat során. Ennek következtében, a résztvevő nincs közvetlen kapcsolatban a vizsgálandó termékkel, ezáltal a vizsgálati terület nem korlátozott, amely garantálja a szabadon mozgást. A kutatásban vizsgálni kívánt kognitív tesztek számítógépes képernyőhöz kötöttek, így számomra a statikus jellegű berendezés felel meg.

3.3.1. Képernyő alapú szemmozgáskövetők

- 1 **Gazepoint 3:** A GP3 szemmozgáskövető kamera (1. sz. melléklet) magas teljesítménnyel rendelkezik, amely Gazepoint Control és Analysis szoftvercsomaggal érkezik. A két szoftver lehetőséget biztosít, hogy szoftveren belül Gazepoint kamerát kalibráljon, illetve adatgyűjtést, elemzést tesz lehetővé. A kamera 11 x 25 cm nagyságú, legfeljebb 24” monitorig képes figyelni a tekintetet. Az eszköz relatív magas költsége miatt nem került kiválasztásra.
- 2 **Smart Eye Aurora:** Az Aurora (2. sz. melléklet) egy kis méretű, hordozható eszköz, amely lehetőséget ad a különböző méretű kijelzők egyszerű váltására, bármiféle teljesítmény- vagy pontosságromlás előfordulás nélkül. Az eszközt a magas költsége miatt nem használtam.

- 3 **Tobii Eye X:** A Tobii (Tobii Technology AB) egy svéd csúcstechnológiai vállalat, amely főként szemmozgás követés paraméterek gyűjtésére, elemzésére alkalmas termékeket fejleszt és értékesít. A Tobii termékeit széleskörben használják különböző területen, mint tudományos kutatásban, marketingben, manapság játékokban is. Az eszköz nem igényel folyamatos újra kalibrálást, továbbá mérsékelt fejmozgásokat tesz lehetővé. A szemmozgás paraméterek számításához szükséges képfeldolgozást a Tobii Eye X Engine végzi, amely a USB 3.0 porton keresztül van csatlakoztatva a számítógéphez. Egyszerre több alkalmazás is letudja kérdezni a kamera adatait, akár az Eye X fejlesztői felületen, vagy LAN kapcsolaton keresztül. Az Eye X-szel együtt kiadott Tobii SDK fejlesztői könyvtárakat biztosít C, C++, .NET C#, illetve Unity 3D programozási nyelveken. A Tobii Eye X (3. sz. melléklet) vezérlő ugyan egy alacsony költségű, binokuláris szemkövetésre, amelyet játék- és fogyasztói alkalmazásokba való integrációját teszi lehetővé, azonban a kutatás szempontjából szükséges adatokhoz egy külön erre fejlesztett szoftveren keresztül férhetünk hozzá, ami viszont nagyon költséges, ezért ennek használatát elvetettem.
- 4 **EyeLink 1000 Plus:** Az EyeLink 1000 Plus (4. sz. melléklet) egy nagy teljesítményű mérőeszköz, amely lehetővé teszi széleskörű szemmozgás követő feladatok elemzését. Alacsony térzajjal, és magas mintavételi frekvenciával képes adatot rögzíteni, továbbá az elsők között szerepel, amely szoftveresen és műszakilag egyaránt lehetővé teszi működését MRI, MEG, EEG-n át viselkedési laboratóriumig. Kamera tartalmaz szemkamera mellett kartartót, fejtartót, továbbá asztali rögzítésre is képes, amely elősegíti a szemkövetési feladatok elsajátításának optimalizálását. Mivel az aktuális kutatás nem követelt meg ilyen professzionális és költséges eszközt, ezért nem ezt választottam.
- 5 **The EyeTribe:** Az EyeTribe egy dán, 2011 októberében induló vállalat volt, amely hírnevét az alacsony költségű szemkövető eszköz gyártásáról nyerhette el. Az gyártó világrekordot döntött ezzel, mint legkisebb, egyben legolcsóbb szemmozgás követő eszköz. Képes szemmozgás adatokat rögzíteni egy 20 x 1.9 x 1.9 cm méretű eszközzel (4. ábra). Az eszköz követi a felhasználó pupillájának legapróbb mozgását is, illetve annak méretét. A kamera pontossága, körülbelül 0.5° és 60 adatot biztosít másodpercenként. Az alkalmazás fejlesztői könyvtára C++, C# és Java programozási nyelveken érhető el Windows vagy Mac környezet alatt. Mivel az eszköz az aktuális kutatás szempontjából megfelelő és költséghatékony, így a kutatásomban ezt az eszközt alkalmaztam.



4. ábra: Az Eye Tribe szemmozgáskövető eszköze.

Forrás: <https://theeyetribe.com/>

3.3.2. Fejre csatolható szemmozgáskövetők

1. **Eye ETVision:** Az ETVision rendszer (5. sz. melléklet) az Argus vállalat fejlesztése, amely magas frekvencián továbbít adatot és binokuláris mérést tesz lehetővé. A szemüveget korrigált vagy nem korrigált látású résztvevők egyaránt viselhetik. Szoftveresen megadható, hogy a szemüveg egyponstos vagy többponstos kalibrálást végezzen el. Az adatok WiFi-n vagy LAN hálózaton keresztül továbbíthatók Laptopra, PC-re vagy akár SD kártyára is menthetők.
2. **EyeLink II:** A fejhez csatolt szemkövető kamera (6. sz. melléklet) szinte a leggyorsabb adatátviteli sebességgel és a legnagyobb felbontással rendelkezik a dinamikus kamerák piacán. Az eszköz továbbá 500 Hz frekvencián biztosít binokuláris szemmozgás követést, 0.5°-os pontossággal.

Mivel a kutatásban vizsgálni kívánt kognitív tesztek számítógépes képernyőhöz kötöttek, így számomra a statikus jellegű berendezés felel meg, ezért elvetettem a fejre csatolható szemmozgáskövető eszközök alkalmazását.

3.3.3. Szemmozgáskövető eszközök összehasonlítása

A 3.3.1.- illetve a 3.3.2. fejezetben összefoglalt PCCR elvét követő szemmozgáskövető eszközök fontosabb paraméterei a 2. táblázatban láthatók.

2. táblázat: Szemmozgáskövető eszközök specifikációinak részletezése.
 Forrás: Az eszközök kézikönyve.

Szemmozgáskövető eszköz	Pontosság (fok)	Frissítési frekvencia (Hz)	Késleltetés (ms)
Gazepoint 3	0,1	60	<50
Smart Eye Aurora	0,1	60	<50
Tobii Eye X	0,25	55	<50
EyeLink 1000	0,01	250-500-1000-2000	<10
EyeTribe	0,1	30-60	<20
Eye ETVision	0,5	180	<20
EyeLink II	0,02	250-500	<14

Az eszközök tulajdonságaiból következtethető, hogy a piacon alacsony- illetve magas teljesítményű berendezések egyaránt megtalálhatók, amely meghatározza a kamera költségét is. Szemkövető kiválasztásánál fontos szerepet játszik a kutatás témája és annak költséghatékonysága. Amennyiben a szem gyors mozgását (szakkád) szeretnénk megfigyelni, akkor elengedhetetlen a minél magasabb frissítési frekvenciaszám. A pupilla, és a fixáció tulajdonságok vizsgálatára, a pontosság elsődleges szempont, így a listázott kamerák szinte mindegyike tud megfelelő szerepet nyújtani. Mivel az EyeTribe számomra elérhető volt és az aktuális kutatáshoz megfelelő, ezért a kutatáshoz ez az eszköz került alkalmazásra.

3.3.4. Szemmozgáskövető rendszerek alkalmazási lehetőségeinek elemzése

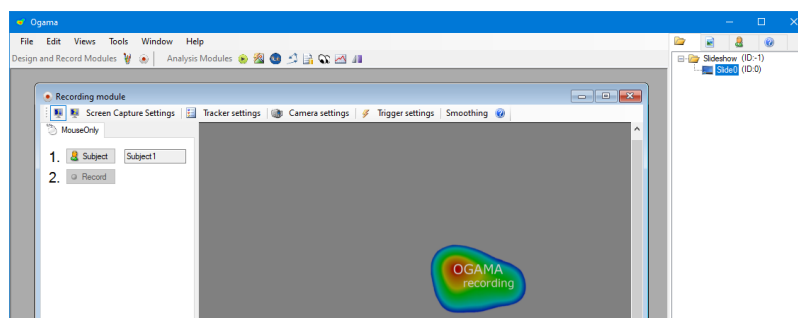
Terjedelmi korlátok miatt nem említek meg minden olyan szemmozgás követéssel összefüggő alkalmazási lehetőséget, amelyről olvastam, kizárólag egyet-egy emelet ki, illetve a bevezetésben is említettem már néhányat. Masao és Masai [46] kutatásában szemmozgás követést alkalmazva megvizsgáltak egyetemista tanulókon a „zsírétetés”, „kalóriaszegény”, és „fogyókúra jótékony hatása” üzeneteket tartalmazó hirdetések befolyásolását. A tekintet folyamatos követésével a számos olyan degeneratív betegséget megvizsgáltak már, mint például a diszlexia [47], [48], Parkinson-kór [49], [50], vagy az Alzheimer-kór [51], [52]. Az autizmus megfigyelésére egyaránt alkalmaztak már szemmozgáskövető technikákat. A [53] tanulmány azzal foglalkozott, hogy megvizsgálja a rögzített paraméterek felhasználásával az egészséges és az autizmusban szenvedő felnőttek között kimutatható-e különbség. A vizsgálat eredményeként kijelenthető, hogy az autizmust 74%-os pontossággal tudták automatikusan észlelni szemmozgás paraméterek és gépi tanulás alapján. Katona J. és Kővári A. [54] egyik kutatásában a .NET C# programozási nyelv adta LINQ lekérdezőnyelven alapuló lekérdezés- és metódus szintaktika átláthatóságát vizsgálták meg egyetemista résztvevőkön. A vizsgálat célja az volt, hogy igazolja a Microsoft azon állítását [55], [56], mely szerint a LINQ deklaratív lekérdezésekhez használható szintaxis alapú lekérdezések valóban könnyebben olvashatók és hatékonyabban értelmezhetők, a metódus szintaxissal ellentétben.

Az irodalmi kutatásom során feltárt alkalmazási lehetőségek között azonban nem találtam olyan vizsgálatot, ahol a dolgozatomban elemzett és később részletesen is ismertetett PEBL-féle Változás-észlelés, valamint Mackworth számítógépes környezetben implementált figyelem tesztek összevetésre kerültek volna a végrehajtás alatt rögzített szemmozgás paraméterekkel és az ebből levonható következtetések megfogalmazásra kerültek volna.

4. Szemmozgáskövetést megvalósító szoftver implementálása

Az idő múlásával a technológia és a szoftverek is fejlődnek, változnak. Mára néhány ingyenes és több fizetős alkalmazás is rendelkezésre áll a szemmozgás paraméterek rögzítésére és elemzésére, amelyek közül három ingyenesen is elérhető szoftver kerül részletezésre.

1. **GazePointer:** A GazePointer webkamerát használ a paraméterek fogadására. Célja, hogy ne keljen semmilyen költséges szemkövető hardvert beszerezni a szemmozgás elemzésére, mindössze csak egy hagyományos webkamerára van szükség. A GazePointer a GazeFlow szemmozgás követő motoron alapszik és fejlesztői könyvtárak segítségével továbbíthatók a szemmozgás paraméterek más alkalmazásokba. Mivel a szoftver funkciói a kutatás szempontjából korlátozottak, ezért nem ezt az alkalmazást fejlesztettem tovább.
2. **Tobii Pro SDK:** A Tobii Pro SDK többplatformos támogatást biztosít, amely elérhető Microsoft Windows, Mac OS X és GNU/Linux operációs rendszereken egyaránt. Több programozási nyelvhez biztosít API hivatkozásokat, amelyek lehetnek .NET C#, Python, Matlab, Octave, C és nem utolsósorban Unity. Mivel ez az alkalmazás kizárólag Tobii kamerákkal képes kommunikálni, amely számomra nem állt rendelkezésre, ezért ezen SDK-t alkalmazni nem tudtam.
3. **Open Gaze and Mouse Analyzer:** Az OGAMA C# .NET-ben íródott nyílt forráskódú szoftver. Lehetővé teszi a szemmozgási és egérkövetési adatok párhuzamos rögzítését és elemzését. Az egyik jellemzője, hogy a tekintet és egér adatokat egy külön adatbázisba menti le. Ezeket az adatokat később feldolgozhatjuk, szűrhetjük továbbá figyelemterképeket generálhatunk, AOI-kat specializálhatunk, fixációkat és szakkádokat elemezhetünk. Az 5. ábra az alkalmazás adatrögzítőjének felhasználói felületét mutatja.



5. ábra: Az OGAMA adatrögzítő felülete.

Forrás: Saját készítésű ábra

Az OGAMA ingyenes szoftver már több éve nem kap szoftveres támogatást. Ennek következtében az alkalmazások régebbi, ma már elavult környezetben íródtak. Ingyenes szoftverek nagyrésze csakis webkamerával kommunikál, továbbá mai szemmozgás követő hardvereket nem támogat. Néhány egyéb ingyenes szoftvernek létszükségletű szerverei már nem élnek, így azoknak is korlátozott funkciói érhetők el. A kutatás céljaihoz leginkább illeszkedő alkalmazás az OGAMA, viszont támogatás hiányában korlátozottan alkalmazható. A szoftver továbbá instabil, nagyon régi modulokat használ. A probléma kezelésére két lehetőség adódott. Az első opció már megírt, fizetős, kereskedelmi szoftver használata, mint például az iMotions Research Software, a Gazepoint, az Eyeware GazeSense vagy a Tobii Studio Pro. Ezek rendkívül költséges megoldások, így a kutatásomhoz nem tudtam igénybe venni ezeket a szoftvereket. Másik lehetséges út egy saját fejlesztésű szemmozgáselemzésére alkalmas költséghatékony szoftver-hardver környezet kialakítása, amely következő fejezetekben kerül részletezésre. Érdemes megemlíteni, hogy a legdrágább szemmozgás elemző szoftverek sem alkalmasak egyes szemmozgás paraméterek tekintetében az azonnali, valós idejű kiértékelésre és az adatok visszajelzésére, csak a rögzítés befejezése után offline feldolgozás lehetséges. Azonban számos vizsgálat folyamán előnyös lenne a teszt folyamatának a felhasználó aktuális állapotához történő adaptív illesztése.

4.1. Követelményspecifikáció

A kialakítandó adatfeldolgozó szoftver-hardver környezet megvalósításához az alábbi követelmények kerültek megfogalmazásra:

- fogadni tudja az általam használt Eye Tribe szemmozgáskövető kamera vezetékes – USB 3.0 porton keresztül – küldött adatokat TCP hálózati protokollon keresztül;
- a fogadott adatokat tárolja el egy létező, egységes adatbázisban megfelelő formátumban, amit későbbiekben fel is lehet dolgozni;
- az adatbázisban személyenként külön legyen tárolva a személy adatai, továbbá a hozzá kötődő szemmozgás paraméterek;
- legyen képes az eszközt kalibrálni közvetlenül az alkalmazásból, a vizsgálat megkezdése előtt;
- a szoftver két különálló nézettel rendelkezzen:
 - **vizsgálati nézet:** Csakis a tesztek elvégzéséhez szükséges felület látszódjon. Automatikusan kalibrálja az eszközt, továbbá billentyűkombinációk segítségével elindítható vagy megállítható a felvétel;
 - **adatifeldolgozó nézet:** Minden olyan felület, modul jelenjen meg az alkalmazásban, amely a szemmozgás paraméterek feldolgozásához szükséges.

