

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Képkalkuló rendszerek aberrációinak hatékony
szimulációját támogató algoritmusok és
szoftverek fejlesztése**

Csoba István

Témavezető: Dr. Kunkli Roland Imre



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2024.

Tartalomjegyzék

1. Szakmai előzmények és motiváció	1
2. Az értekezés fő eredményei	3
2.1. Vizuális aberrációkkal terhelt emberi látás valósídejű, személyreszabható szimulációja	3
2.1.1. Fizikai szemstruktúra és vizuális aberrációk hatékony becslése	3
2.1.2. A szem pontszórásfüggvényeinek gyors előállítása	7
2.1.3. Látásszimuláció valósídejű rendszerekben	9
2.2. Kamerarendszerek lencsefénytjainak szimulációja	12
Irodalomjegyzék	15
Publikációs lista	18
3 Previous work and motivation	23
4 New scientific results of the thesis	25
4.1 Personalized, real-time simulation of aberrated human vision	25
4.1.1 Efficient estimation of the physical eye structure and visual aberrations	25
4.1.2 Fast computation of point-spread functions	29
4.1.3 Real-time human vision simulation	31
4.2 Simulating the lens flares of camera systems	34
References	37
List of publications	40

1. Szakmai előzmények és motiváció

A képkotó rendszerek által készített felvételek számítógépes szintézise a komputergrafika területének hangsúlyos és széles körben kutatott problémáját képezi. Ezen rendszerek csoportjának meghatározó eleme az emberi szem, amely képkotó mechanizmusának optikai szimulációja kulcsfontosságú számtalan magas relevanciájú feladat elvégzéséhez [1].

A vizuális aberrációkkal terhelt emberi látást reprodukáló képszintézisre számos megközelítés elérhető a szakirodalomban [1]. Ezek a módszerek azonban jellemzően csak sematikus szemmodelleket alkalmaznak, az egyén szemstruktúráját teljes mértékben figyelmen kívül hagyva. A személyreszabhatóság növelésének egy lehetséges módja a speciális szemmodellek alkalmazása [2, 3], ám ezek a modellek szignifikánsan megnövelik a szemstruktúrabecslő folyamat nehézségét és számítási idejét. A szimuláció testreszabhatóságának másik fő módja a fizikai szemstruktúra mérési adatok alapján történő becslése [4, 5]. Ezek az eljárások azonban körülményes és időigényes klinikai mérések elvégzésén alapszanak, nagymértékben csökkentve a becslés pontosságát és megbízhatóságát. Mindezen problémák okán kutatásunk egyik fő célja egy olyan módszer megalkotása volt, amellyel a szimulált látáshoz tartozó emberi szem fizikai struktúrája minimális bemeneti adatból interaktívan megbecsülhető.

A képkotó rendszerek vizsgálatának egyik kulcsfontosságú eszköze a pontszórásfüggvény, amely a rendszer által egy ideális pontszerű fényforráshoz generált diffrakciós mintázatként definiálható. Az emberi szem pontszórásfüggvényeinek kiszámítására a gyakorlatban jellemzően a gyors Fourier-transzformációt [6] vagy a kiterjesztett Nijboer–Zernike-féle módszert [7] alkalmazzák. Bár ezek a módszerek képesek megfelelő pontosságú kimenetek előállítására, futási idejük nem alkalmas a látás szimulációjához szükséges nagyszámú pontszórásfüggvény gyors kiszámítására. Emiatt célunk volt a látásszimulációhoz szükséges pontszórásfüggvények előállítási idejének csökkentése.

Az aberrációkkal terhelt emberi látáshoz hű képszintézist a szakirodalomban elérhető módszerek jellemzően sugárkövetéssel vagy a szem pontszórásfüggvényeivel végzett konvolúcióval valósítják meg [1]. A létező el-

járások számítási ideje a szem optikai jellemzői miatt messze túllépi a valósídejű rendszerek számára alkalmas küszöböt. Továbbá az interaktivitást lehetővé tevő gyorsítási módszerek olyan egyszerűsítéseken alapszanak, amelyek nagymértékben redukálják a szimulálható vizuális aberrációk típusát és csökkentik a szimuláció minőségét. Ezenkívül a periférikus látás helyes szimulációja is hangsúlyos és a létező megközelítések által gyakran figyelmen kívül hagyott probléma, amit a valósídejű szimulációra alkalmas eljárások jellemzően nem képesek megfelelően kezelni. Kutatásunk kiemelt célja volt egy olyan módszer megalkotása, amellyel az emberi szem optikai képkötő mechanizmusa valós időben, tetszőleges vizuális aberráció és a periférikus látás figyelembevételével szimulálható.

Az emberi látáson kívül a kamerarendszerek sajátosságainak szimulációja is szorosan kapcsolódik a képkötő rendszerek területéhez. A kamerával kapcsolatos jelenségek között hangsúlyos szerepe van a magas intenzitású fényforrások által generált lencsefényfoltoknak. Ezek a fényfoltok kardinális elemei a fotográfia és a cinematográfia eszköztárának [8] és nagymértékben hozzájárulnak a szintetikus képek valószerűségéhez is [9]. Keletkezésüket tekintve a lencsefényfoltok a kamera rekesznyílása által okozott diffrakció és a kameraobjektív lencséről visszaverődő fénysugarak eredményei. A jelenség komplex fizikai jellemzői miatt a lencsefényfoltok tervezése és hiteles szimulációja jelentős implementációs költségekkel, magas szintű optikai ismeretekkel, valamint hosszadalmas tervezési és előfeldolgozási procedúrákkal jár. Munkánk további célkitűzését a lencsefényfolt-szimulációs módszerek valósídejű rendszerekbe történő integrációjának megkönnyítése képezte.

A kamerarendszerek lencsefényfoltjainak hatékony szimulációját a gyakorlatban jellemzően Hullin és mtsai. ritka sugárrácsokon alapuló módszere [10] alapján valósítják meg [8]. Az algoritmus egyik hangsúlyos problémája a megfelelő minőséghez szükséges előfeldolgozási szakasz számítási ideje, mely lépés kihagyása a szimuláció pontosságának drámai csökkenéséhez vezet. Ennek köszönhetően a szóban forgó megközelítést alkalmazó rendszerek számára a lencsefényfoltok megjelenésének tervezése szükségtelenül hosszadalmassá válik. Kutatómunkánkkal egy olyan módszer megalkotására is törekedtünk, amellyel a szimuláció hatékony személyreszabhatóságának érdekében a szóban forgó algoritmus paraméterezése interaktívan elvégezhető.

2. Az értekezés fő eredményei

2.1. Vizuális aberrációkkal terhelt emberi látás valósidejű, személyreszabható szimulációja

2.1.1. Fizikai szemstruktúra és vizuális aberrációk hatékony becslése

A szakirodalomban fellelhető látásszimuláló eljárások tipikusan sematikus szemmodelleket alkalmaznak, az egyén szemének fizikai jellemzőit teljes mértékben figyelmen kívül hagyva [1].

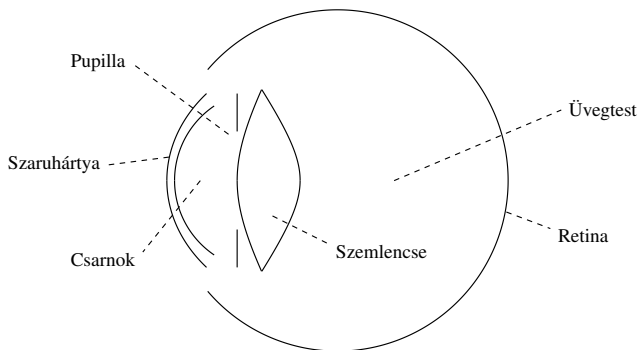
1. tézis

Az emberi látás személyreszabható szimulációjához létrehoztunk egy saját paraméteres szemmodellt, valamint eljárásokat készítettünk a szemmodell vizuális aberrációinak meghatározására, a modell fókusz távolságának módosítására, illetve a szimulált szem fizikai struktúrájához tartozó modellparaméterek becslésére. Ezenfelül létrehoztunk egy neurális hálót alkalmazó megközelítést is, amellyel mindezen feladatok alacsony hibával és teljesen interaktív módon elvégezhetők.