Ide tartozik a fixációk számítása, hőtérkép ábra készítése vagy a visszajátszási modul;

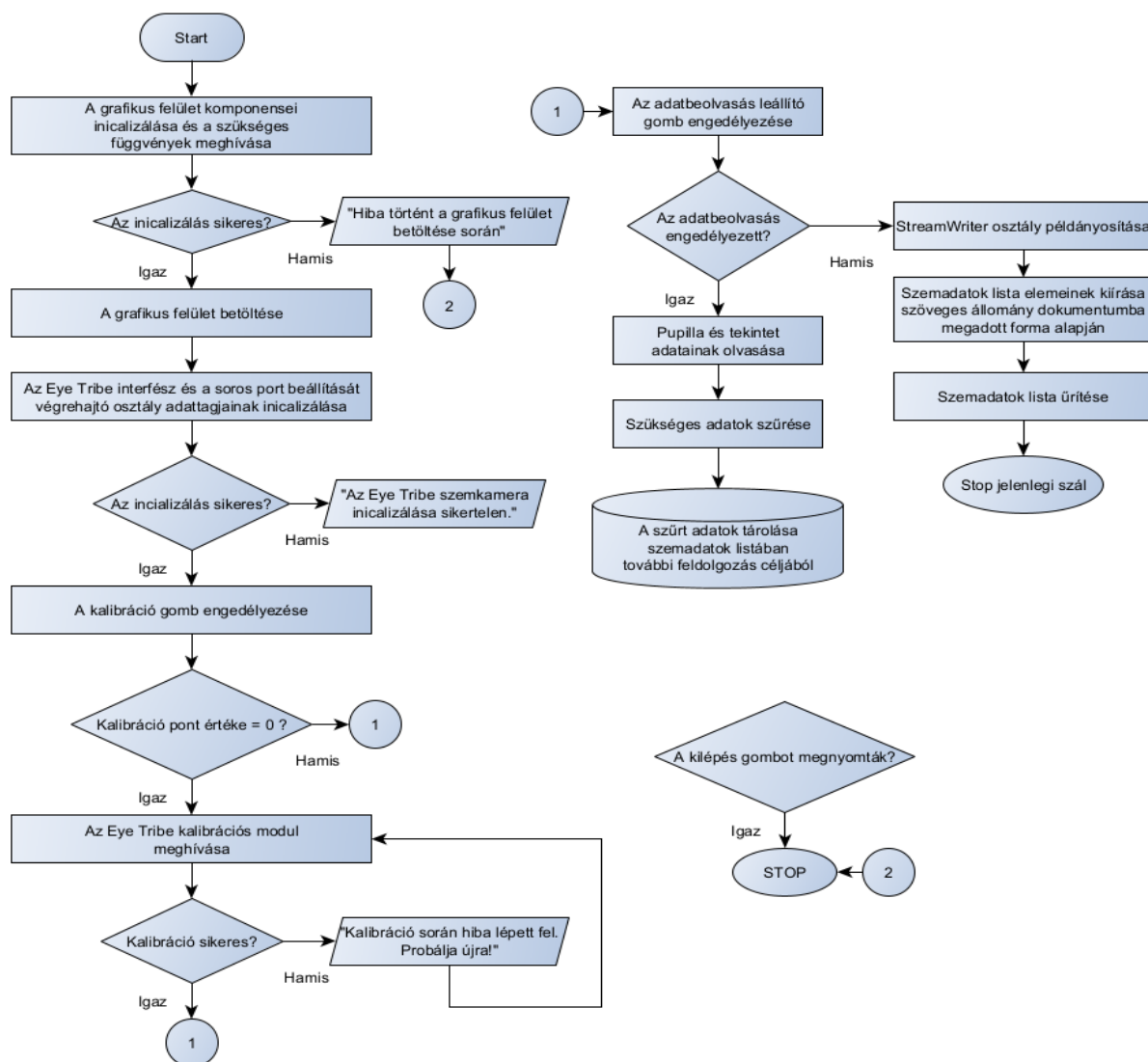
- vizsgálat során valós időben lehessen követni a tesztfeladatok és a szem jelenlegi állapotát;
- különböző tesztfeladatok futtatása, vezérlése közvetlen az alkalmazásból.

4.2. Fejlesztői környezet kiválasztása

A követelményspecifikációban előírt feltételek mellett figyelembe kell venni az Eye Tribe kompatibilitás feltételeit. A meghatározott célokkal együttvéve, az objektumorientált szoftverfejlesztést is támogató, ingyenesen elérhető, professzionális fejlesztői környezet, a Microsoft Visual Studio Community 2022 került alkalmazásra. Az egyik legelterjedtebb magasszintű, objektum-orientált technológiát támogató programozási nyelv, a .NET C# került kiválasztásra.

4.3. A szemmozgáskövető szoftver nagyvonalú logikai terve

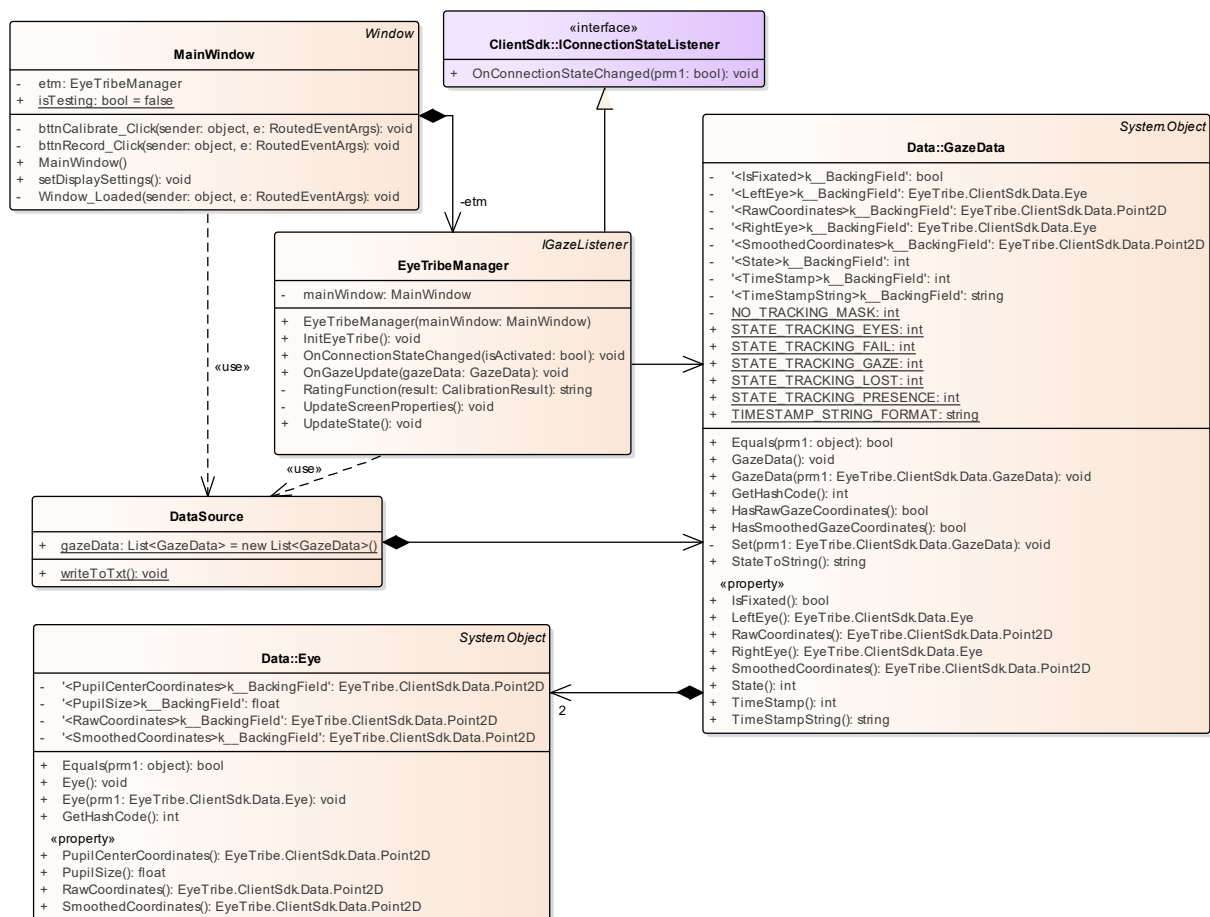
A 6. ábra illusztrálja azt a folyamatot, amely az implementálásra kerülő rendszer működésének logikai tervét mutatja, amely láthatóan ábrázolja a szoftver és az általam használt Eye Tribe szemmozgás követő eszköz közti kommunikáció lépéseit, mely segítségével az adatfeldolgozás és az adattárolás végbe megy. Az eszközkommunikáció és az adattárolás külön szálban került megvalósításra, „1” számmal megjelölve.



6. ábra: A szemmozgás követő alkalmazás nagyvonalú folyamatábrája.
 Forrás: Saját készítésű ábra

4.4. A megvalósítandó szoftver statikus modelljének megalkotása

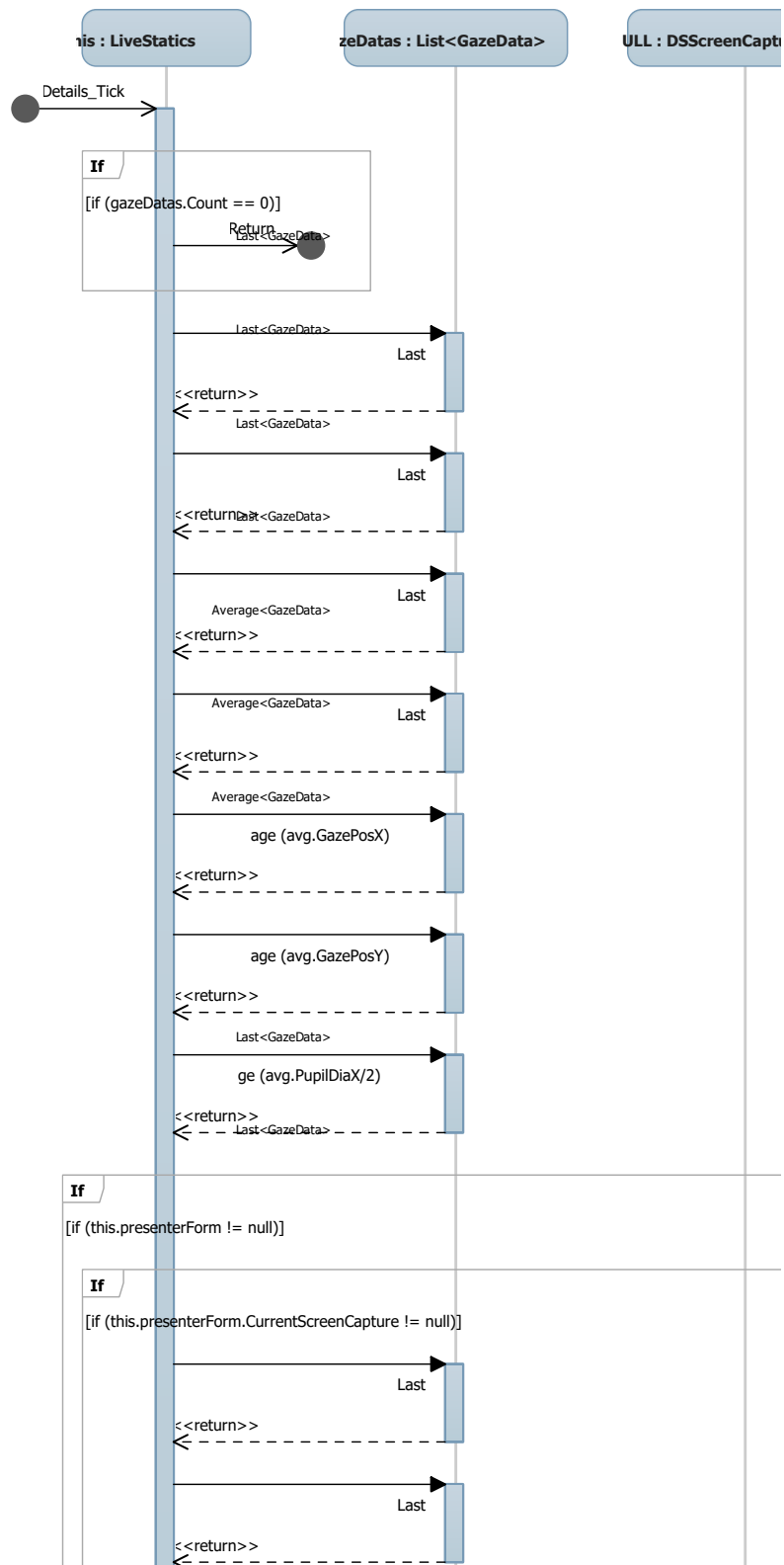
A megvalósítandó szemmozgáskövető szoftver-hardver környezet tervezésében nagy segítséget jelentett a vizuális ábrázolást elősegítő UML (Unified Modelling Language) modellező nyelvben [62]. Az alkalmazás osztályszintű struktúrájának tervezésénél az UML egy statikus diagramját, az osztálydiagramot alkalmaztam. Terjedelmi korlátok miatt a teljes alkalmazás csak egy projektjének az osztályait és azok kapcsolatát ábrázolom a 7. ábrán.



7. ábra: A szemmozgás paramétereket analizáló objektumok leírása, osztálydiagramja.
 Forrás: Saját készítésű ábra

4.5. A megvalósítandó szoftver dinamikus modelljének megalkotása

Mivel az UML több nézetből is segíti az alkalmazások, szoftverek tervezését, így a dinamikus, azaz időben változó elemek, objektum állapotváltozások vizsgálata, elemzése esetében is ezt a modellező nyelvet alkalmaztam. Terjedelmi korlátok miatt ebben az esetben is csak egyetlen – az alkalmazás magját képző – diagramot illusztrálok. A 8. ábra időben illusztrálja azon objektumok kommunikációját, amely a szemmozgás követő eszköz által szolgáltatott adatokat kiolvassák.



8. ábra: Szekvenciadiagram a szemmozgás követő eszköz adatainak kiolvasásáról.
Forrás: Saját készítésű ábra

4.6. Implementáció

A szoftverfejlesztés implementációjának fázisánál nagy hasznát vettem a Programozás 1 és a Programozás 2 kurzusban szerzett ismereteknek és a nemzetközi szoftverfejlesztéssel foglalkozó szakirodalmaknak. Egy lehetséges EyeTribe kamerával történő kommunikáció és annak adatainak fogadása több lépésből áll, ezek kerülnek az alábbi alfejezetekben ismertetésre.

4.6.1. Kapcsolatteremtés az EyeTribe eszközzel

A szemmozgás követő eszköz adatainak eléréséhez elsőként a teszteket elvégzéséhez használt számítógépen az Eye Tribe szerverét kell elindítani, amely a kamera kommunikációért, illetve az adat továbbításáért felel. A szerverről érkező adatfolyam eléréséhez három szükséges lépést kell elvégezni:

1. Az EyeTribe Server szolgáltatás TCP szerverére való csatlakozást;
2. Egy elkülönített szál létrehozását, amiben az adatok folyamatos fogadása történik;
3. Egy időzítő használatát, amely megadott időközönként úgynevezett *hard bit*-eket küld a szerver felé, hogy a kommunikáció eldobása ne történjen meg az aktív életciklus során.

Az Eye Tribe rendelkezik egy olyan fejlesztői csomaggal, amely ezen szolgáltatások megvalósításával is rendelkezik. Ezen statikus függvények az *EyeTribe.ClientSDK* névtérben helyezkednek el, amelyek a *GazeManager* osztályban kerültek implementálásra. A 3. táblázat összegyűjti az olyan fontos függvényeket, amelyek segítségével folyamatos kapcsolatban tudunk állni az eszközzel.

3. táblázat: Az EyeTribe eszköz kommunikációteremtéséhez szükséges függvények.

Visszatérési típus	Függvény azonosító	Kiváltott események
bool	Activate	Ez a tagfüggvény regisztrálja az alkalmazásunkat, mint kliens az Eye Tribe szerver felé. Amennyiben a szerver nem elérhető (például nem fut), a program felugró ablakban tájékoztatja a felhasználót, hogy nem sikerült a szerverre való csatlakozás.
void	AddGazeListener	A függvény az Eye Tribe fejlesztői csomag eseményeihez köti az aktuális osztály metódusait (például OnGazeUpdate).
bool	Deactivate	Feladata, hogy program befejezésekor kapcsolatot bontson az Eye Tribe szerverrel.

4.6.2. Kalibráció elvégzése

Ahhoz, hogy a szervertől képernyőkoordinátákat tudjunk fogadni, mindenekelőtt az eszközt kalibrálni kell. Ez egy olyan eljárás, ami a résztvevő szemét a kijelzőhöz rendeli. Kalibrálás során valahány pontot jelenít meg a képernyő egyes részein, amelyek másodperceként különböző pozíciókba mozognak, amíg szemmozgás követő mintákat gyűjt. Miután az összes pont beállítása megtörtént, a szerver kiszámítja és beállítja az aktív kalibrációt, amellyel

megtörténik a megjelenítő X és Y koordináták megjelenítése. A kalibrációs pontok száma általában 9, de egy függvényben megadható a pontok száma, koordinátája, időtartama, átmérőjének mérete. A pontok növelése a tekintet koordinátájának pontosságát elősegíti. A kamera beépített kalibrációját *CalibrationRunner* osztályból öröklődő *Start* metódussal hajthatjuk végre, amely *EyeTribe.Controls.Calibration* névtérben található meg. A kalibráció sikerességét és a szemek követési pontosságát külön-külön visszaadja az eszköz. A programban a kalibrációs pontosságot a 4. táblázat alapján kerül értékelésre az Eye Tribe szabványa szerint.

4. táblázat: A kalibrációs pontosság értékelése.
Forrás: *The EyeTribe kézikönyv, 2016*¹

Kalibrációs pontosság ²	Minősítés	Leírás
<0,5	Kiváló	Ez az optimális kalibrációs eredmény, nincs szükség újra kalibrálásra.
0,7	Elfogadható	Ez a kalibrációs eredmény alkalmas a szemek követésére újra kalibrálás nélkül.
1	Közepes	Ez a kalibrációs eredmény elfogadható, viszont javasolt a kalibrálás ismétlése.
1,5>	Kedvezőtlen	Nem optimális a szem követésére, kalibrálás szükséges.
	Nincs kalibrálva	Az eszköz nincs még kalibrálva,

4.6.3. Az adatok fogadása az EyeTribe szervertől

A szem adatai az idő függvényében kerül továbbításra, keret formájában. Az eszköz másodpercenként történő adatfrissítési frekvenciájának ismétlődése 30 és 60 Hz között állítható a szoftverben. Ennek az eseménynek a kezelésére szolgál az *OnGazeUpdate* azonosítójú eseménykezelő függvény, amely egy *GazeData* típusú objektum paramétert vár, melyet használva a szem tulajdonságait a későbbiekben feldolgozhatjuk. Az 5. táblázat összefoglalja a *GazeData* osztály publikus tulajdonságait, amik az esemény bekövetkezésekor a rendelkezésre állnak.

¹ <https://github.com/EyeTribe/documentation>.

² Azt feltételezve, hogy a felhasználó körülbelül 60 cm-re ül a képernyőtől vagy az eszköztől, ez a pontosság 0,5-1 cm-es átlagos eltérésnek felel meg.

5. táblázat: GazeData osztály szolgáltatásai

Típus	Tulajdonság	Leírás
Eye	LeftEye	Bal oldali szem adattagjainak leírása.
Point2D	RawCoordinates	A tekintet pont koordinátája, amely 2 elemből áll: képernyő X és Y koordinátája, ahova a felhasználó éppen néz. Ez egy nyers adat, így adatfeldolgozáskor "remegő" előnézetet tapasztalhatunk, így ezt a tulajdonságot kevésbé használtam fel.
Eye	RightEye	Jobboldali szem adattagjainak leírása.
Point2D	SmoothedCoordinates	A <i>RawCoordinates</i> tulajdonság fejlesztett változata, amely kaotikusan változó koordináta finomítására szolgál, ennek során egy egységes, stabilizált pontot biztosít az adattag.
long	TimeStamp	Unix időformátumba, azaz 1970. január 1. éjfél óta eltelt idő másodperc formában, amely leírja az adatfrissítés pontos dátumát.
string	TimeStampString	TimeStamp tulajdonság értékét adja vissza <i>string</i> típusban.

A 6. táblázatban a bal- illetve jobb oldali szem leírására az Eye osztály szolgál. A következőben részletezésre kerül egy adott szemnek milyen tulajdonságait gyűjti össze az EyeTribe.

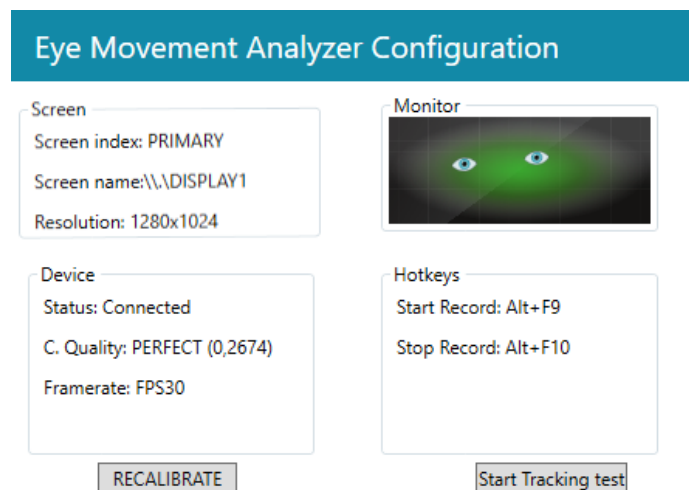
6. táblázat: Az Eye osztály adattagjainak részletezése

Típus	Tulajdonság	Leírás
Point2D	PupilCenterCoordinates	A pupilla középpontja kerül tárolásra az X és Y koordinátában normalizált értékben.
double	PupilSize	A pupilla átmérőjének mérete normalizált értékben.
Point2D	RawCoordinates	Az adott szem tekintet pont koordinátája, amely 2 elemből áll: képernyő X és Y koordinátája, ahova felhasználó éppen néz. Ez egy nyers adat, így adatfeldolgozáskor "remegő" előnézetet tapasztalhatunk, így ezt a tulajdonságot kevésbé használtam fel.
Point2D	SmoothedCoordinates	A <i>RawCoordinates</i> tulajdonság fejlesztett változata, amely kaotikusan változó koordináta finomítására szolgál, ennek során egy egységes, stabilizált pontot biztosít.

4.6.4. A gyűjtött adatok tárolása és feldolgozása

A program futása során, az adatleállítás esemény bekövetkezte előtt folyamatosan gyűjti az adatokat a szem mozgásáról, illetve pupilla tulajdonságáról. Az adatok tárolása a program futása során a memóriában történik, egy generikus lista formájában, amely a későbbiekben élő adat formájában feldolgozható. Azonban a kívánt tesztfeladatok elvégzésének eredményének vizsgálata legtöbbször a felmérés után végezhető el, így valamilyen úton a gyűjtött szem adatokat utólag felhasználó, helyi fájlban vagy adatbázisban szükséges tárolni. Ennek segítségével, a saját alkalmazásunkból gyűjtött adatok többféleképpen feldolgozhatók. Az egyik lehetőség, hogy egy saját tárolási séma kerül elkészítésre, amelyet a program a fájlbeolvasáskor követni fog, így az adatok egy valamilyen típusú, szemadatokhoz köthető generikus listában kerül eltárolása a program futási idejében. Így olyan függvények köthetők

az alkalmazáshoz, amelyek különböző statisztikát tud számolni szemmozgás adatok összességéből, amely a kutatásom során is fontos szerepet tölt be. A fájlba exportált szemmozgás adatok importálása és feldolgozása olyan előnnyel jár, hogy létrehozható egy saját teszt feladatokkal működő alkalmazás, ami párhuzamosan, folyamatosan rögzíti az adatokat, és az adatainak mentése után, a teszt eredményeinek elemzését egy harmadik féltől származó alkalmazásban megvalósítható, például az említett OGAMA szoftveren keresztül. A 9. ábra mutatja az elkészült szemmozgás paramétergyűjtő alkalmazás előnézetét.



9. ábra: Egy saját készítésű szemmozgáskövető alkalmazás, amely adatmentést tesz lehetővé.
Forrás: Saját készítésű ábra.

4.7. A saját készítésű szemmozgáskövető modul illesztése az OGAMA adatelemző alkalmazáshoz

Az EyeTribe szemkövető eszközt felhasználó alkalmazás implementálása előtt összehasonlításra kerültek az ingyenesen elérhető, nyílt forráskódú szemkövetést elemző szoftverek, és az offline adatelemzési lehetőségek alapján kiválasztásra került a leghatékonyabb, aminek a funkciói az elvégezni kívánt vizsgálatokhoz a legmegfelelőbb. A kiválasztott szoftver az aktuális fejezetben bemutatott OGAMA, mely a követelményfeltárásban szereplő szükséges statisztikakészítő algoritmusokkal rendelkezik, amely felhasználható saját vizsgálatok elvégzéséhez. Ennek során, új jövőbeli cél került előtérbe; az OGAMA továbbfejlesztése, átalakítása saját célokra és a kognitív tesztek elvégzéséhez szükséges megfelelő környezet kialakítása.

4.7.1. Az OGAMA alkalmazás nagyvonalú körbejárása

Az alkalmazás továbbfejlesztése és saját funkciók implementálása előtt, mindenekelőtt meg kell ismernünk a szoftver működését és lehetőségeit. Az Open Gaze and Mouse Analyzer szoftver letöltése saját hivatalos weboldalán, www.ogama.net címen érhető el, a forráskódja

pedig az egyik legnagyobb forráskódmegosztó oldalon, a GitHub felületén egyaránt megtekinthető és letölthető. Az alkalmazás telepítése- és megnyitása után egy párbeszéd fogadja a felhasználót, ahol kiválaszthatunk vagy létrehozhatunk egy saját projektet, aminek célja az alkalmazás beállításai, továbbá résztvevő adatai egymástól elkülönített tárolása. Projekt létrehozása esetén alapvető beállítások elvégzését várja a program (pl.: monitor felbontása, kamera frissítési rátája, fixáció mérési adatok stb.), melynek mentése után elkészül a saját projektünk és a párbeszéd ablak bezárása után elérjük a program kezdőoldalát. A kezdőablakban 9 nézet közül választhat a felhasználó, amelyeket a 7. táblázat részletez.

7. táblázat: OGAMA modulválasztó felület elemeinek részletezése

A gomb felirata	Funkciók részletezése
Replay	Megjeleníti a felhasználó számára az úgynevezett visszajátszási modul ablakot, ahol személyenként külön-külön visszatekinthető a vizsgálat adata videó formában. Megnézhetők a fixációs adatok, továbbá hőtérkép készíthető szemmozgás elemzésével.
Attention Map	Kattintás után a személy figyelemterképe kérhető le fixációs adatok alapján.
Saliency Module	A Saliency egy olyan modul, amiben elkészíthető az úgynevezett hőtérkép, amely különböző színátmenetekkel jelzi a fixációs tulajdonságok alapján, hogy a felület egyes részeit a tesztalany hogyan figyelte meg.
Scanpath	Egy olyan modul várja a felhasználót, ahol össze tudja hasonlítani az összes személy szemkövetési mintáját egy egységes ábrán. Ábrázolásra több opció elérhető; pontok, körök és hőtérkép.
Fixations	Fixáció listázó modul meghívására szolgál, ahol teszt alanyok fixációiból készít egy úgynevezett statisztikai táblázatot.
AIO	Különböző tesztfeladatoknak egy bizonyos területének vizsgálatára alkalmazott modul, ahol szemmozgás statisztikák készíthetők.
Statistics	Egy táblázatkészítő modul, ahol személyekre bontva összefoglalja a vizsgálat során gyűjtött szemmozgás adatait, abból statisztikát készít.
Import Data	Adatimportáló modul, ahol szemmozgási adatok kerülhetnek importálásra valamilyen szöveges fájlból. Ez a modul alkalmas a saját készítésű alkalmazás kiexportált adatainak beolvasására.
Design Slideshow	Az OGAMA szoftver különböző diabemutató készítésre lehetőséget biztosít, ennek a modulja itt nyitható meg. Diakészítéskor képet, szöveget, asztal rögzítést vagy akár videófájlokat csatolhatunk, amelyet vetítéskor a résztvevő megtekinthet.
Record	A <i>Design Slideshow</i> modulban elkészített diasor és a szemmozgás követés rögzítésére szolgáló rögzítő modul. Ebben a modulban kerül végrehajtásra a szemmozgás követési adatolvasás, miközben felhasználó nézi a diasort.

4.7.2. A továbbfejlesztett OGAMA alkalmazás kitűzött céljainak összefoglalása

A továbbfejleszteni kívánt szemmozgáskövető alkalmazáshoz szükséges célok kerülnek megfogalmazásra:

- Az ismertett követelmények megvalósítása a 4.1. alfejezetben részletezett követelményspecifikáció szerint;
- Az OGAMA forráskódjának visszafejtése, backend³ oldalának megismerése;
- A szoftver használatának lényeges egyszerűsítése;
- A szoftver egyéni vizsgálatra alkalmas modell kialakítása;
- Egységes projektben, adatbázisban történő adatgyűjtésre alkalmas munkakörnyezet megvalósítása;
- Automatikusan történő beállítást elvégző algoritmus elkészítése;
- Különböző billentyűkombinációk a felvétel kezdésére, leállítására;
- Automatikus kalibrációelvégző a program indítása során;
- „Többmonitor-felszerelés” támogatása;
- Gyakran előforduló kivételek kezelése;
- Élő statisztika modul készítése, ahol vizsgálat során történt elmúlt idő szemmozgás adatainak statisztika részletezése kérhető le.