Kapcsolódó publikációk: [11, 12]

Saját, az emberi szem fizikai struktúrájának becslését lehetővé tevő módszerünk legfőbb tulajdonságai és eredményei a következők:

- Saját paraméterezhető szemmodellünket (lásd 2.1. ábra) Navarro aszférikus modelljének kiterjesztésével hoztuk létre. Ehhez eltolási, forgatási és billenési paraméterekkel, valamint egy egyedi, nagymértékben testreszabható szaruhártya-felülettel bővítettük ki a modellt.
- Szemmodellünk paraméterezhető, egyedi elemeinek köszönhetően pedig a szemállapotok széles tere reprodukálható.
- Az emberi szem fókuszáló mechanizmusának és a hullámfrontszenzorok működési elvének figyelembevételével saját algoritmusokat al-



2.1. ábra. Paraméteres szemmodellünk sematikus rajza.

	Paraméter	Mértékegység		Paraméter	Mértékegység
Szem	T	mm	Csarnok	T	mm
Szaruhártya	T	mm	Lencse	D	mm
	R^A, R^P	mm		V	mm ³
	k^A, k^P			k^A, k^P	
	Φ^A, Φ^P	deg		Δ	mm
	Z_{1-6}^A	mm		α	deg

2.1. táblázat. Szemmodellünk főbb paramétereit. A legfőbb paramétertípusok a vastagság (két szomszédos fénytörő felület közötti távolság, T), az átmérő (D), a térfogat (V), a görbületi sugár (R), a kónikus konstans (k), az ofszetfelület n -edfokú Zernike együtthatói (Z_n), a decentralizáció (Δ), a dőlés (α), valamint az optikai tengely körüli forgatás (Φ). A szaruhártya és a szemlencse esetén a felső index utal a komponens külső (A) és belső (P) felületét reprezentáló elemre.

kottunk meg a szemmodellünk fókusz távolságának módosítására és a modell hullámaberrációinak meghatározására.

- Szemmodellünk paramétereire (lásd 2.1. táblázat) leíró statisztikákat és paramétertartományokat állapítottunk meg a szakirodalomban fellelhető populációs adatok alapján.
- A szimulált szem fizikai struktúráját becsülő modellparamétereket optimalizációval határoztuk meg, lehetővé téve a folyamat teljesen testreszabható, nyílt forrású eszközökre támaszkodó elvégzését.
- Szemparaméter-becslő módszerünk bemenetét pusztán a szem rela-

xált állapotához tartozó aberrációs adatok képezik. Ily módon a létező módszerekre jellemző, költséges klinikai eszközökkel végzett hosszadalmas és pontatlan mérések problémája elkerülhető [4, 5].

- A szemparaméter-becslő folyamathoz mintakereséses optimalizációt és az alábbi, általunk definiált veszteségfüggvényt alkalmaztuk:

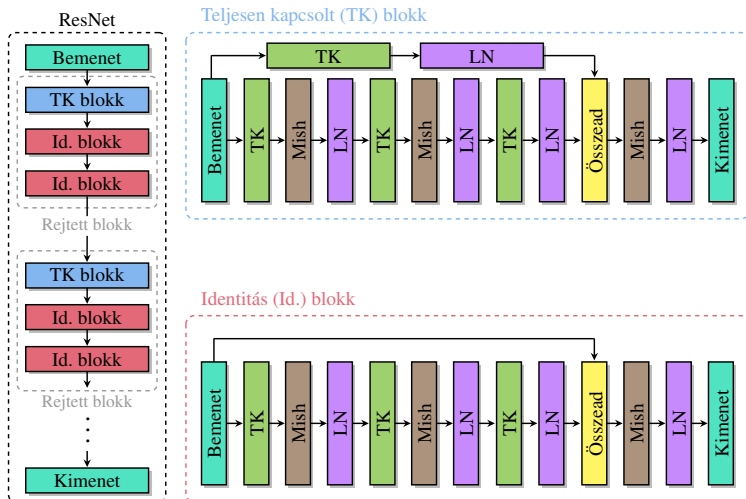
$$L = \sum_k (w_f f_k |\hat{\alpha}_k - \alpha_k|)^2 + \sum_l (w_a a_l \max(|\bar{x}_l - x_l| - \sigma_l, 0))^2,$$

ahol α_k és $\hat{\alpha}_k$ a k -adik bemeneti és generált aberrációs együttható, f_k az együttható súlya, x_l , \bar{x}_l és σ_l az l -edik modellparaméter értéke, populációs átlaga és szórása, a_l a modellparaméter súlya, w_a és w_f pedig az anatómiai és a funkcionális tényező konfigurálható súlya.

- Szemmodellünk paramétereinek kis darabszáma miatt a modellhez definiált műveletek hatékonyan elvégezhetőek, elkerülve a szakirodalomban látásszimulációra használt modellek főbb hátrányait [2, 3].
- Megvizsgáltuk a szemstruktúrabecsülő eljárásunk pontosságát hat eltérő szemállapotra. Méréseink alapján megállapítható, hogy a paraméteres szemmodellünk és a paraméterbecslő megközelítésünk képesek a bemeneti szem felépítésének hiteles becslésére.

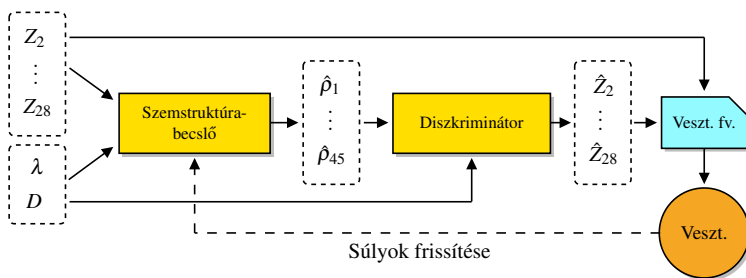
Továbbá a szemmodellünket érintő feladatok interaktív elvégzésére megalkotott módszerünk tulajdonságai és eredményei a következők:

- Szemmodellünk aberrációinak, a szimulált szemet modellező paramétereinek, valamint fókuszált paramétereinek becslésére saját neurális hálókat hoztunk létre. Hálóinkkal mindezen feladatok egy másodpercnél rövidebb idő alatt elvégezhetőek.
- A reziduális neurális háló (ResNet) architektúra módosításával megalkottunk egy saját architektúrát (lásd 2.2. ábra), melynek alkalmazásával hálóink magas pontosságot érnek el.
- Szemmodellünk sugárkövetéses és optimalizációs eljárásaival saját tanító adathalmazokat hoztunk létre hálózatainkhoz.
- Elvégeztük az általunk létrehozott tanítóadatok statisztikai jellemzőinek vizsgálatát.



2.2. ábra. Az általunk javasolt, módosított ResNet neurális háló architektúra.

- A szemmodellünk paramétereit becsülő hálózatunk tanítására megalkottunk egy diszkriminátoralapú tanítási folyamatot (lásd 2.3. ábra), és demonstráltuk, hogy az így betanított hálózat pontossága egy nagyságrenddel magasabb a naív megközelítésénél.



2.3. ábra. A szemstruktúrabecsülő hálózatunkhoz megalkotott diszkriminátoralapú tanítási módszerünk egy tanítási lépése.

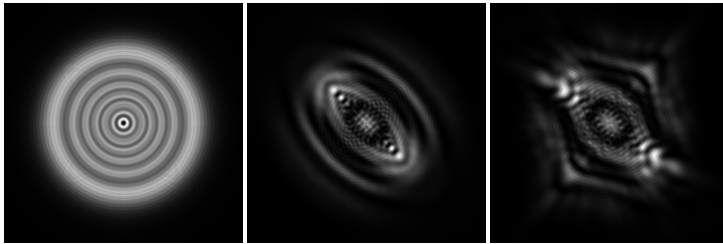
- Összehasonlítottuk az általunk javasolt architektúrát és tanítási módszert az előrecsatolt hálóval, az eredeti ResNet architektúrával, illetve

a naív tanítási módszerrel. Eredményeink alapján elmondható, hogy módszereink kardinálisak a megfelelő tanítási pontosság eléréséhez.

- Megvizsgáltuk új módszerünk pontosságát és sebességét a sugárkövetést és az optimalizációt alkalmazó módszereinkkel szemben. Méréseink alapján kijelenthető, hogy a neurális hálóink képesek a referenciamódszerek eredményét valós időben pontosan közelíteni.