4.7.3. A hozzáadott és frissített modulok ismertetése

Az alábbi fejezetben az általam továbbfejlesztett OGAMA szoftverben nagyobb módosítások és hozzáadott funkciók részletezésére kerül sor.

A projektkészítő modul

Az OGAMA eredetileg különböző, egymástól elkülönített projektek kezelésére alkalmas, azonban ez a megvalósítás az adattovábbítás szempontjából hátrány lehet. Az alkalmazás esetében olyan megoldás szükséges, ahol a vizsgálatok egy projektben, továbbá egy egységes helyi adatbázisban kerülnek tárolására. A program első futtatásakor, amennyiben a projekt létrehozása még nem történt meg, egy projektkészítő varázsló fogadja a felhasználót (10. ábra), ahol néhány alapvető a program használatához szükséges információt kell megadni. A beállításvezérlőben szereplő komponensek, függvényeinek részletezése a 8. táblázatban kerül sorra.

³ a szoftver hátsó, felhasználó elől elrejtett számításokat végző kód bázis, amely kapott eredményeket visszaadja felhasználónak.

8. táblázat: A projektkészítő modul összetételeinek részletezése

Típus	Megnevezés	Részletezés
Komponens	grpBxTracker	A szemmozgáskövető eszköz információk gyűjtésére szolgáló komponensgyűjtő. Ebben a csoportban az eszközhöz használt felbontás, és frissítési ráta tulajdonság adható meg.
	grpBxDisplay	Egy többmonitoros <i>setup</i> esetén szükséges megadni, hogy melyik kijelzőn történjen a vizsgálat, illetve hol jelenjen meg az élő adat elemzésére szolgáló modul. Ez a komponens, az információk csoportosítására szolgáló elemek gyűjtésére szolgál.
	txtScreenWidth	A szemkövető kamerához használt felbontás pixel szélessége megadására szolgáló szövegdoboz komponens.
	txtScreenHeight	A szemmozgás követő eszközhöz használt felbontás pixel magasság beállítására szolgáló szövegdoboz komponens.
	txtGazeRate	A szemmozgás követő eszköz frissítési frekvenciájának <i>Hertz</i> érték beállítására szolgáló komponens.
	cmbBxStatisticsIndex	Az adatrögzítés során az élő adat elemzésére szolgáló statisztikai moduljának kijelző kiválasztása.
	cmbBxPresentationIndex	Kiválasztható a prezentációra használt monitor, ami eltárolódik, továbbá meghatározza, hogy melyik kijelzőn történjen a kalibrálás, illetve a szemmozgás adatok rögzítése.
	btnClose	Amennyiben a felhasználó nem szeretne projektet létrehozni a bezárás gombbal megszakíthatja a projektkészítést.
Függvény	btnSave	Amennyiben megadásra került az összes szükséges tulajdonság a kitöltés ellenőrzése után a program elkészíti az egységesített projektet.
	Create	<i>void</i> visszatérési típusú függvény, amely a <i>btnSave</i> nevű gomb kattintása után kerül meghívásra. Ellenőrzi, hogy valóban nem létezik-e a projekt a felülírás elkerülése érdekében, amelyet követ a projektbeállítások értékének mentése egy projektfájlban. Végezetül a projektkönyvtár létrehozásra kerül, ahol a szükséges fájlok egyaránt elkészülnek.
	IsEverythingFilled	<i>bool</i> visszatérési típusú, amely ellenőrzi, a mezők kitöltöttségét.
	ChangeXmlValue	<i>void</i> visszatérési típusú, amely a projektfájl értékeit képes módosítani.
	btnClose_Click	<i>void</i> visszatérési típusú, amely a bezáró gomb kattintás esemény elsülésekor kerül meghívásra. A függvény felszabadítja az alkalmazás által használt erőforrásokat, majd bezárja az alkalmazást.
	btnContinue_Click	<i>void</i> visszatérési típusú, amely a <i>btnContinue</i> gomb kattintás eseményekor kerül meghívásra. A függvény létrehozza a projektet.

Please fill out the project details...

Gaze Tracker Properties	Display Properties
Resolution width: 1920 px	Statistics Monitor: v
Resolution height: 1080 px	Presentation Monitor: v
Gaze rate: 60 Hz	

10. ábra: Projektkészítő ablak felülete.

Forrás: Saját készítésű ábra.

Az elkészült projekt a bejelentkezett felhasználó dokumentumaiban kerül eltárolására, egy külön létrehozott „*EmPowerExperiments\empower-project-sample-v1*” almappában. A projekt könyvtárában 3 további alkönyvtár található meg:

- **Database:** Az adatbázis könyvtára, ahol a helyi adatbázisfájl kerül eltárolására.
- **SlideResources:** Diabemutatáshoz használt csatolmányok tárolására szolgáló könyvtár.
- **Thumbs:** A befejezett vizsgálat után, ebben a könyvtárban kerülnek mentésre az .avi fájlkiterjesztésű videóanyagok, amelyek visszanezhetők.

A projekt gyökérkönyvtárában helyezkedik el a beállításokat eltároló projektfájl. Ez egy *oga* kiterjesztésű *XML (eXtensible Markup Language)* dokumentum, ahol további adatok, mint például a vizsgálatokhoz szükséges OGAMA beállítások kerülnek eltárolásra. Az XML fájl tartalmának részletezése a 9. táblázatban látható.

9. táblázat: A projektfájl XML attribútumainak részletezése

Attribútum	Használt/jellemző érték	Leírás
MergeConsecutiveFixations	true	A megadott maximális távolságon belül történő szemmozgás egységes fixációban történjen.
EliminateFirstFixation	false	Megszünteti az első fixációt, amennyiben az előző személy utolsó adata egybeesik az új személy fixáció koordinátával a(z) <i>LimitForFirstFixation</i> attribútumban megadott időben.
LimitForFirstFixation	300	Az <i>EliminateFirstFixation</i> attribútumban használt maximális idő.
EliminateFirstFixationSimple	false	Mindenféle feltételek nélkül megszünteti az első fixáció adatát.
SerializableVersion	5.1.7759.36944	A forráskódban használt XML olvasó verziószáma.
GazeSamplingRate	60	A szemmozgáskövető eszköz frissítési frekvenciája.
GazeMaxDistance	20	A pixelben megadott maximális távolság, amelyben a szemmozgás és a tekintés egy pontnak tekinthető.
GazeMinSamples	5	Az a mennyiség, amely a mintagyűjtés minimum számát határozza meg fixációs pont létrehozásához.
GazeDiameterDiv	2	A statisztika készítésekor fixáció vizualizáláshoz használt kör átmérőjének aránya. Ez a szám megadja, hogy hány millimásodpercenként növelje a megjelenített kör átmérőjét.
WidthStimulusScreen	1920	Prezentációs monitor felbontásának szélessége
HeightStimulusScreen	1080	Prezentációs monitor felbontásának magassága
Name	empower-...	Projektkönyvtár hivatkozásának neve
SqlInstanceName	SQLEXPRESS	Használt SQL szerver neve

A projektfájlban egyaránt megtalálhatóak az egérkövetésre és a szemmozgáskövetésre vonatkozó egérbeállítások.

Az adattároláshoz használt adatbázis

Összehasonlításra került több adattárolási megvalósítási lehetőség, amelyekből az OGAMA által már használt adattárolási technika került kiválasztásra és továbbfejlesztésre. Kiemelt cél, hogy az összegyűjtött szemmozgási adatok résztvevőként elkülönítve kerüljön eltárolásra. A program a befejezett vizsgálat után a memóriában tárolt adatokat egy helyi/lokális adatbázisfájlban tárolja el. A helyi adatbázis elérési útvonala a projektfájl könyvtáron belül a *Database* almappában lévő projektnévvel megegyező Data Base (.db) kiterjesztésű fájl. Az adatokat az ingyenesen használható, nyílt forráskódú SQLite relációs adatbázis-kezelő rendszer kezeli. Az adatbázisban alapértelmezetten 6 különböző gyűjtő tábla található meg:

- **AOIs:** Az OGAMA szoftveren belül készített érdeklődési terület alakzatjai;
- **GazeFixations:** Szemmozgáskövetésből készült fixációk adatai;
- **MouseFixations:** Egérmozgásból készült fixációk adatai;
- **[Személynév]RawData:** Adott résztvevők szemmozgás adatai;
- **Subjects:** Résztvevők adatai;
- **TrialEvents:** A vizsgálat során történt események.

A szoftver kifejezetten, a *RawData* illetve a *Subjects* táblákra fektet legtöbb hangsúlyt. Az adatbázis frissítése előtt, a tárolt adatok felhasználhatók statisztikák készítésére, amely modul egy későbbi fejezetben kerül további részletezésre. A 10. és 11. táblázatban részletezésre kerülnek a kiemelt táblák, amelyek a szemmozgáskövető alkalmazásban elengedhetetlen szerepet játszanak:

10. táblázat: A RawData tábla részletezése

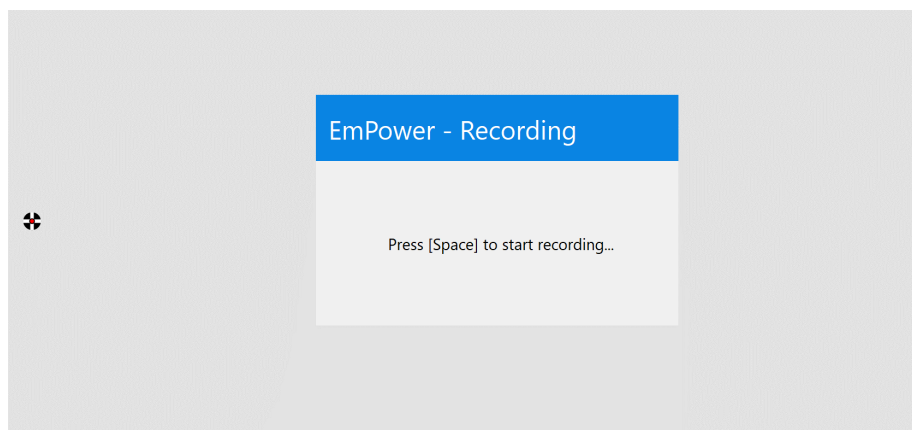
Név	Típus	A mező felhasználásának részletezése
ID	integer	Az aktuális szemmozgás hivatkozási címe.
SubjectName	varchar(50)	A vizsgált személy neve.
Time	integer	Az aktuális szemmozgás rögzítésének kezdete után eltelt idő, amikor olvasásra került az új szemmozgás.
PupilDiaX	float	A személy pupillájának X (szélesség) irányú átmérője.
PupilDiaY	float	A személy pupillájának Y (magasság) irányú átmérője.
GazePosX	float	A tekintetpont a képernyőn lévő X (szélesség) koordinátája.
GazePosY	float	A tekintetpont a képernyőn lévő Y (magasság) koordinátája.
MousePosX	float	Az egérkövetés esetén a kurzor jelenlegi X (szélesség) koordinátája.
MousePosY	float	Az egérkövetés esetén a kurzor jelenlegi Y (magasság) koordinátája.
EventID	integer	Az eseménytároló táblában tárolt eseményhivatkozási címe.

11. táblázat: A Subjects tábla részletezése

Név	Típus	A mező felhasználásának részletezése
ID	integer	Személy azonosítója, amely a hivatkozáskor kerül felhasználásra.
SubjectName	varchar(50)	A résztvevő neve.
Category	varchar(50)	Megadható kategória (például osztályszám).
Age	integer	A résztvevő jelenlegi életkora.
Sex	varchar(50)	A résztvevő neme.
Handedness	varchar(50)	A résztvevő kezessége.
Comments	varchar(4000)	Résztvevőhöz tartozó egyéb megjegyzések.

A program felkészítése vizsgálatok készítésére

A projektkészítés után a teszt végrehajtójának / a program felhasználójának meg kell adnia felhasználó adatait a *Subjects* táblában részletezett adatok alapján. Ezt követi az automatikus kalibrációt elvégző modul. A program az Eye Tribe kalibrációs modulját használja, amely egy teljes képernyős, fehér színű háttéren történik, ahol 9 különböző, másodpercenként, különböző koordinátákon megjelenő pont található meg. A pontos mérés céljából kifejezetten fontos, hogy a kamera a monitor előtt helyezkedjen el, szemben a felhasználóval. A dőlési szöge ne legyen ferde továbbá a felhasználó és az eszköz között körülbelül 60 centiméter távolság legyen. Amennyiben a kalibrációs pontosság eredménye kisebb mint 0,7, egy várakozó panel jelenik meg (11. ábra), ahol a SPACE (szóköz) billentyűzetgomb lenyomásával elindul a szemmozgás paraméterek rögzítése.

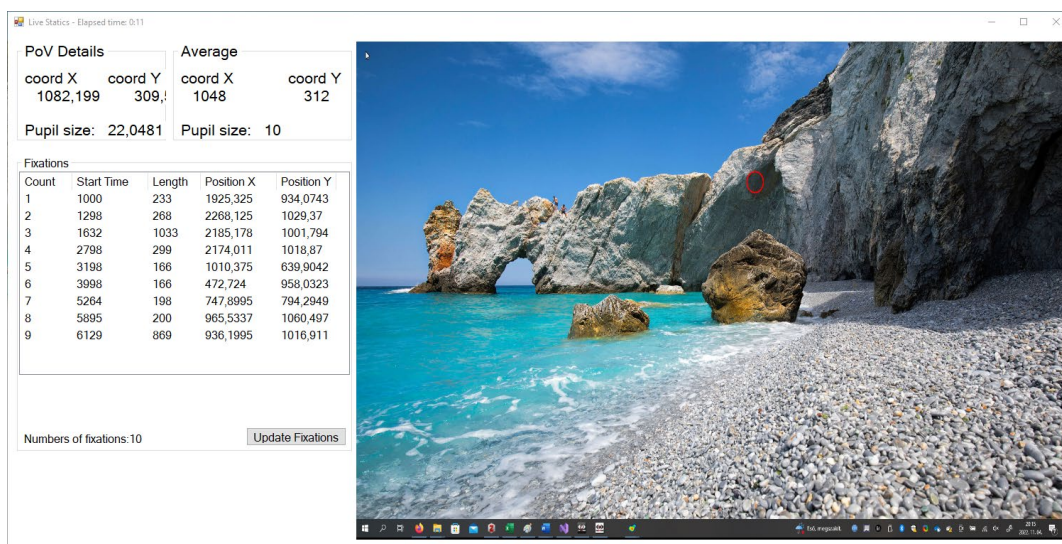


11. ábra: Szoftver állapota a kalibrálás elvégzése után.
Forrás: Saját készítésű ábra.

Rögzítés és az élő adat elemzésére szolgáló funkcióinak ismertetése

A sikeres kalibrálás és a szóköz billentyűzetlenyomása után automatikusan elindul a szemmozgás paraméterek, valamint a képernyő rögzítése, továbbá egy többmonitoros *setup* esetén a statisztikai kijelzőn egy különálló ablak jelenik meg, ahol az adatok elemzése valós időben, folyamatosan elemezhető.

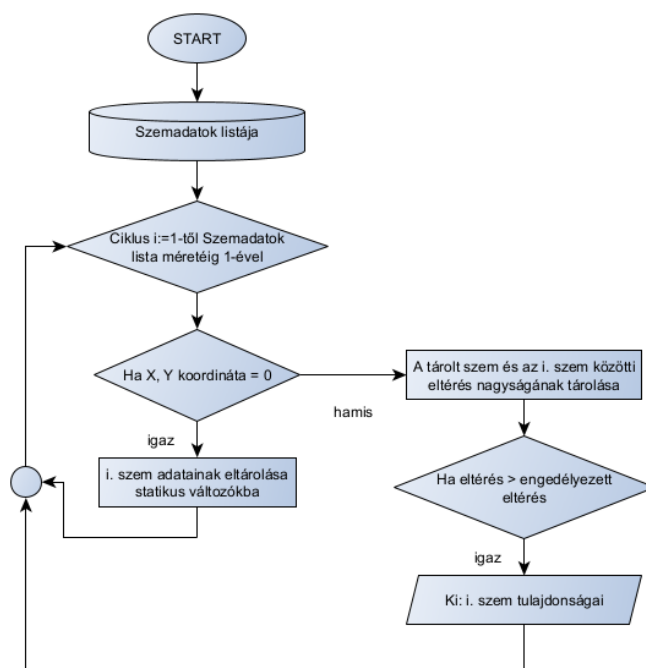
A modul folyamatosan gyűjti és eltárolja az eszköztől érkező csomagokat, amelyekből különböző adatokat jelenít meg a felhasználó részére. Ezek az adatok rendre a következők: az aktuális koordináta, ahova fókuszál a teszt alany, továbbá a pupilla átmérője.



12. ábra: Az élő adat részletező modul grafikus felülete.

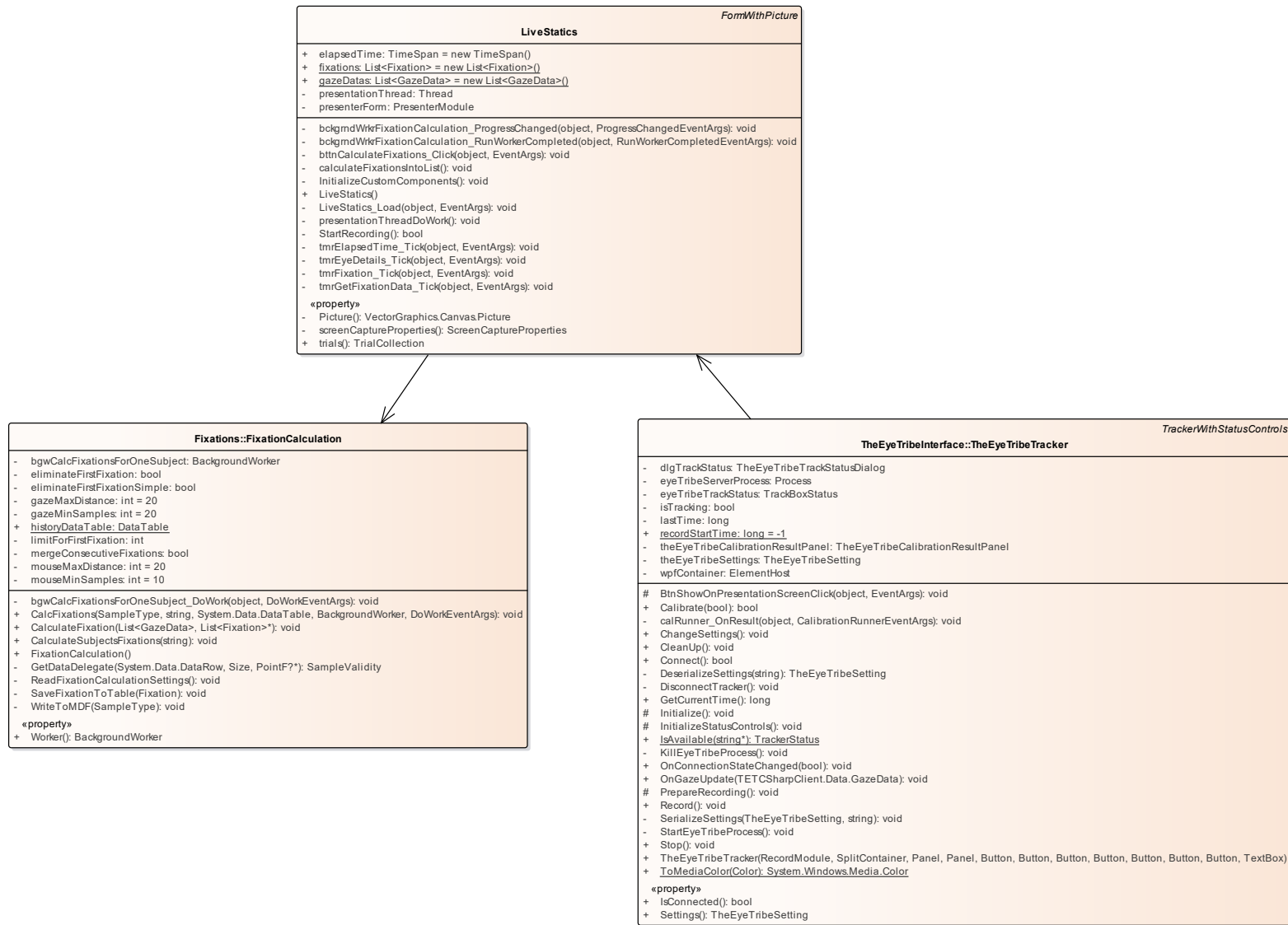
Forrás: saját készítésű ábra

A 12. ábra megmutatja az élő adat részletező moduljának egy pillanatfelvételét. A bal felső sarokban két csoportosító dobozban gyűjti össze a koordinátákat és a pupilla adatokat, majd ezek átlagát. Az élő adat vizsgáló fő funkciója, hogy megadott időközönként a fixációt részletező grafikus listanézetbe összegyűjti a fixációs adatokat. Ebben a listában az adatok oszlop szerint kerülnek feltöltésre az alábbi sorrendben: Count (fixáció indexe); StartTime (rögzítés kezdete után eltelt idejében elkészült fixáció); Length (fixáció időtartama); Position X (képernyő X koordinátája); Position Y (képernyő Y koordinátája). A fixációs adatok 30 másodpercenként kerülnek frissítésre, de manuálisan is lekérhetőek az *Update Fixations* nevezetű gombbal. Ehhez két időpont közötti szemmozgási nyersadat koordinátájából az algoritmus fixációs számolást végez a projektkező modul fejezetben részletezett projektbeállítás adatainak alapján. A 13. ábra mutatja azt a folyamatábrát, amely nagyvonalúan ábrázolja a fixáció készítés folyamatát.



13. ábra: Fixációs számolást nagyvonalúan leíró folyamatábra
Forrás: Saját készítésű ábra.

A programban az összegyűjtött paramétereket beolvassa egy fixáció számoló metódus, amelyen belül egy ciklus segítségével az összes adatot külön-külön elemzi. Az átadott érték a tekintési pont X és Y koordinátája. Az észlelést a *FixationDetection* osztályban a fixáció rögzítő függvény ellenőrzi és hajtja végre. Amennyiben nincs eltárolt koordináta az objektumban, akkor az első adatot eltárolja, majd a többi adatsort ahhoz viszonyítja. Amennyiben a következő koordináta távolsága még nem nagyobb az eltároltnál, akkor figyelmen kívül hagyja, majd tovább ugrik a lista következő elemére. Abban az esetben, ha a távolság a beállításokban megadott lehetséges kör sugaránál nagyobb, akkor a függvény visszaadja az eltárolt tekintési pontot, majd helyettesíti azt a lista aktuális értékével. A fixáció időtartam a koordináta felülírása után, az eltárolt érték- továbbá a pillantás aktuális időpontjai különbsége alapján meghatározható. A feltételhez szükséges távolság, a két pont különbségének alapján kiszámítható. A modul felépítését leíró UM osztálydiagramot a 14. ábra ábrázolja.



14. ábra. Az élő statisztika modul felépítésének statikus modellje, osztálydiagramja.

Forrás: Saját készítésű ábra.

4.8. Tesztelés, validáció

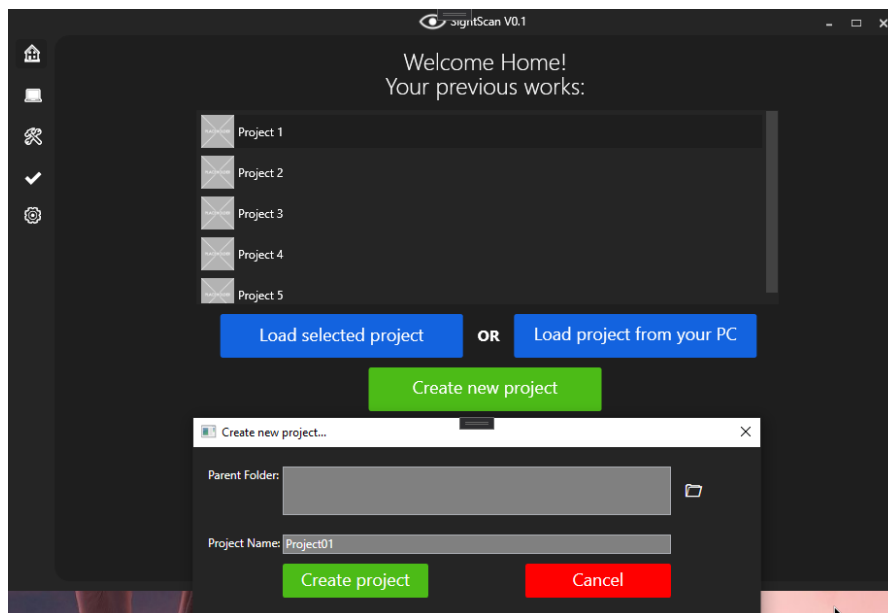
A továbbfejlesztett, az Open Gaze and Mouse Analyzer alkalmazásra épülő modult, a vizsgálatok kezdete előtt különböző, teljeskörű tesztelésnek kellett alávetni, valamint ellenőrizni, hogy a követelményspecifikációban előírt feltételeknek eleget tesz-e.

A módosíthatatlan OGAMA rengeteg hibával, kifagyásokkal küszködött a tesztelés során, így kezdetben a ráépült modul is ugyanezeket a problémákat produkálta. Elsősorban, a szemmozgás adatainak rögzítés kezdete után egy kivétel fogadott bennünket, *NullPointerException* üzenettel, majd az adatrögzítés után pedig ismételten, egy másik típusú, *NullReferenceException* hibával. A többmonitoros felszerelés esetén rögzítés az alkalmazás semmilyen módon nem indult el megfelelő állapotban. A vizsgálat és hibakeresés után kitalasztaltam, hogy az OGAMA a 64 bit architektúrán fordított kimenet esetén nem képes inicializálni tökéletesen az eszközt, így a program 32 bit kiadáson tud csak megfelelően állapotban működni. Ezúton hiba nélkül elindult az adatrögzítés, viszont két monitoros használat esetén továbbra is érdekes hibákkal fogadott az alkalmazás. Azon a számítógépen, ahol az OGAMA továbbfejlesztésre sorra került, bármiféle kivétel, fagyások nélkül, a program hibátlanul kezelte a két-monitort, viszont más hardveren és környezetben a hibák továbbra is jelen voltak. Több hetes hibakeresés után sikerült csak a probléma forrását megtalálnom. Kiderült, hogy az OGAMA nagyon régi, elavult képrögzítő modult használ, amelyet a mai számítógépes perifériákkal megnehezíti az együttműködést. A kijelző adatainak lekérdező moduljának frissítése után, továbbá az eszköz beállításokat eltároló dokumentumok folyamatos frissítése után, az alkalmazás lehetővé tette a hibamentes többmonitoros támogatást. Ezúton a végső tesztelések az élő adat elemző modulon történtek, amely nem produkált bármilyen zavaró tényezőt, esetleges fagyásokat. Innentől az alkalmazás készen állt a résztvevők és a tesztfeladatok vizsgálatára.

4.9. A továbbfejlesztett alkalmazás jövőbeli életciklusa, frissítése

Az alkalmazásnak értelemszerűen további karbantartásra és fejlesztésre van szüksége, emellett a tesztelési fázis nem jelenti a szoftverfejlesztés végét. Az általam használt kutatási célokra az alkalmazás megfelelő, azonban továbbra is elavult modulok vannak alkalmazva különböző statisztikák elvégzésére, illetve a szoftver belső motorja sem a naprakész fejlesztői csomagokat használja. Az alkalmazást folyamatosan igazítani és finomítani kell a jövőben, amely igazodik a megjelenő új modern technológiához.

Az alkalmazás egyik fő hátránya, hogy zárt tulajdonságokkal bír és csakis az általam használt kutatási célokra optimalizált, ellenkező esetben a használata korlátozott. Az OGAMA továbbfejlesztésével párhuzamosan egy új projekt veszi kezdetét, amelynek célja egy teljes mértékben saját fejlesztésű, széleskörű szemmozgáselemzésre alkalmas, költséghatékony szoftver-hardver környezet kialakítása. A program továbbá a jelenleg használt Windows Forms-sal ellentétben, WPF (Windows Presentation Foundation) technológia alkalmazására kerül sor. Ennek fő előnyei, hogy támogatja az architektúrális tervezési mintákat, továbbá a moduláris fejlesztési lehetőségnek köszönhetően könnyen továbbfejleszthető, karbantartható a kódbázis. A projekt folyamatosan igazodik a legújabb, hosszantámogatott .NET keretrendszerhez, a dokumentum írásakor 4.8 verziószámhoz. A SightScan várhatóan ingyenesen letölthető lesz, nyílt forráskódúként végleges kiadása után a Github forráskódmegosztó oldalon, GPL3⁴ licenz alatt. A program jelenleg, korai fejlesztés alatt álló felületét a 15. ábra mutatja be.



15. ábra. *Sightcan*, saját fejlesztésű, tervezési fázis alatt álló alkalmazás előnézete.
Forrás: Saját készítésű ábra.

⁴ Az alkalmazás ingyenesen hozzáférhető, szabadon terjeszthető, forráskódja egyaránt módosítható. A módosított kód esetén a forráskód ugyanúgy megosztandó kérésre. Részletek az alábbi webhelyen: <https://gnu.hu/gplv3.html>

5. A kognitív éberségi, figyelem tesztek lefolytatása és az eredmények kiértékelése, valamint a következtetések levonása

A szemmozgás követést megvalósító saját fejlesztésű alkalmazással kétféle kognitív koncentráció és éberség teszt elvégzése során megfigyelésre, rögzítésre és kiértékelésre kerültek a figyelemmel és az éberséggel összefüggésbe hozható szemmozgás paraméterek, mint a fixációk száma, fixációk időtartama, továbbá a pupilla átmérő. A kognitív tesztek futtatására a nyílt forráskódú, PEBL környezetet használtam, amely számos pszichológiai vizsgálatok során alkalmazott teszt számítógépes megvalósítását tartalmazza. Az elemzésekhez koncentrációt és éberséget vizsgáló eljárások kerültek felhasználásra, amelyek a PEBL féle Változás-észlelés (PEBL Change Detection), valamint a Mackworth óra (PEBL Clock Test) nevű tesztek.