2.1.2. A szem pontszórásfüggvényeinek gyors előállítás

Az emberi látást szimuláló módszerek gyakran az emberi szem pontszórásfüggvényeivel (lásd 2.4. ábra) végzett konvolúcióra épülnek [1]. A pontszórásfüggvények kiszámítására a gyakorlatban tipikusan a gyors Fourier-transzformációt [6] vagy a kiterjesztett Nijboer–Zernike-féle módszert [7] alkalmazzák. Ezek a megközelítések azonban nem képesek hatékonyan előállítani a szimulációhoz szükséges nagyszámú pontszórásfüggvényt a megfelelő pontosság elérése mellett.



2.4. ábra. Az emberi szem három, a saját GPU-alapú módszerünkkel kiszámított pontszórásfüggvénye.

2. tézis

Létrehoztunk egy olyan módszert, amellyel az emberi szem nagy elemszámú pontszórásfüggvény-halmazait hatékonyan, GPU-alapon kiszámíthatók, a ritka pontszórásfüggvényrácsokon alapuló látásszimuláló algoritmusok bemenetei pedig interaktív módon előállíthatók.

Kapcsolódó publikáció: [13]

Saját, az emberi szem pontszórásfüggvényeinek kiszámítására létrehozott módszerünk legfőbb tulajdonságai és az ily módon elért legfontosabb eredményeink a következők:

- Módszerünk a kiterjesztett Nijboer–Zernike-féle módszerre épül, amely a pontszórásfüggvényt a következő módon definiálja [14]:

$$U(r, \phi, f) = 2 \sum_{n,m} \beta_n^m i^{|m|} V_n^{|m|}(r, f) \exp\{im\phi\},$$

ahol (r, ϕ) polárkoordináták a képsíkban, f a defókuszparaméter, a V_n^m függvények a radiális Zernike-polinomok integráljai, a β_n^m értékek pedig a komplex kifejtési együtthatók.

- Saját megközelítésünk a V_n^m függvény skalárdiffrakciós approximációjának [15] az alábbi, általunk javasolt felbontásán alapul:

$$\begin{aligned} V_n^m(r, f) &= \sum_{k=0}^K \hat{J}_k(f) \hat{J}_k^{nm}(r), \\ \hat{J}_k(f) &= (2k+1) \exp\left(\frac{if}{2}\right) i^k j_k\left(\frac{f}{2}\right), \\ \hat{J}_k^{nm}(r) &= \sum_{l=\max(0, k-q, p-k)}^{k+p} (-1)^l w_{kl} \frac{J_{m+2l+1}(2\pi r)}{2\pi r}, \end{aligned}$$

ahol J_k és j_k az elsőfajú Bessel-függvény és a gömbi Bessel-függvény, $p = \frac{1}{2}(n-m)$, $q = \frac{1}{2}(n+m)$, a w_{kl} együtthatók a radiális Zernike-polinomok a [15] cikk (27) egyenlete által definiált szorzatai, K pedig konfigurálható paraméter.

- Algoritmusunk az alábbi fő lépésekből épül fel:
 1. A Bessel-függvények és a w_{kl} tagok kiértékelése minden szükséges foksám esetén (CPU-n).
 2. $\hat{J}_k^{nm}(r)$ értékek kiszámítása minden foksámra és r mintapontra (GPU-n).
 3. $\hat{J}_k(f)$ kiértékelése minden k foksám és a pontszórásfüggvények f paramétereinek esetén (CPU-n).

4. A pontszórásfüggvényeket egyesével feldolgozva, a $V_n^m(r, f)$ mintapontok kiértékelése minden fokszámmra és r paraméterre, majd az $U(r, \phi, f)$ mintáinak kiértékelése (GPU-n).
- Az általunk javasolt felbontással a $\hat{J}_k^m(r)$ értékek előszámíthatóak és újrafelhasználhatóak. Ily módon a pontszórásfüggvények előállításához szükséges műveletek száma nagymértékben csökkenthető.
 - Módszerünket a CPU-alapú megközelítéssel összehasonlítva belátható, hogy eljárásunk nagyságrendekkel lecsökkenti az emberi szem nagy elemszámú pontszórásfüggvény-halmazainak előállítási idejét.
 - Méréseink alapján elmondható, hogy eredményeink eléréséhez a komponensek előszámítását és párhuzamos kiértékelését lehetővé tevő felbontásunk elengedhetetlen volt.
 - Mérési eredményeinkből az is belátható, hogy GPU-alapú módszerünk képes másodpercek alatt előállítani a pontszórásfüggvények ritka rácsát alkalmazó látásszimuláló algoritmusok bemenetét.

2.1.3. Látásszimuláció valós idejű rendszerekben

A szakirodalomban elérhető, valós idejű látásszimuláló módszerek nem képesek tetszőleges vizuális aberráció szimulációjára, és jellemzően leszűkítik a szimulált aberrációk terét az optikai tengely pontjaira [1].

3. tézis

Elkészítettünk egy komplex fázorokkal végzett szeparábilis konvolúción alapuló eljárást, amellyel az emberi szem alacsonyrendű aberrációkat tartalmazó pontszórásfüggvényei hatékonyan közelíthetők, a látás pedig valós időben szimulálható. Ezenfelül létrehoztunk egy csempézett konvolúciót és az emberi szem pontszórásfüggvényeinek képpontonkénti, GPU-alapú interpolációját alkalmazó módszert is, amellyel a szem tetszőleges vizuális aberrációja és a periférikus látás valós időben szimulálható, a folytonos pontszórásfüggvény pedig magas pontossággal közelíthető.

Kapcsolódó publikációk: [11, 12, 16]

Miópia



Asztigmia



2.5. ábra. Komplex fázoros látásszimuláló algoritmusunk kimenete két eltérő szem-állapot és tesztt jelenet esetén.

Saját, komplex fázorokat alkalmazó látásszimuláló módszerünk (lásd 2.5. ábra) az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

- Algoritmusunk lehetővé teszi az emberi szem alacsonyrendű vizuális aberrációinak valósidejű szimulációját.
- Módszerünk kevés bemeneti adatot használ és csak a látást korrigáló szemüveg paramétereit alkalmazza a szimulált szem leírására.
- Saját megközelítésünk komplex fázorokkal közelíti a szem valós pontszórásfüggvényeiből képzett konvolúciós magfüggvényeket.
- A pontszórásfüggvény pontosabb közelítésére eljárásunk egy saját elliptikus mintavételezést alkalmaz a konvolúció során, amelynek paramétereit egy, a pontszórásfüggvényre illesztett ellipszis segítségével határozza meg.
- Algoritmusunk rövid előfeldolgozást igényel, a szimulált látás magfüggvényeinek képpontonkénti méretét a mélységfüggő pontszórásfüggvények ritkán mintavételezett rácsából állítja elő.
- A valós pontszórásfüggvényekkel készített szimulációkhoz viszonyítva elmondható, hogy az általunk javasolt komplex fázoros konvolúció pontosabban közelíti a szem pontszórásfüggvényeit, mint a szakirodalomban tipikusan alkalmazott Gauss-függvény.

Ezenfelül a csempézett konvolúcióra épülő látásszimuláló eljárásunk (lásd 2.6. ábra) legfőbb tulajdonságai a következők:



2.6. ábra. Csempézett konvolúción alapuló látásszimuláló algoritmusunk kimenetei két eltérő szemállapot és tesztjelenet esetén.

- Módszerünk képes az emberi szem tetszőleges vizuális aberrációjának és periférikus látásának valószerű szimulációjára.
- Eljárásunk bemenetként a szem relaxált állapotához tartozó aberrációs adatokat alkalmazza.
- A valós pontszórásfüggvényen alapuló, képpontonként változó magfüggvényű konvolúció hatékony elvégzésére módszerünk csempézett konvolúciót és egy saját, GPU-alapú technikát alkalmaz a ritka pontszórásfüggvényrác képpontonkénti valószerű interpolációjára.
- Módszerünk képes a szimulált szem pupillaátmérőjének és fókusztávolságának futás közbeni módosítására. Mindez a ritka pontszórásfüggvényrác megfelelő mintavételezésével és egy képkockánként felépített gyorsítóval hatékonyan megvalósítható.
- Saját módszerünk kimeneteit összehasonlítottuk olyan referenciaszimulációkkal, amelyeket a folytonos pontszórásfüggvényeket alkalmazó konvolúcióval készítettünk.
- Méréseink alapján elmondható, hogy új módszerünk képes a szem képpontonkénti valós pontszórásfüggvényét pontosan közelíteni.