5.1. A kognitív vizsgálatok lefolyásának körülményei

Az alábbi alfejezetben összefoglalásra kerülnek a vizsgálati eljárásban résztvevő személyek alapvető adataik, a felhasznált eszközök és maga a tesztelési környezet.

5.1.1. Vizsgálati személyek

A kognitív tesztek elvégzéséhez és a kialakított szemmozgás követő informatika rendszer tesztelésére alkalmas környezetet a Dunaújvárosi Szakképzési Centrum Rudas Technikuma és Kollégiuma intézmény biztosította. A vizsgálatokra önkéntes alapon jelentkezhettek a tanulók. A személyeknek az eredményei mind anonim úton kerültek tárolásra. A tesztekben összesen 32 (4 fő nő és 28 fő férfi), azonos képességű (érettségivel rendelkező, technikumi képzésen résztvevő), gyógyszeres kezelés, tudatmódosító szerek hatása alatt nem álló, 18-20 ($M=18,88$ $SD=0,61$) közötti diákok vettek részt.

5.1.2. Vizsgálati tesztek

A kognitív vizsgálat során a PEBL környezetben rendelkezésre álló kettő darab éberség, figyelem teszt került felhasználásra, amelyek rendre a Változás-észlelés (PEBL Change Detection) továbbá a Mackworth óra (PEBL Clock Test) voltak.

Változás-észlelés teszt

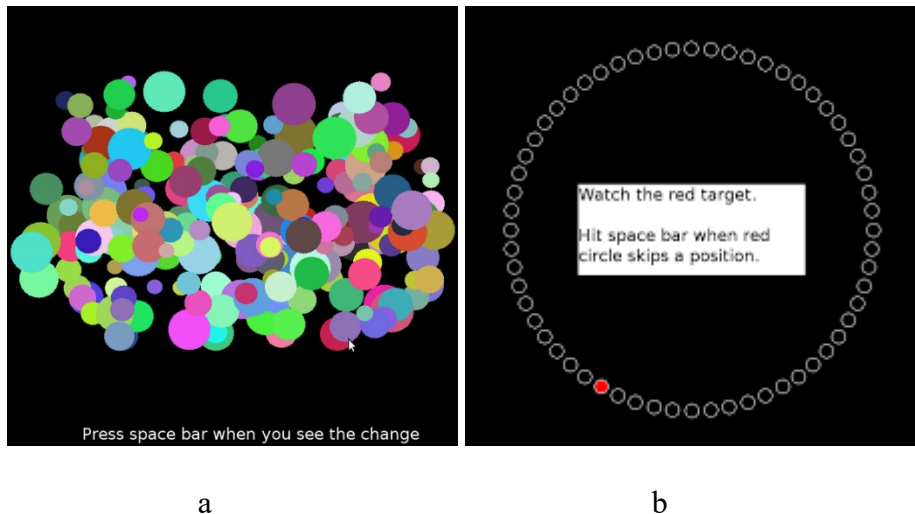
A teszt célja a résztvevő koncentrációs figyelmének mérése és vizsgálata. A teszt során minden egyes próbán a résztvevőnek meg kell találnia és azonosítania kell a mintán lévő egyedi változását az oda-vissza felvillantott kép között. Az alanynak korlátlan időkeret áll rendelkezésre a változás észlelésére. A változás lehet a kör helyének megváltozása; kör

jelenléte és annak hiánya; a kör színének megváltozása és a kör méretének változása. A vizsgálat során a résztvevő átlagos fixációk számát, reakció idejét, a pupilla átmérőjének változását, továbbá a válasz pontosságát rögzítjük.

Mackworth Óra tesztfeladat

A Mackworth Óra egy olyan kísérleti teszt, amely hosszú távú éberség megfigyelésére használnak. A teszt során egy óra fémájú ábrát lát a résztvevő, amin órajárási iránnyal megegyezően piros körök folyamatosan ugrálnak. Véletlenszerűen ezek a körök kihagynak egy lépést, azaz duplát ugranak, az alanynak viszont ezt a jelenséget észlelnie minél gyorsabb tempóban. A vizsgálat során a résztvevő átlagos fixációk számát, reakció idejét, a pupilla átmérőjének változását, továbbá a válasz pontosságát rögzítjük.

A 16. a és b ábrák az alkalmazott két teszt egy-egy pillanatfelvételét mutatják.



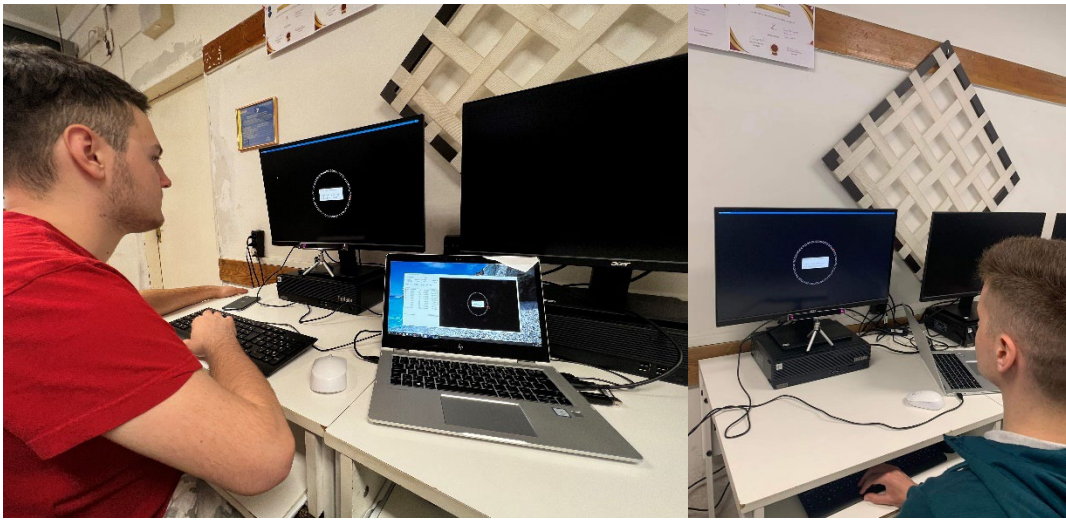
16. ábra: Pillanatfelvétel a Változás-észlelés (PEBL Change Detection) (a), valamint a Mackworth óra (PEBL Clock Test) (b) tesztekéről.

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.1.3. Vizsgálat eljárása és környezet

A kísérlet megkezdése előtt fel kellett készíteni a termet a kognitív tesztek elvégzéséhez. Egy 16:9 képarányú, 24” monitor alá helyeztük a vizsgálatához használt Eye Tribe szemmozgáskövető eszközt, ami személyenként külön kerültek kalibrálásra. A résztvevők és a szemkövető között körülbelül 60 centiméter távolság volt továbbá egy olyan szögben, amely kamera előnézete tökéletesen észlelte a pupillák elhelyezkedését. A tesztek során terem enyhén volt kivilágítva, külső tényezők nem zavarta a kamera lencsáját. A 17. ábrán véletlenszerűen kiválasztott tesztalanyok

láthatók a PEBL féle tesztek elvégzése során. A tesztek lefolytatása alatt folyamatosan megfigyelésre, rögzítésre és kiértékelésre kerültek a szemmozgás paraméterek.



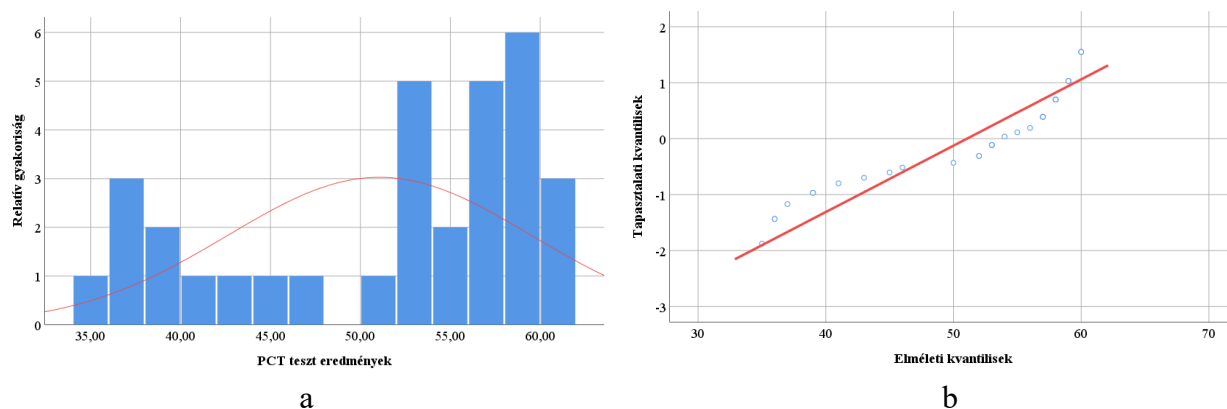
17. ábra: Véletlenszerűen kiválasztott tesztalanyok szemmozgás paramétereinek megfigyelése, rögzítése és kiértékelése a PEBL féle tesztek végzése során.

Forrás: Saját készítésű ábra.

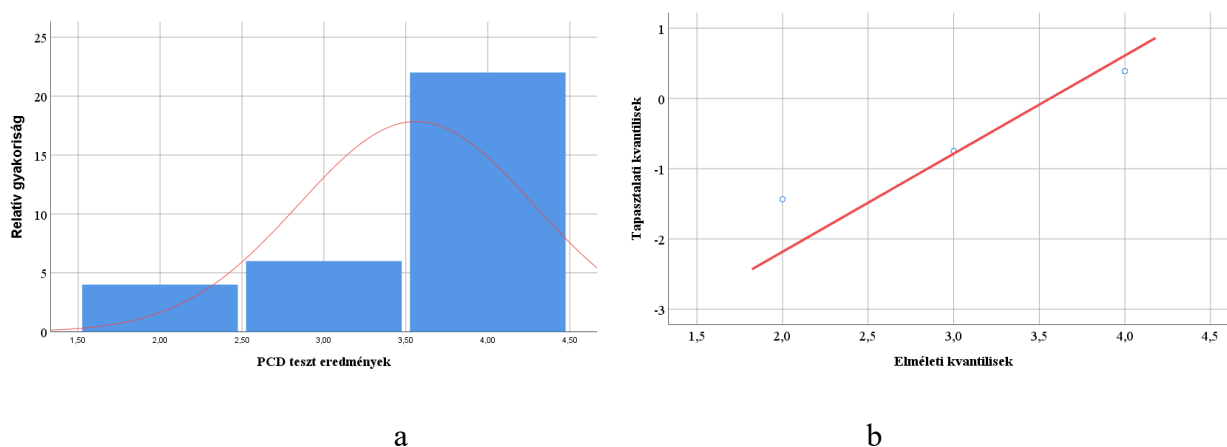
5.2. Teljes mintán végzett kísérlet eredményeinek kiértékelése

A PEBL teszt és a szemmozgás követő rendszer által szolgáltatott mérési eredmények közötti összefüggések, kapcsolatok a teljes mintán, vagyis az összes tesztalanyon végzett kísérletek alapján állapítható meg és értékelhető ki. A kapcsolatok erősségei, az egyes PEBL környezetben implementált tesztek eredményei közül egy, a teszt végeredményére legjellemzőbb paraméter segítségével kerültek megállapításra. A normalitás a Shapiro-Wilk (W) teszt alkalmazásával került meghatározásra, továbbá az adatok intervallum skálán mértek. A kapcsolatok erőssége az egyes mérési eredmények közötti korreláció módszerével kerültek meghatározásra.

A kiértékelés során a PEBL Clock Test (PCT), valamint a PEBL Change Detection (PCD) sikerességére leginkább jellemző, helyes válaszok számával kerültek összevetésre a szemmozgás paraméterek. A PEBL tesztek helyes válaszainak vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása nem áll fent PCT ($W=0,635, p<0,05$) és PCD ($W=0,851, p<0,05$) tesztek esetében sem. A kiértékelés eredményét a 18. és 19. ábra grafikonjai is alátámasztják, ugyanis a hisztogramok és a normál eloszlások alakja nem hasonló, így a mögöttes populációk megközelítőleg sem normálisak, továbbá a Q-Q plot diagramok esetében az adatkészletben szereplő számokat reprezentáló kék pontok az ideálistól távolabb helyezkednek el a piros vonalhoz viszonyítva. Ezen eredmények alapján elsősorban nem parametrikus statisztikai tesztek kerültek végrehajtásra.



18. ábra: PCT teszt adatainak hisztogramja és Q-Q plot diagramjai.
Forrás: Saját készítésű ábra.



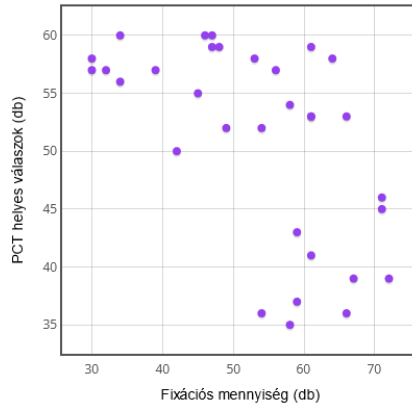
19. ábra: PCD teszt adatainak hisztogramja és QQ-plot diagramjai.
Forrás: Saját készítésű ábra.

A további normalitás vizsgálatok elemzésével kapcsolatban egyéb grafikai elemeket már nem tüntetek fel, ha a Shapiro Wilk teszteredmények már egyértelműséget mutatnak.

5.2.1. PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs számával

A fixációk számának vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása ugyan fennáll ($W=0,946$, $p=0,112$), azonban a korábban már kiértékelt PCT helyes válaszok esetében nem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=-0,554$, $p=0,001$ (2-oldali)) mutatható ki a PCT helyes válaszai ($M=51,06\pm 8,44$), valamint az átlagos fixációs mennyiség ($M=52,97\pm 12,47$) között. A 20. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCT helyes válaszok, valamint az átlagos fixációs mennyiségek viszonyát.



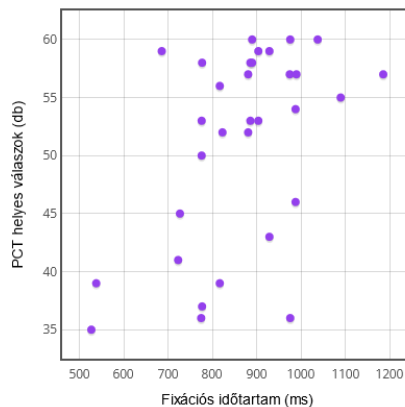
20. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs szám viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,001$).

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.2.2. PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs időtartammal

A fixációs időtartam vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása ugyan fennáll ($W=0,966$, $p=0,390$), azonban a korábban már kiértékelt PCT helyes válaszok esetében nem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=0,434$, $p=0,013$ (2-oldai)) mutatható ki a PCT helyes válaszai ($M=51,06\pm 8,44$), valamint az átlagos fixációs időtartam ($M=865,44\pm 141,23$) milliszekundum között. A 21. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCT helyes válaszok, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyát.



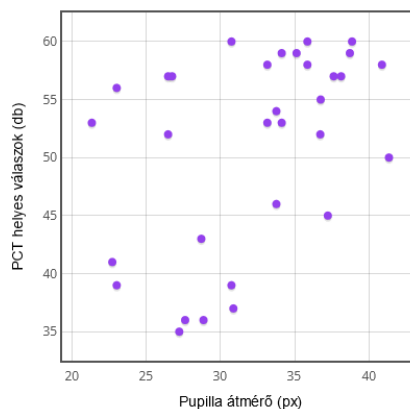
21. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,013$).

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.2.3. PCT helyes eredményeinek összevetése az átlagos pupilla átmérővel

Az átlagos pupilla átmérő vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása ugyan fennáll ($W=0,957$, $p=0,221$), azonban a korábban már kiértékelt PCT helyes válaszok esetében nem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=0,443$, $p=0,011$ (2-oldai)) mutatható ki a PCT helyes válaszai ($M=51,06\pm 8,44$), valamint az átlagos pupilla átmérő ($M=32,17\pm 5,61$) között. A 22. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCT helyes válaszok, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyát.



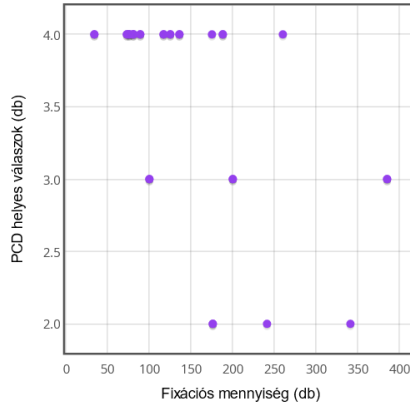
22. ábra: Pontfelhődiagram a PCT helyes válaszainak száma, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,011$)

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.2.4. PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs számmal

A fixációs szám vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása nem áll fenn ($W=0,857$, $p<0,001$), továbbá a már fentebb kiértékelt PCD helyes válaszok esetében sem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=-0,593$, $p<0,05$ (2-oldai)) mutatható ki a PCD helyes válaszai ($M=3,56\pm 0,72$), valamint az átlagos fixációs szám ($M=147,88\pm 92,12$) között. A 23. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCD helyes válaszok, valamint az átlagos fixációs számok viszonyát.



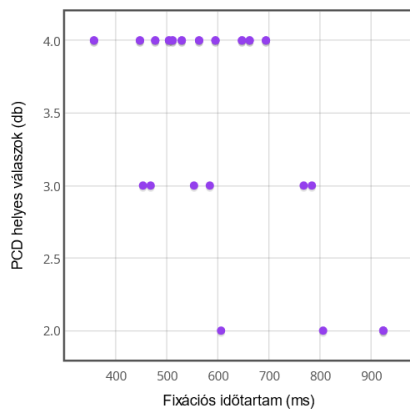
23. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs szám viszonyának vizuális leképezésére ($p < 0,001$).

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.2.5. PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos fixációs időtartammal

A fixációs időtartam vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása ugyan fennáll ($W=0,946$, $p=0,110$), azonban a korábban már kiértékelt PCD helyes válaszok esetében nem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=-0,422$, $p=0,016$ (2-oldai)) mutatható ki a PCD helyes válaszai ($M=3,56 \pm 0,72$), valamint az átlagos fixációs időtartam ($M=588,82 \pm 141,89$) milliszekundum között. A 24. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCD helyes válaszok, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyát.



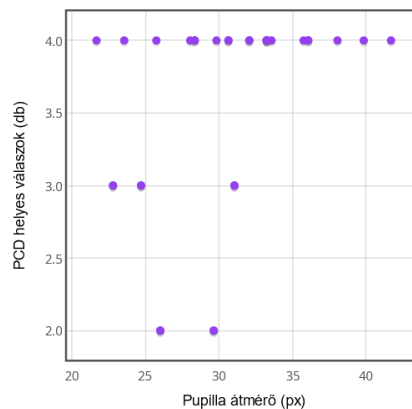
24. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos fixációs időtartam viszonyának vizuális leképezésére ($p=0,016$).

Forrás: Saját készítésű ábra.

5.2.6. PCD helyes eredményeinek összevetése az átlagos pupilla átmérővel

Az átlagos pupilla átmérő vizsgálata során meghatározható, hogy az adatok normalitása ugyan fennáll ($W=0,977$, $p=0,719$), azonban a korábban már kiértékelt PCD helyes válaszok esetében nem, így a két változó közötti kapcsolat mérésére Spearman-féle rang korreláció számítást végeztem.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy jelentős kapcsolat, közepes korreláció ($\rho(30)=0,477$, $p=0,006$ (2-oldali)) mutatható ki a PCD helyes válaszai ($M=51,06\pm 8,44$), valamint az átlagos pupilla átmérő ($M=30,42\pm 5,06$) között. A 25. ábra pontfelhődiagramja mutatja a PCD helyes válaszok, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyát.



25. ábra: Pontfelhődiagram a PCD helyes válaszainak száma, valamint az átlagos pupilla átmérő viszonyának vizuális leképezésére ($p<0,001$).

Forrás: Saját készítésű ábra.

Az eredmények összefoglaló táblázata látható a 12. táblázatban.

12. táblázat: A korrelációk eredményeinek összefoglaló táblázata ($N=32$).

Korrelációs koefficiens p-érték (2-oldali)		
PCT helyes válaszai		
fixációs mennyiség	-0,554	0,001
fixációs időtartam	0,434	0,013
pupilla átmérő	0,443	0,011
Átlagos		
PCD helyes válaszai		
fixációs mennyiség	-0,593	<0,05
fixációs időtartam	0,422	0,016
pupilla átmérő	0,477	0,006

5.3. Következtetések

A PCT és a PCD tesztek helyes eredményei esetében általánosan megfigyelhető, hogy azok a személyek, akik kevesebbet, de hosszabb ideig fixáltak, illetve a pupilla átmérőjük is átlagosan nagyobb volt, magasabb pontszámot értek el feltételezhetően a nagyobb éberség és figyelem szinteknek, valamint a kevesebb kapkodásnak köszönhetően. Ezeket a jellegzetességeket és összefüggéseket több kutatásban [3], [7], [21], [22], [26], [27], [28], [32], [33], [57] is elemezték, vizsgálták és az itt kapott eredményekkel is összefüggésbe hozhatók.

A szemmozgáskövetés vizsgált fixációs szám, fixációs időtartam és pupilla átmérő, valamint az alkalmazott teszt eredményei között meghatározott közepes korreláció alapján megállapítható, hogy kapcsolat mutatható ki a megadott szemmozgást leíró paraméterek és az elvégzett koncentráció és éberség tesztek eredményei között. Így megállapítható, hogy a szemmozgás paraméterek elemzéséből, a koncentráció és éberség nagyságára közvetetten következtetni lehet. Ezt felhasználva, akár programozás folyamata során megfigyelt, a szemmozgás segítségével meghatározott paraméterek alkalmasak lehetnek a programozó koncentrációjának elemzésére, ezzel pedig a közvetetten a programozási tevékenység hatékonysága is megfigyelhető.

A 4.7.3. fejezetben ismertetett élő adat részletező modul segítségével különböző valós idejű megfigyelések valósulhatnak meg. Ennek segítségével olyan kutatásokat folytathatunk, ahol a vizuális figyelem által történő különböző ingerek hatásait lehet elemezni. A modulban megtalálható egy képernyőörögzítő funkció is, ahol az aktuális tekintési pontot is nyomon lehet követni. Ezek segítségével, a vizsgálatok elvégzése során megtudtam figyelni, hogy a résztvevők hogyan próbálták végre hajtani a végzett PEBL féle kognitív feladatokat, melyek azok a típusú változások, amelyeket nehezebben tudtak teljesíteni a teszt alanyok.

6. A kutatás korlátai

Az előző fejezetben ismertetett PEBL féle figyelem- és éberség teszt hatékonysága látható módon a személyenként tartó kísérlet időtartalmával összefügg. A Mackworth kutatása alapján [58] az éberségcsökkentést több órán át tartó kísérlet során lett egyértelműen megfigyelhető. A diákokat érő, az iskola alatt tartó terhelések vizsgálata a használt kognitív tesztekkel, megnövelt időtartammal az iskolai menetrend és időbeosztás miatt kivitelezhetetlen, továbbá a teszt alany számok csökkenése befolyásolhatja az eredményekből levonható következtetéseket, illetve azok hatását.

Edwin S. Dalmaijer az EyeTribe az EyeLink 1000 összehasonlítás eredményei alapján [59] megfigyelhető, hogy marketing és szórakozási iparon kiváló szerepet játszik az eszköz, viszont kutatás egy részére kínál elfogadható teljesítményt. Az alacsony frissítési frekvenciája miatt, a gyors szakkádok vizsgálatához, az EyeTribe csak korlátozottan alkalmazható, azonban a pupilla méret és a fixációs tulajdonságokra elenyésző különbség figyelhető meg a professzionális eszközökkel szemben. Így, az EyeTribe a figyelem- és éberségre vonatkozó kognitív tesztek követésére alkalmas, viszont a kutatásom területének bővítéséhez, amelyekben a mikro és gyors szakkádok megfigyelése is fontos szempont, professzionálisabb szemkövető eszköz alkalmazása javasolt.

7. Összefoglalás

Az előző fejezetekben ismertetve ma már számos területén használják a szemmozgáskövető eszközöket (pl.: marketing, szórakozás és kutatás), amely a dolgozatban is alkalmazásra került. Ahhoz, hogy ezeket a szemmozgás paramétereket megvizsgáljuk, egy adatfeldolgozó szoftverre is szükség van. Ugyan rendelkezésre állnak ingyenes és kereskedelmi szoftverek is, azonban az utóbbiak rendkívül költségesek, amely számomra erősen korlátozza a hozzáférés lehetőségét, az ingyenes szemmozgáskövető alkalmazások pedig ma már csak korlátozottan támogatottak. Az általam, is használt OGAMA (*Open Gaze and Mouse Analyzer*) program támogatottsága már több éve megszűnt, így az újabb kiadású tekintetkövető eszközöket nem kezeli, továbbá az alkalmazásban rejlő hibák sem kerülnek javításra. Egy lehetséges irány volt ezen paraméterek elemzésére egy saját szoftver készítése, amelynek tervezése és fejlesztése során rengeteg tapasztalatot szereztem a komplex alkalmazások kialakítása és felépítése terén. A megvalósítás során érezhetően javult a problémamegoldó képességem a szoftverfejlesztés terén, amely az implementálás nehézségekre való megoldások keresése miatt is köszönhetem. Továbbá nagy kihívást jelentett számomra egy meglévő szoftver kódjának visszafejtése, amelyből egy hiányos, rengeteg súlyos hibával – ami ellehetetleníti a kutatás folyamatát – rendelkező szoftvert tovább tudtam fejleszteni és előforduló kifagyásokat javítani, amely a kognitív tesztek végrehajtása alatt is megfelelően helyt állt.

Kutatásom során összefoglalva, az előző fejezetekben ismertetett alábbi feladatok kerültek bemutatásra vagy végrehajtásra:

- Megismerkedtem és bemutattam a mai szemmozgáskövetést megvalósító technikák lehetséges elveit;
- Továbbfejlesztettem a kutatásomban is használt EyeTribe nevezetű tekintetkövető eszközt is kezelő, saját fejlesztésű alkalmazást, ahol kalibrálást lehet elvégezni, továbbá a szemmozgási paramétereket is eltárolja;
- Az előző pontban elkészített szoftver forráskódját és a megszerzett tudást felhasználva illesztettem egy már megírt, nyílt forráskódú szoftverhez, amelyekben a következők kerültek módosításra:
 - Az előforduló, kifejezetten működést megakadályozó főbb hibák javításra kerültek;
 - Frissítettem a használt .NET keretrendszer verziószámát, amely korszerű fejlesztői modulok használatát tette lehetővé;

- Egyszerűsített projektkészítő, továbbá a kalibrálás és a rögzítés is automatizált lett;
- Többmonitoros *setup* esetén egy paramétermegfigyelő modult valósítottam meg, ahol élő nézetben lehet követni az aktuális fixációs tulajdonságokat;
- A továbbfejlesztett szemmozgáskövető szoftvert felhasználva különböző PEBL féle kognitív tesztek végeztettem el több teszt alannyal, így lehetővé vált a szemmozgás paraméterek összevetése a figyelem- és az éberséget vizsgáló tesztek eredményeivel;
- Az elkészült vizsgálatokat szemmozgás paraméterek kapcsolatában figyeltem meg és értékeltem ki, illetve vontam le a következtetéseket.
- Továbbá a fejlesztett szemmozgáskövető modulba beépítésre került egy valósídejű fixáció elemző, mely mindig az elmúlt 30 másodperc adatai alapján, mozgóátlag módszerével határozza meg a fixációs számot és fixációs frekvencia értékét és megjeleníti a képernyőn. Ez lehetőség ad a tesztalanyhoz igazodó adaptív tesztek kidolgozására is.

Az eredmények kiértékelése után következtetni lehetett arra, hogy közepes korrelációs értékekkel összefüggés figyelhető meg az éberség/koncentráció tesztek és a szemmozgást leíró paraméterek között, amelyekből következtetni lehet az éberség nagyságára és a koncentrálásra egyaránt.

A használt alkalmazásra (mint minden rendszer, szoftver esetén) további optimalizációk, javítások szükségesek. A kognitív informatikai kutatásomban nagy szerepet töltött be a tovább fejlesztett alkalmazásom, viszont jövőben az esetleges más kutatási területek kiszolgálására az alkalmazás csak korlátozottan tud lehetőséget biztosítani. Az általam továbbfejlesztett OGAMA továbbra is használ elavult modulokat, továbbá a felhasználói felületet megvalósító motor sem a mai technológiára épül. A jövőbeni cél egy olyan saját alkalmazás elkészítése, amely OGAMA szoftvert teljes mértékben kiváltja, továbbá a mai, korszerű technológiákat alkalmazza. Az alkalmazás jelenleg tervezési fázis alatt van, az implementációhoz szükséges modulok kialakítása már elkezdődött, továbbá egy felhasználó felületet reprezentáló prototípus is már rendelkezésre áll.