- Módszerünk az optikai tengelyről érkező pontok aberrációit pontosabban és szignifikánsan gyorsabban szimulálja, mint a szakirodalomban elérhető konvolúciós módszerek, amit Barsky [17] algoritmusával összehasonlítva demonstráltunk is.
- Két további módszer [18, 19] segítségével azt is szemléltettük, hogy saját algoritmusunk a létező konvolúciós eljárásoknál lényegesen pontosabban és hatékonyabban szimulálja a periférikus látást, valamint képes tetszőleges beesési irányt is figyelembe venni.
- A szakirodalomban elérhető látásszimuláló eljárásokat összességében tekintve elmondható, hogy algoritmusunk eléri az offline módszerek szimulációs pontosságát, rendelkezik a valós idejű szimulációhoz szükséges sebességgel, valamint elkerüli a valós idejű algoritmusokra jellemző megszorításokat és problémákat.

2.2. Kamerarendszerek lencsefényfoltjainak szimulációja

A kamerarendszerek lencsefényfoltjai alapvető elemei a fotográfia és a cinematográfia világának, illetve meghatározó tényezői a számítógéppel generált képek valószerűségének [9]. A jelenség fizikai alapokon történő valós idejű szimulációját megnehezíti a kezelendő optikai paraméterek mennyisége, valamint a Hullin és mtsai. által javasolt [10], a gyakorlatban is rendszeresen alkalmazott [8] eljárás előfeldolgozási ideje.

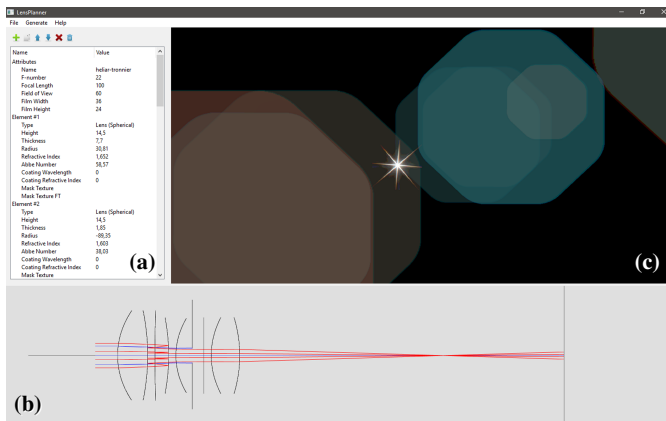
4. tézis

Létrehoztam a nyílt forráskódú *OpenLensFlare* keretrendszert, amellyel a kamerarendszerek lencsefényfoltjai valós időben szimulálhatók, valamint a lencsefényfoltok megjelenésének testreszabhatósága céljából az optikai rendszer szerkeszthető és vizualizálható. Ezenfelül megalkottunk egy hatékony paraméterkereső eljárást Hullin és mtsai. lencsefényfolt-renderelő módszeréhez, amellyel a pontos szimulációhoz szükséges fényfoltonkénti paraméterek valós időben kiszámíthatók.

Kapcsolódó publikációk: [20, 21]

Az általam létrehozott OpenLensFlare keretrendszer az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

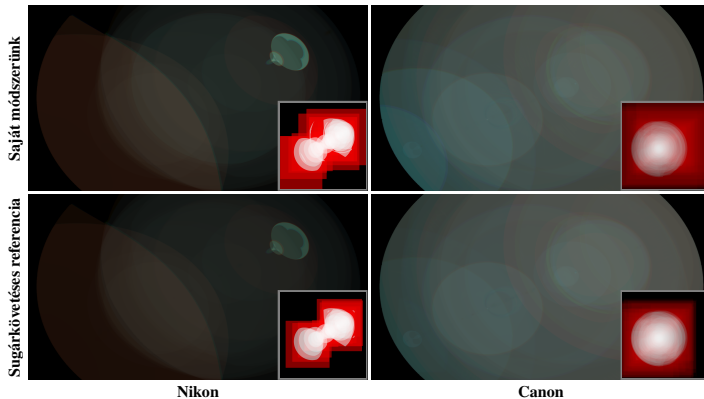
- Keretrendszerem koncepcionálisan egy futásidejű modulra és egy arra épülő szerkesztői eszközre bontható.
- A futásidejű modul végzi a bemeneti adatok kezelését, megvalósítja a grafikus gyorsítóval való kommunikációt, tartalmazza a kiterjeszhetőség szempontjából létfontosságú interfészeket, illetve biztosítja a fényfoltok megjelenítését végző algoritmusok implementációját.
- A szerkesztői eszköz (lásd 2.7. ábra) lehetővé teszi az optikai rendszer paramétereinek módosítását, a kamerarendszer sematikus rajzának elkészítését, a rajzon a fényfoltokhoz tartozó sugárútvonalak megjelenítését, valamint szerkesztés közben a szimulált lencsefényfoltok és a generált adatok valós idejű vizualizációját.
- Ismertetem az implementáció során felmerült legfőbb kihívásokat és azok megoldási lehetőségeit. Ezenkívül bemutattam a problémák megoldására választott megközelítések főbb motiváló tényezőit és a rendszerre gyakorolt hatását is.



2.7. ábra. Pillanatkép a saját OpenLensFlare keretrendszerem szerkesztői moduljáról, amellyel a kamerarendszer szerkeszthető (a) és vizualizálható (b), a lencsefényfoltok pedig szimulálhatók (c).

Ezenfelül Hullin és mtsai. lencsefényfolt-renderelő algoritmusának fényfoltokénti paraméterezésére létrehoztunk egy saját módszert, amely főbb tulajdonságai és a legfontosabb elért eredményeink a következők:

- Módszerünk a paraxiális közelítésen alapuló transzfermátrixok segítségével elkerüli a költséges analitikus sugárkövetés elvégzését.
- Összehasonlítottuk algoritmusunk futási idejét az eredeti sugárkövetéses módszerrel. Méréseink alapján elmondható, hogy új módszerünk nagyságrendekkel gyorsabb a referenciánál és lehetővé teszi a paraméterek teljesen valósídejű közelítését.
- Megvizsgáltuk a saját módszerünkkel generált paraméterek referenciamódszerhez viszonyított pontosságát is. Eredményeink alapján megállapítható, hogy eljárásunk magas pontossággal becsli a költséges sugárkövetéssel előállított fényfoltokénti paramétereket.
- Két eltérő kamerarendszerrel azt is demonstráltuk (lásd 2.8. ábra), hogy a saját módszerünkkel meghatározott paraméterek és az azok felhasználásával készített lencsefényfolt-szimulációk jól közelítik a referenciakimeneteket.



2.8. ábra. Példa lencsefényfolt-szimulációk és a szimulációhoz használt sugárcsot határoló négyyszögek az általunk javasolt paraméterkereső módszerrel és a sugárkövetéses referenciaeljárással.