8. Irodalomjegyzék

- [1] R. J. K. Jacob and K. S. Karn, 'Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research', in *The Mind's Eye*, Elsevier, 2003, pp. 573–605. doi: [10.1016/B978-044451020-4/50031-1](https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1).
- [2] E. D. Guestrin and M. Eizenman, 'General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections', *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, no. 6, pp. 1124–1133, Jun. 2006, doi: [10.1109/TBME.2005.863952](https://doi.org/10.1109/TBME.2005.863952)
- [3] Gegenfurtner, Karl R. „The Interaction Between Vision and Eye Movements”. *Perception* 45, sz. 12 (2016. december): 1333–57. <https://doi.org/10.1177/0301006616657097>.
- [4] J. M. Henderson and A. Hollingworth, 'Eye Movements During Scene Viewing', in *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*, Elsevier, 1998, pp. 269–293. doi: [10.1016/B978-008043361-5/50013-4](https://doi.org/10.1016/B978-008043361-5/50013-4).
- [5] M. Burch, *Eye tracking and visual analytics*. Aalborg: River Publishers, 2021.
- [6] M. Wedel and R. Pieters, 'A Review of Eye-Tracking Research in Marketing', in *Review of Marketing Research*, vol. 4, N. K. Malhotra, Ed. Emerald Group Publishing Limited, 2008, pp. 123–147. doi: [10.1108/S1548-6435\(2008\)0000004009](https://doi.org/10.1108/S1548-6435(2008)0000004009)
- [7] S. Białowas and A. Szyszka, 'Eye-tracking in Marketing Research', in *Managing Economic Innovations – Methods and Instruments*, R. Romanowski, Ed. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 2019, pp. 91–104. doi: [10.12657/9788379862771-6](https://doi.org/10.12657/9788379862771-6)
- [8] D. Graziotin, X. Wang, and P. Abrahamsson, 'Happy software developers solve problems better: psychological measurements in empirical software engineering', *PeerJ*, vol. 2, p. e289, Mar. 2014, doi: [10.7717/peerj.289](https://doi.org/10.7717/peerj.289)
- [9] J.-M. Hoc and European Association of Cognitive Ergonomics, Eds., *Psychology of programming*. London: Academic, 1990
- [10] H. Barajas M, *Atlas Of The Human Eye: Anatomy & Biometrics*. Palibrio, 2015.
- [11] J. Sobotta, R. Putz, R. Pabst, and R. Putz, Eds., *Az ember anatómiájának atlasza*. Budapest: Med. Könyvk. Zrt, 2007
- [12] W. F. Ganong, Ádám Veronika, Olgyay Gézané, and Zeikfalvy Lenke, *Az orvosi élettan alapjai*, 2. kiad. Budapest: Medicina, 1994
- [13] R. Manotosh and V. Koh, Eds., *Essentials of ophthalmology: for medical school and beyond*. New Jersey: World Scientific, 2019
- [14] B. Cassin, S. Solomon, and M. L. Rubin, *Dictionary of eye terminology*, 2nd ed. Gainesville, Fla: Triad Pub. Co, 1990
- [15] R. Andersen, 'How we see', *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 23, no. 8, pp. 4–9, Aug. 2008, doi: [10.1109/MAES.2008.4607795](https://doi.org/10.1109/MAES.2008.4607795)
- [16] S. Mathôt, 'Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function', *Journal of Cognition*, vol. 1, no. 1, p. 16, Feb. 2018, doi: [10.5334/joc.18](https://doi.org/10.5334/joc.18)
- [17] M. H. Beers and A. J. Fletcher, Eds., *The Merck manual of medical information*, 2nd home ed., [All new & Completely rev.]. Whitehouse Station, NJ: Merck Research Laboratories, 2003
- [18] Uniwersytet Warszawski és A. Andrychowicz-Trojanowska, „Basic terminology of eye-tracking research”, *ALP*, köt. 2/2018, sz. 25, Art. sz. 25, jún. 2018, doi: [10.32612/uw.25449354.2018.2.pp.123-132](https://doi.org/10.32612/uw.25449354.2018.2.pp.123-132).

- [19] D. D. Salvucci és J. H. Goldberg, „Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols”, in *Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications - ETRA '00*, Palm Beach Gardens, Florida, United States, 2000, o. 71–78. doi: [10.1145/355017.355028](https://doi.org/10.1145/355017.355028).
- [20] A. T. Duchowski, *Eye tracking methodology: theory and practice*, 2nd ed. London: Springer, 2007.
- [21] L.-R. Derick, G.-S. Gabriel, L.-S. Maximo, F.-D. Olivia, C.-S. Noe, and O.-R. Juan, ‘Study of the User’s Eye Tracking to Analyze the Blinking Behavior While Playing a Video Game to Identify Cognitive Load Levels’, in *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, Nov. 2020, pp. 1–5. doi: [10.1109/ROPEC50909.2020.9258693](https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258693).
- [22] Brunyé, Tad T., és Aaron L. Gardony. „Eye Tracking Measures of Uncertainty during Perceptual Decision Making”. *International Journal of Psychophysiology* 120 (2017. október): 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.07.008>.
- [23] S. Ahern and J. Beatty, ‘Pupillary Responses During Information Processing Vary with Scholastic Aptitude Test Scores’, *Science*, vol. 205, no. 4412, pp. 1289–1292, Sep. 1979, doi: [10.1126/science.472746](https://doi.org/10.1126/science.472746)
- [24] Brunyé, Tad T., és Aaron L. Gardony. „Eye Tracking Measures of Uncertainty during Perceptual Decision Making”. *International Journal of Psychophysiology* 120 (2017. október): 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.07.008>.
- [25] J. Simko és M. Bielikova, „Gaze-tracked crowdsourcing”, in *2015 10th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP)*, Trento, Italy, nov. 2015, o. 1–5. doi: [10.1109/SMAP.2015.7370084](https://doi.org/10.1109/SMAP.2015.7370084).
- [26] M. A. Just and P. A. Carpenter, ‘A theory of reading: From eye fixations to comprehension.’, *Psychological Review*, vol. 87, no. 4, pp. 329–354, 1980, doi: [10.1037/0033-295X.87.4.329](https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329).
- [27] M. A. Just and P. A. Carpenter, ‘Eye fixations and cognitive processes’, *Cognitive Psychology*, vol. 8, no. 4, pp. 441–480, Oct. 1976, doi: [10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3).
- [28] M. A. Just, P. A. Carpenter, and A. Miyake, ‘Neuroindices of cognitive workload: Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work’, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 4, no. 1–2, pp. 56–88, Jan. 2003, doi: [10.1080/14639220210159735](https://doi.org/10.1080/14639220210159735).
- [29] M. Bassok, ‘Transfer of domain-specific problem-solving procedures.’, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 16, no. 3, pp. 522–533, May 1990, doi: [10.1037/0278-7393.16.3.522](https://doi.org/10.1037/0278-7393.16.3.522).
- [30] H. Schultheis and A. Jameson, ‘Assessing Cognitive Load in Adaptive Hypermedia Systems: Physiological and Behavioral Methods’, in *Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-Based Systems*, vol. 3137, P. M. E. De Bra and W. Nejdl, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 225–234. doi: [10.1007/978-3-540-27780-4_26](https://doi.org/10.1007/978-3-540-27780-4_26).
- [31] M. A. Just, P. A. Carpenter, and A. Miyake, ‘Neuroindices of cognitive workload: Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work’, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 4, no. 1–2, pp. 56–88, Jan. 2003, doi: [10.1080/14639220210159735](https://doi.org/10.1080/14639220210159735).
- [32] S. Ahern and J. Beatty, ‘Pupillary Responses During Information Processing Vary with Scholastic Aptitude Test Scores’, *Science*, vol. 205, no. 4412, pp. 1289–1292, Sep. 1979, doi: [10.1126/science.472746](https://doi.org/10.1126/science.472746).
- [33] S. Mathôt, ‘Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function’, *Journal of Cognition*, vol. 1, no. 1, p. 16, Feb. 2018, doi: [10.5334/joc.18](https://doi.org/10.5334/joc.18).

- [34] Uniwersytet Warszawski and M. Płużyczka, 'The First Hundred Years: a History of Eye Tracking as a Research Method', *ALP*, vol. 4/2018, no. 25, pp. 101–116, Dec. 2018, doi: [10.32612/uw.25449354.2018.4.pp.101-116](https://doi.org/10.32612/uw.25449354.2018.4.pp.101-116).
- [35] Q. Ji and Z. Zhu, 'Eye and gaze tracking for interactive graphic display', in *Proceedings of the 2nd international symposium on Smart graphics - SMARTGRAPH '02*, Hawthorne, New York, 2002, pp. 79–85. doi: [10.1145/569005.569017](https://doi.org/10.1145/569005.569017).
- [36] E. D. Guestrin and M. Eizenman, 'General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections', *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, no. 6, pp. 1124–1133, Jun. 2006, doi: [10.1109/TBME.2005.863952](https://doi.org/10.1109/TBME.2005.863952).
- [37] Z. Li, P. Guo, and C. Song, 'A Review of Main Eye Movement Tracking Methods', *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1802, no. 4, p. 042066, Mar. 2021, doi: [10.1088/1742-6596/1802/4/042066](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1802/4/042066).
- [38] G. Johansson and F. Backlund, 'A VERSATILE EYE-MOVEMENT RECORDER', *Scand J Psychol*, vol. 1, no. 1, pp. 181–186, Mar. 1960, doi: [10.1111/j.1467-9450.1960.tb01298.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1960.tb01298.x).
- [39] R. Liu, S. Jin, and X. Wu, 'Single Camera Remote Eye Gaze Tracking Under Natural Head Movements', in *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, vol. 4282, Z. Pan, A. Cheok, M. Haller, R. W. H. Lau, H. Saito, and R. Liang, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 614–623. doi: [10.1007/11941354_63](https://doi.org/10.1007/11941354_63).
- [40] C. H. Morimoto, D. Koons, A. Amir, and M. Flickner, 'Pupil detection and tracking using multiple light sources', *Image and Vision Computing*, vol. 18, no. 4, pp. 331–335, Mar. 2000, doi: [10.1016/S0262-8856\(99\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(99)00053-0).
- [41] J. D. Smith and T. C. N. Graham, 'Use of eye movements for video game control', in *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology - ACE '06*, Hollywood, California, 2006, p. 20. doi: [10.1145/1178823.1178847](https://doi.org/10.1145/1178823.1178847).
- [42] P. Majaranta and A. Bulling, 'Eye Tracking and Eye-Based Human–Computer Interaction', in *Advances in Physiological Computing*, S. H. Fairclough and K. Gilleade, Eds. London: Springer London, 2014, pp. 39–65. doi: [10.1007/978-1-4471-6392-3_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6392-3_3).
- [43] Y. Ebisawa and S. -i. Satoh, 'Effectiveness of pupil area detection technique using two light sources and image difference method', in *Proceedings of the 15th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Diego, CA, 1993, pp. 1268–1269. doi: [10.1109/IEMBS.1993.979129](https://doi.org/10.1109/IEMBS.1993.979129).
- [44] Q. Ji and Z. Zhu, 'Eye and gaze tracking for interactive graphic display', in *Proceedings of the 2nd international symposium on Smart graphics - SMARTGRAPH '02*, Hawthorne, New York, 2002, pp. 79–85. doi: [10.1145/569005.569017](https://doi.org/10.1145/569005.569017).
- [45] Y. Ebisawa, 'Improved video-based eye-gaze detection method', *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 4, pp. 948–955, Aug. 1998, doi: [10.1109/19.744648](https://doi.org/10.1109/19.744648).
- [46] M. Okano és M. Asakawa, 'Eye tracking analysis of consumer's attention to the product message of web advertisements and TV commercials', in *2017 5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, Denpasar, Bali, Indonesia, aug. 2017, o. 1–5. doi: [10.1109/CITSM.2017.8089270](https://doi.org/10.1109/CITSM.2017.8089270).
- [47] M. Nilsson Benfatto, G. Öqvist Seimyr, J. Ygge, T. Pansell, A. Rydberg, és C. Jacobson, 'Screening for Dyslexia Using Eye Tracking during Reading', *PLoS ONE*, köt. 11, sz. 12, o. e0165508, dec. 2016, doi: [10.1371/journal.pone.0165508](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165508).
- [48] L. Rello és M. Ballesteros, 'Detecting readers with dyslexia using machine learning with eye tracking measures', in *Proceedings of the 12th International Web for All Conference*, Florence Italy, máj. 2015, o. 1–8. doi: [10.1145/2745555.2746644](https://doi.org/10.1145/2745555.2746644).

- [49] S. Marino és mtsai., „Quantitative Analysis of Pursuit Ocular Movements in Parkinson’s Disease by Using a Video-Based Eye Tracking System”, *Eur Neurol*, köt. 58, sz. 4, o. 193–197, 2007, doi: [10.1159/000107939](https://doi.org/10.1159/000107939).
- [50] S. Stuart, L. Alcock, A. Godfrey, S. Lord, L. Rochester, és B. Galna, „Accuracy and re-test reliability of mobile eye-tracking in Parkinson’s disease and older adults”, *Medical Engineering & Physics*, köt. 38, sz. 3, o. 308–315, márc. 2016, doi: [10.1016/j.medengphy.2015.12.001](https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.12.001).
- [51] Z. Liu, Z. Yang, Y. Gu, H. Liu, és P. Wang, „The effectiveness of eye tracking in the diagnosis of cognitive disorders: A systematic review and meta-analysis”, *PLoS ONE*, köt. 16, sz. 7, o. e0254059, júl. 2021, doi: [10.1371/journal.pone.0254059](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254059).
- [52] J. Crawford, A. Devereaux, S. Higham, és C. Kelly, „The disengagement of visual attention in Alzheimer’s disease: a longitudinal eye-tracking study”, *Front. Aging Neurosci.*, köt. 7, jún. 2015, doi: [10.3389/fnagi.2015.00118](https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00118).
- [53] V. Yaneva, L. A. Ha, S. Eraslan, Y. Yesilada, és R. Mitkov, „Detecting High-Functioning Autism in Adults Using Eye Tracking and Machine Learning”, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, köt. 28, sz. 6, o. 1254–1261, jún. 2020, doi: [10.1109/TNSRE.2020.2991675](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2991675).
- [54] J. Katona és mtsai., „Using Eye- Tracking to Examine Query Syntax and Method Syntax Comprehension in LINQ”, in *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, Mariehamn, Finland, szept. 2020, o. 000437–000444. doi: [10.1109/CogInfoCom50765.2020.9237910](https://doi.org/10.1109/CogInfoCom50765.2020.9237910).
- [55] learn.microsoft.com, „Query Syntax and Method Syntax in LINQ (C#)”, 2021. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/linq/query-syntax-and-method-syntax-in-linq>
- [56] learn.microsoft.com, „Language Integrated Query (LINQ) (C#)”, 2022. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/concepts/linq/>
- [57] Evinger, C., K. A. Manning, és P. A. Sibony. „Eyelid Movements. Mechanisms and Normal Data”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 32, sz. 2 (1991. február): 387–400.
- [58] N. H. Mackworth, ‘The Breakdown of Vigilance during Prolonged Visual Search’, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 1, no. 1, pp. 6–21, Apr. 1948, doi: [10.1080/17470214808416738](https://doi.org/10.1080/17470214808416738).
- [59] E. Dalmaijer, ‘Is the low-cost EyeTribe eye tracker any good for research?’, PeerJ PrePrints, preprint, Nov. 2014. doi: [10.7287/peerj.preprints.585v1](https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.585v1).

9. Mellékletek

1. sz. melléklet

Gaze Point 3 (GP3) szemmozgáskövető kamera

Forrás: <https://www.medicalexpo.com/prod/gazepoint/product-125321-917955.html>



2. sz. melléklet

Smart Eye Aurora szemmozgáskövető kamera

Forrás: <https://imotions.com/hardware/smart-eye-aurora/>



3. sz. melléklet

Tobii Eye X szemmozgáskövető kamera

Forrás: <https://tobii.com>



4. sz. melléklet

Eye Link 1000 Plus szemmozgáskövető kamera

Forrás: <https://www.sr-research.com/eyelink-1000-plus/>



5. sz. melléklet

Argus Science Eye ETVision szemmozgáskövető szemüveg

Forrás: <https://www.brainlatam.com/blog/eye-tracking-etvision-180hz-binocular-glasses-launched-645>.



6. sz. melléklet

Eye Link II szemmozgáskövető szemüveg

Forrás: <https://www.sr-research.com/eyelink-ii/>