Irodalomjegyzék

- [1] I. Csoba és R. Kunkli. „Rendering algorithms for aberrated human vision simulation”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 6 (2023), 5:1–5:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>.
- [2] W. Fink és D. Micol. „simEye: computer-based simulation of visual perception under various eye defects using Zernike polynomials”. *Journal of Biomedical Optics* 11.5 (2006), 54011:1–054011:12. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2357734>.
- [3] Q. Wei, S. Patkar és D. K. Pai. „Fast ray-tracing of human eye optics on Graphics Processing Units”. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 114.3 (2014), 302–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.02.003>.
- [4] X. Wei és L. N. Thibos. „Modeling the eye’s optical system by ocular wavefront tomography”. *Optics Express* 16.25 (2008), 20490–20502. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.020490>.
- [5] T. Liu és L. N. Thibos. „Customized models of ocular aberrations across the visual field during accommodation”. *Journal of Vision* 19.9 (2019), 13:1–13:24. DOI: <https://doi.org/10.1167/19.9.13>.
- [6] A. B. Watson. „Computing human optical point spread functions”. *Journal of Vision* 15.2 (2015), 26:1–26:25. DOI: <https://doi.org/10.1167/15.2.26>.
- [7] S. Van Haver. „The Extended Nijboer-Zernike Diffraction Theory and its Applications”. Disszertáció. Delft University of Technology, Delft, Hollandia, 2010. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:8d96ba75-24da-4e31-a750-1bc348155061>. Elérés dátuma: 2024. június 3.
- [8] E. Pekkarinen és M. Balzer. „Physically Based Lens Flare Rendering in “The Lego Movie 2””. *Proceedings DigiPro 2019*. Los

- Angeles, USA: ACM, 2019, 1:1–1:3. DOI: <https://doi.org/10.1145/3329715.3338881>.
- [9] C. Raud. „How post-processing effects imitating camera artifacts affect the perceived realism and aesthetics of digital game graphics”. Szakdolgozat. Södertörn University, Stockholm, Svédország, 2018. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:sh:diva-34888>. Elérés dátuma: 2024. június 3.
- [10] M. Hullin, E. Eisemann, H.-P. Seidel és S. Lee. „Physically-Based Real-Time Lens Flare Rendering”. *ACM Transactions on Graphics* 30.4 (2011), 108:1–108:9. DOI: <https://doi.org/10.1145/2010324.1965003>.
- [11] I. Csoba és R. Kunkli. „Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. *Computer Graphics Forum* 40.6 (2021), 182–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14267>.
- [12] I. Csoba és R. Kunkli. „Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization”. *The Visual Computer* 40.5 (2024), 3709–3731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>.
- [13] I. Csoba és R. Kunkli. „Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach”. *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*. Debrecen: IEEE Computer Society, 2022, 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITDS54976.2022.9914232>.
- [14] J. J. M. Braat, S. van Haver, A. J. E. M. Janssen és P. Dirksen. „Assessment of optical systems by means of point-spread functions”. *Progress in Optics* 51 (2008), 349–468. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(07\)51006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(07)51006-1).
- [15] A. J. E. M. Janssen, J. J. M. Braat és P. Dirksen. „On the computation of the Nijboer-Zernike aberration integrals at arbitrary defocus”. *Journal of Modern Optics* 51.5 (2004), 687–703. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500340408235546>.

- [16] I. Csoba és R. Kunkli. „Real-Time Rendering of Spherocylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. *IX. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (konferenciakiadvány)*. Budapest: Neumann János Számítógép-tudományi Társaság (NJSZT), 2018, 38–45.
- [17] B. A. Barsky. „Vision-Realistic Rendering: Simulation of the Scanned Foveal Image with Elimination of Artifacts due to Occlusion and Discretization”. *Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Applications*. Angers, Franciaország: Springer, 2011, 3–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-25382-9_1.
- [18] J. A. Rodríguez Celaya, P. Brunet Crosa, N. Ezquerro és J. E. Palomar. „A Virtual Reality approach to progressive lenses simulation”. *Actas del XV Congreso Español de Informática Gráfica*. Madrid, Spanyolország: Thomson-Paraninfo, 2005, 43–52.
- [19] D. Gonzalez Utrera. „Metrology and Simulation with Progressive Addition Lenses”. Disszertáció. The University of Arizona, Arizona, USA, 2018. URL: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/631382>. Elérés dátuma: 2024. június 3.
- [20] I. Csoba. „OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework”. *WSCG 2017. Short Papers Proceedings*. Computer Science Research Notes. Plzeň, Csehország: Václav Skala–UNION Agency, 2017, 195–203.
- [21] I. Csoba és R. Kunkli. „Efficient Parametrization Method for Real-time Lens Flare Rendering Algorithm”. *Graphics and Application—The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Abstracts*. Peking, Kína: China Graphics Society, 2019, 118–120.

Publikációs lista

Referált folyóiratcikkek

- [F1] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization”. *The Visual Computer* 40.5 (2024), 3709–3731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>. Folyóirat besorolása: Q2 (impakt faktor: 3,5).
- [F2] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Rendering algorithms for aberrated human vision simulation”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 6 (2023), 5:1–5:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>. Folyóirat besorolása: D1 (impakt faktor: 2,8).
- [F3] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. *Computer Graphics Forum* 40.6 (2021), 182–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14267>. Folyóirat besorolása: D1 (impakt faktor: 2,363).

Konferenciakötetben megjelent cikkek

- [K1] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach”. *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*. Debrecen: IEEE Computer Society, 2022, 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITDS54976.2022.9914232>.
- [K2] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Real-Time Rendering of Spherocylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. *IX. Magyar Számítógépes Grafika és*

Geometria Konferencia. Budapest: Neumann János Számítógéptudományi Társaság (NJSZT), 2018, 38–45.

- [K3] **I. Csoba**. „OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework”. *WSCG 2017. Short Papers Proceedings*. Computer Science Research Notes. Plzeň, Csehország: Vaclav Skala–UNION Agency, 2017, 195–203.

További konferencia-előadások

- [E1] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. The 33rd Eurographics Symposium on Rendering (EGSR 2022). Prága, Csehország, 2022.
- [E2] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Real-Time Rendering of Spherocylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. 12th Conference of the Hungarian Association for Image Processing and Pattern Recognition (KÉPAF 2019). Debrecen, 2019.
- [E3] **I. Csoba**. „Hatékony paraméterkeresési módszer valós idejű lencsefényfolt renderelő algoritmushoz”. XXXIV. Országos Tudományos Diákköri Konferencia. Budapest, 2018.

Poszterprezentációk

- [P1] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Efficient Parametrization Method for Real-time Lens Flare Rendering Algorithm”. The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Kunming, Kína, 2019.
- [P2] **I. Csoba** és R. Kunkli. „Real-Time Rendering of Low-Order Visual Aberrations of the Human Eye using Complex Phasors”. 5th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics. Debrecen, 2018.



Nyilvántartási szám: DEENK/170/2024.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Csoba István

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10061645

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

1. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization.
Visual Comput. 40 (5), 3709-3731, 2024. ISSN: 0178-2789.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>
IF: 3.5 (2022)
2. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Rendering algorithms for aberrated human vision simulation.
Vis. Comput. Ind. Biomed. Art. 6, 1-25, 2023. EISSN: 2524-4442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>
IF: 2.8 (2022)
3. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting.
Comput. Graph. Forum. 40 (6), 182-199, 2021. ISSN: 0167-7055.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.14267>
IF: 2.363

Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

4. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach.
In: 2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS) / István Fazekas, IEEE Computer Society, Washington, 69-73, 2022. ISBN: 9781665496537
5. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Real-time rendering of spherocylindrical refractive errors of the human eye using separable complex convolution.
In: IX. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia. Szerk.: Szirmai-Kalós László, Renner Gábor, Neumann János Számítógép-tudományi Társaság, Budapest, 38-45, 2018. ISBN: 9789633132821





6. **Csoba, I.:** OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework.
In: WSCG 2017 Short Paper Proceedings. Eds.: Vaclav Skala, Union Agency, Plzen, Czech Republic, 195-203, 2017, (Computer Science Research Notes, ISSN 2464-4625 ; 2702)
ISBN: 9788086943459

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

7. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Efficient Parametrization Method for Real-Time Lens Flare Rendering Algorithm.
In: Graphics and Application : the 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Ed.: Baoling Han, Xiao Luo, Hongliang Fan, Beijing Institute of Technology Press, China Graphics Society, Beijing, 118-120, 2019. ISBN: 9787893910319
8. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Real-time rendering of low-order visual aberrations using complex phasors.
In: 5th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics. Ed.: Hudoba Péter, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 23, 2018. ISBN: 9786155586231

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 8,663

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 8,663

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2024.04.23.



Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**Developing algorithms and software for the
efficient simulation of the aberrations of
imaging systems**

by István Csoba

Supervisor: Dr. Roland Imre Kunkli



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Informatics
Debrecen, 2024.

3. Previous work and motivation

Simulating the performance of imaging systems using digital image synthesis is an important and well-researched problem in the field of computer graphics. The human eye plays a critical role among these systems because the optical simulation of its imaging ability is key for performing numerous highly relevant tasks [1].

Several methods exist in the scientific literature for reproducing aberrated human vision [1]. However, these methods typically only employ schematic eye models and fully ignore the true physical structure of the simulated eye. Although specialized eye models can be used to improve the personalizability of the simulation [2, 3], such models tend to significantly increase the complexity and length of the eye structure estimation step. The other main method of personalization is to utilize clinical measurements to estimate the physical structure of the eye [4, 5]. The main limitation of such methods is that they require numerous time-consuming procedures to be conducted with expensive, special-purpose clinical devices, greatly reducing the accuracy and reliability of the process. Because of these reasons, one of the main goals of our research was to develop an algorithm for interactively estimating the physical eye structure of the simulated eye from minimal input data.

The point-spread function—the diffraction pattern generated by the imaging system with an ideal point source as input—is an essential tool for evaluating the performance of an imaging system. In practical applications, the point-spread functions of the human eye are typically computed using the fast Fourier transform [6] or the Extended Nijboer-Zernike theory of diffraction [7]. Although these methods can produce accurate outputs, their performance is inappropriate to efficiently generate the large sets of point-spread functions necessary for human vision simulation. To alleviate this problem, an important goal of our research work was to develop a method for efficiently computing the point-spread functions necessary for human vision simulation.

Previously available methods in the scientific literature for synthesizing vision-simulated imagery generally utilize ray tracing or convolution

with the point-spread functions of the simulated eye [1]. Due to the complexity of the human eye, the computation times of existing solutions are far beyond the acceptable threshold of real-time applicability. Furthermore, all available acceleration methods greatly limit the types of supported aberrations and reduce the plausibility of the resulting simulations. Peripheral vision is also generally ignored by these approaches, with no previously existing convolution-based algorithm capable of correctly handling peripheral aberrations. Consequently, our research aimed to develop methods for the real-time simulation of arbitrary central and peripheral visual aberrations.

Besides human vision, simulating the characteristics of camera systems is another problem closely related to imaging systems. From the wide range of camera-specific phenomena, the lens flare patches generated by high-intensity light sources play a critical role in enhancing the plausibility of synthetic images [8] and represent an essential artistic tool in photography and cinematography [9]. Lens flares mainly arise from the diffraction of light caused by the aperture and the undesired internal reflection of light rays within the optical system. Due to the complexity of the underlying physical phenomena, the proper planning and physically correct simulation of lens flares often require high implementation costs, a deep understanding of optical systems, and long design and preprocessing procedures. Therefore, an important goal of our research was to reduce the cost and severity of problems associated with integrating lens flare simulation into real-time environments.

In practical applications, the efficient simulation of camera lens flares is generally implemented using the interpolation-based ray-tracing approach of Hullin et al. [9, 10]. A key component of this method is a lengthy preprocessing phase, which is essential for achieving proper simulation accuracy and performance. Therefore, integrating and configuring the algorithm in a real application is unnecessarily long. To overcome this limitation and facilitate the interactive customization of lens flare simulations, we also aimed to develop a method for interactively performing the preprocessing phase of the ray-tracing-based lens flare simulation algorithm.

4. New scientific results of the thesis

4.1 Personalized, real-time simulation of aberrated human vision

4.1.1 Efficient estimation of the physical eye structure and visual aberrations

Previously existing algorithms for simulating human vision typically employ schematic eye models, fully ignoring the physical properties of the individual's eye [1].

Thesis 1

For the purposes of personalized human vision simulation, we created a custom parametric eye model and developed supporting methods to calculate its visual aberrations, change its focus distance, and estimate its model parameters corresponding to the physical structure of the simulated eye. Furthermore, we also developed a neural network-based method to accurately and interactively perform these tasks.

Related publications: [11, 12]

The main properties and key results of our method for the estimation of the physical eye structure are the following:

- We constructed our parametric eye model (see Figure 4.1) by extending Navarro's aspherical eye model. We added a set of decentration, rotation, and tilt parameters and utilized a custom, highly adjustable surface to model the anterior cornea.
- Our eye model is parametrizable, and its custom elements allow it to model a wide range of eye conditions.
- Following the focusing mechanism of the human eye and the operating principles of wavefront aberrometers, we developed custom algo-

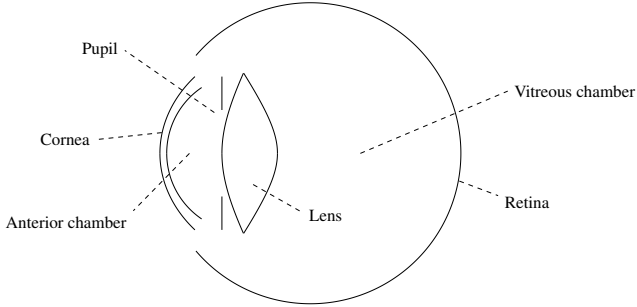


Figure 4.1: Schematic of our parametric eye model.

	Parameter	Unit		Parameter	Unit
Eye	T	mm	Anterior chamber	T	mm
Cornea	T	mm	Lens	D	mm
	R^A, R^P	mm		V	mm^3
	k^A, k^P			k^A, k^P	
	Φ^A, Φ^P	deg		Δ	mm
	Z_{1-6}^A	mm		α	deg

Table 4.1: Main parameters of our eye model. The types of model parameters are: thickness (distance between two neighboring refracting surfaces, T), diameter (D), volume (V), radius of curvature (R), conic constant (k), Zernike elevation coefficient of radial order n (Z_n), translation (Δ), tilt (α), and rotation about the optical axis (Φ). For the cornea and lens, the upper index denotes the anterior (A) and posterior (P) surface of the component.

rithms to change the focus distance and calculate the wavefront aberrations of our parametric eye model.

- We determined a set of parameter domains and descriptive statistics for the parameters of our eye model (see Table 4.1) using the population data available in the relevant scientific literature.
- We used an optimization-based approach to determine the model parameters approximating the physical structure of the simulated eye and utilized open-source tools to make the process customizable.
- Our optimization-based eye estimation procedure requires only the

aberration data of the relaxed eye as input, avoiding all problems associated with clinical eye structure measurements [4, 5].

- To implement eye structure estimation, we used a generalized pattern search algorithm with the following custom loss function:

$$L = \sum_k (w_f f_k |\hat{\alpha}_k - \alpha_k|)^2 + \sum_l (w_a a_l \max(|\bar{x}_l - x_l| - \sigma_l, 0))^2,$$

where α_k and $\hat{\alpha}_k$ are the k th input and generated aberration coefficients, f_k is the weight of the k th coefficient, x_l , \bar{x}_l , and σ_l are the l th model parameter and its mean and standard deviation, a_l is the weight of the l th model parameter, and w_a and w_f are configurable weights for the anatomical and functional properties of the eye model.

- The low number of model parameters makes the supporting procedures of our eye model efficient, avoiding the main problems of the eye models previously used for vision simulation [2, 3].
- We evaluated the accuracy of our eye structure estimation process using six different eye conditions. Our results showed that our parametric eye model and parameter estimation method can efficiently and plausibly estimate the physical structure of the simulated human eye.

Furthermore, the main properties and results of our neural network-based solution are as follows:

- We constructed custom neural networks to perform the eye structure estimation, focusing, and aberration computation steps. Our networks facilitate the subsecond execution of these processes.
- We created a modified residual neural network (ResNet) architecture (see Figure 4.2) to construct our networks, which allows our networks to achieve high levels of accuracy.
- We generated custom training datasets for each network using our parametric eye model and its supporting algorithms.
- We examined the statistical distribution of our custom training datasets.

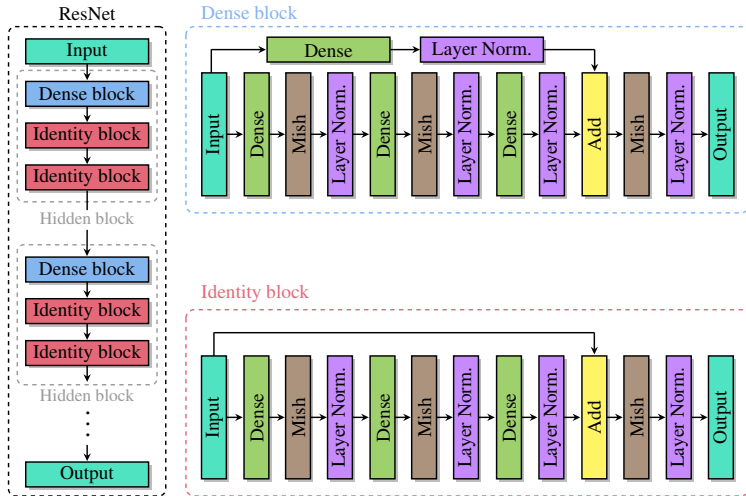


Figure 4.2: Our modified ResNet neural network architecture.

- We developed a discriminator-based process (see Figure 4.3) to train our eye structure estimator network. We also demonstrated that our proposed approach reduces the errors of the fully trained network by an order of magnitude compared to the naive training process.

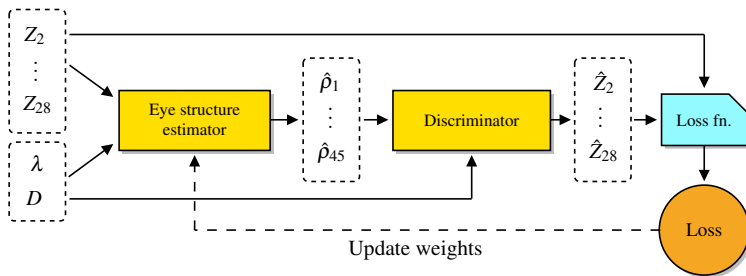


Figure 4.3: A training step of our custom, discriminator-based approach for training our eye structure estimator network.

- We compared our proposed ResNet architecture and discriminator-based training process to traditional feedforward networks, the origi-

nal ResNet architecture, and the naive training approach. The results indicate that our proposed network architecture and training approach are vital for proper training accuracy.

- We also evaluated the performance and accuracy of our neural network-based approach and demonstrated that our proposed networks can approximate the outputs of the reference ray tracing-based methods in real time, with low levels of errors.

4.1.2 Fast computation of point-spread functions

Existing methods for simulating human vision often rely on convolution with the point-spread function (PSF) of the human eye [1] (see Figure 4.4). The necessary PSFs are typically computed using the fast Fourier transform [6] or the extended Nijboer-Zernike approach [7], which are not suitable for interactively producing the large and accurate PSF sets needed for vision simulation.

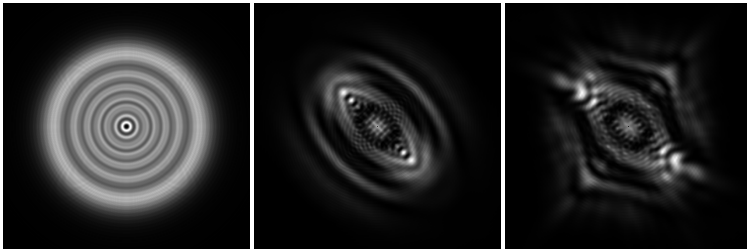


Figure 4.4: Examples of point-spread functions computed for the human eye using our GPU-based approach.

Thesis 2

We developed a method that facilitates the efficient, GPU-based computation of large sets of human point-spread functions and the interactive computation of the coarse PSF grids used by our vision simulation approaches.

Related publication: [13]

The main properties and key results of our GPU-based method for computing the point-spread functions of the human eye are as follows:

- Our method builds on the extended Nijboer-Zernike approach, which defines the point-spread function in the following way [14]:

$$U(r, \phi, f) = 2 \sum_{n,m} \beta_n^m i^{|m|} V_n^{|m|}(r, f) \exp \{im\phi\},$$

where (r, ϕ) are image-plane coordinates, f is the defocus parameter, the V_n^m functions are basic integrals of the Zernike radial polynomials, and the β_n^m values are the complex-valued expansion coefficients.

- Our GPU-based acceleration technique is built on the scalar-diffraction approximation [15] of the V_n^m function, which we rearranged and split to obtain the following two components:

$$\begin{aligned} V_n^m(r, f) &= \sum_{k=0}^K \hat{J}_k(f) \hat{J}_k^{nm}(r), \\ \hat{J}_k(f) &= (2k+1) \exp\left(\frac{if}{2}\right) i^k j_k\left(\frac{f}{2}\right), \\ \hat{J}_k^{nm}(r) &= \sum_{l=\max(0, k-q, p-k)}^{k+p} (-1)^l w_{kl} \frac{J_{m+2l+1}(2\pi r)}{2\pi r}, \end{aligned}$$

where J_k and j_k are, respectively, the cylindrical and spherical Bessel functions of the first kind, $p = \frac{1}{2}(n-m)$, $q = \frac{1}{2}(n+m)$, the w_{kl} terms are linearized products of the Zernike radial polynomials (as defined by (27) in [15]), and K is a configurable parameter.

- Our algorithm comprises the following main steps:
 1. Compute the Bessel and w_{kl} terms for each necessary degree (on the CPU).
 2. Compute $\hat{J}_k^{nm}(r)$ for each degree and for each sample of r (on the GPU).
 3. Compute $\hat{J}_k(f)$ for each unique combination of k and f (on the CPU).

4. For each output PSF, compute the $V_n^m(r, f)$ samples for each combination of degree and input sample, then compute $U(r, \phi, f)$ for each PSF sample (on the GPU).
- Our proposed rearrangement of the V_n^m terms facilitates the precomputation and reuse of the \hat{J}_k^m samples, significantly reducing the number of operations needed for computing the PSFs.
 - We compared our proposed method with the CPU-based approach and demonstrated that our new solution reduces the computation times of large sets of human PSFs by several orders of magnitude.
 - Our measurements indicated that the reusability and the parallel computability of our proposed V_n^m components are both essential for achieving our results.
 - Our measurements also demonstrated that our GPU-based method facilitates the highly interactive computation of the coarse PSF grids needed for convolution-based vision simulation algorithms.

4.1.3 Real-time human vision simulation

Previously existing methods for the real-time simulation of aberrated human vision cannot handle arbitrary visual aberrations and ignore peripheral aberrations. [1].

Thesis 3

We developed a method for the real-time simulation of low-order visual aberrations, which uses complex phasors and separable convolution to approximate the point-spread functions of the simulated eye. Furthermore, we also developed a tile-based convolutional algorithm, which utilizes a GPU-based approximation of the true per-pixel point-spread function of the simulated eye and thus, facilitates the highly accurate, real-time simulation of arbitrary visual aberrations and peripheral vision.

Related publications: [11, 12, 16]

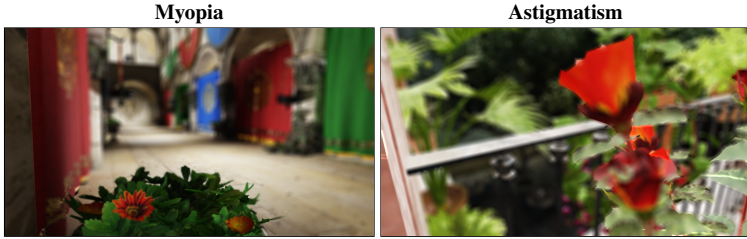


Figure 4.5: Outputs of our complex phasor-based vision simulation algorithm for two eye conditions and test environments.

The main properties and key results of our complex phasor-based vision simulation method (see Figure 4.5) are as follows:

- Our algorithm facilitates the real-time simulation of low-order visual aberrations.
- The proposed method uses minimal input data and only needs the corrective lens prescription of the simulated eye.
- Our approach uses complex phasors as convolution kernels to approximate the point-spread functions of the simulated eye.
- Our method utilizes a custom elliptical sampling strategy to approximate the true point-spread function of the simulated eye more accurately. The parameters of the sampling region are determined by fitting an ellipse to the eye’s point-spread function.
- The precomputation step of our algorithm is short because the per-pixel size of the convolution kernel is calculated from a coarse point-spread function grid.
- We used reference simulations generated using the true per-pixel PSF of the simulated eye to evaluate the accuracy of our phasor-based method and the commonly used Gaussian function-based convolutional approach. Our results indicate that our proposed approach better approximates the true PSFs than the Gaussian function.

Furthermore, the main properties and key results of our tiled vision simulation method (see Figure 4.6) are as follows:



Figure 4.6: Outputs of our tile-based vision simulation algorithm for two eye conditions and test scenes, with and without the simulation of peripheral vision.

- Our algorithm is capable of simulating arbitrary visual aberrations and peripheral vision.
- Our proposed method uses only the aberration data corresponding to the relaxed state of the simulated eye.
- To perform convolution with the true, per-pixel point-spread function of the simulated eye, our method utilizes tiled convolution and a custom, GPU-based method for the real-time approximation of the per-pixel kernel from a coarse PSF grid.
- Our algorithm supports the on-the-fly change of the pupil diameter and focus distance of the simulated eye, which we made efficient using an extended PSF grid and a dynamic, per-frame acceleration structure for our PSF interpolation approach.
- We compared the vision simulations generated using our approach to a reference method that performs convolution with the true per-pixel point-spread functions.
- Our measurements showed that our proposed algorithm can accurately approximate the true per-pixel point-spread functions.

- We compared our proposed algorithm to Barsky’s convolution-based method [17] and demonstrated that our approach simulates the on-axis aberrations significantly faster and with much higher accuracy.
- We also compared our new algorithm to two existing convolutional algorithms [18, 19] for the simulation of peripheral vision and demonstrated that our proposed approach is vastly more accurate and computationally efficient while also supporting arbitrary incidence angles.
- Compared to all previously existing algorithms for simulating aberrated human vision, our new algorithm can achieve the simulation accuracy of offline rendering solutions, supports the rendering performance needed by real-time applications, and avoids all common problems and limitations of real-time approaches.

4.2 Simulating the lens flares of camera systems

Camera lens flares are essential tools for digital photography and cinematography and are prominent components of the plausibility of synthetic images [8]. The complexity associated with the physically accurate simulation of the phenomenon makes it highly difficult to manage the necessary optical parameters and significantly increases the length of the precomputation step of the commonly used lens flare rendering approach of Hullin et al. [9, 10].

Thesis 4

I created an open-source framework called *OpenLensFlare*, which allows the real-time simulation of camera lens flares. Additionally, for the planning and customization of the resulting lens flares, my framework also supports the interactive editing and visualization of the optical system and its lens flares. Furthermore, we also developed an efficient parametrization method for the lens flare rendering algorithm of Hullin et al., which facilitates the real-time computation of the per-ghost parameters needed for generating accurate simulations.

Related publications: [20, 21]

The main properties of my OpenLensFlare framework are as follows:

- Conceptually, my framework comprises a lower-level runtime module and an editor tool built on the runtime component.
- The runtime module handles all the simulation data, communicates with the graphics accelerator, provides the interfaces needed for extensibility, and implements several commonly used lens flare rendering algorithms.
- The editor module (see Figure 4.7) supports the interactive editing of the optical system parameters, the real-time visualization of the camera schematic and the light paths corresponding to ghosts, and the real-time previewing of the rendered lens flares and the underlying internal simulation data.
- Besides describing the tools and main goals of my framework, I also evaluated the main design and implementation challenges of my framework, described my solutions to these problems, and provided a study of the motivating factors and key properties of my chosen solutions.

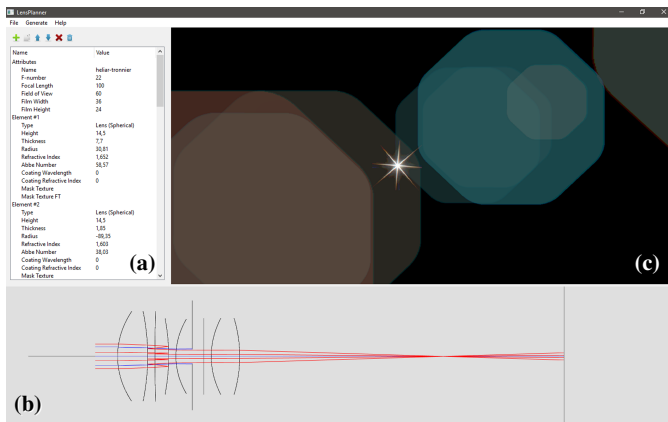


Figure 4.7: The editor interface of my OpenLensFlare framework, which facilitates the editing (a) and visualization (b) of the physical camera parameters as well as the simulation of the generated lens flares (c).

Furthermore, the main properties and key results of the method we developed for the real-time parametrization of the lens flare rendering method of Hullin et al. are as follows:

- Our algorithm uses the paraxial approximation and ray transfer matrices to avoid the expensive evaluation of analytical ray tracing.
- We compared the computation time of our algorithm with the ray-traced reference approach. Our results showed that our method is several orders of magnitude faster than ray tracing and facilitates the fully real-time calculation of the per-ghost simulation parameters.
- We also evaluated the accuracy of our new method compared to the ray tracing-based reference approach. Our results indicate that our proposed algorithm is capable of accurately approximating the ray-traced reference parameters.
- We also used two different camera systems to demonstrate that the lens flare simulations generated using the parameters produced by our proposed approach closely match the reference simulations (see Figure 4.8).

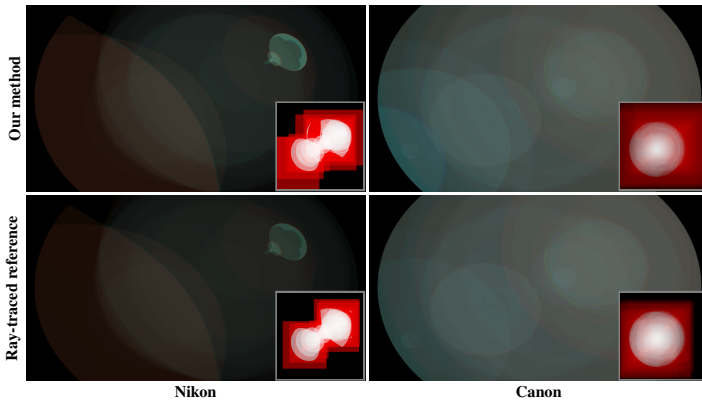


Figure 4.8: Examples of lens flare simulations and the corresponding bounding rectangles of the input ray grids, with the ray bounds computed using our proposed method and the ray-traced reference algorithm.

References

- [1] I. Csoba and R. Kunkli. “Rendering algorithms for aberrated human vision simulation”. In: *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 6 (2023), 5:1–5:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>.
- [2] W. Fink and D. Micol. “simEye: computer-based simulation of visual perception under various eye defects using Zernike polynomials”. In: *Journal of Biomedical Optics* 11.5 (2006), 054011:1–054011:12. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2357734>.
- [3] Q. Wei, S. Patkar, and D. K. Pai. “Fast ray-tracing of human eye optics on Graphics Processing Units”. In: *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 114.3 (2014), pp. 302–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.02.003>.
- [4] X. Wei and L. N. Thibos. “Modeling the eye’s optical system by ocular wavefront tomography”. In: *Optics Express* 16.25 (2008), pp. 20490–20502. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.020490>.
- [5] T. Liu and L. N. Thibos. “Customized models of ocular aberrations across the visual field during accommodation”. In: *Journal of Vision* 19.9 (2019), 13:1–13:24. DOI: <https://doi.org/10.1167/19.9.13>.
- [6] A. B. Watson. “Computing human optical point spread functions”. In: *Journal of Vision* 15.2 (2015), 26:1–26:25. DOI: <https://doi.org/10.1167/15.2.26>.
- [7] S. Van Haver. “The Extended Nijboer-Zernike Diffraction Theory and its Applications”. PhD dissertation. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2010. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:8d96ba75-24da-4e31-a750-1bc348155061>. Date of access: 3 June 2024.
- [8] C. Raud. “How post-processing effects imitating camera artifacts affect the perceived realism and aesthetics of digital game graphics”. BSc thesis. Södertörn University, Stockholm, Sweden, 2018.

URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:sh:diva-34888>. Date of access: 3 June 2024.

- [9] E. Pekkarinen and M. Balzer. “Physically Based Lens Flare Rendering in “The Lego Movie 2””. In: *Proceedings DigiPro 2019*. Los Angeles, USA: ACM, 2019, 1:1–1:3. DOI: <https://doi.org/10.1145/3329715.3338881>.
- [10] M. Hullin, E. Eisemann, H.-P. Seidel, and S. Lee. “Physically-Based Real-Time Lens Flare Rendering”. In: *ACM Transactions on Graphics* 30.4 (2011), 108:1–108:9. DOI: <https://doi.org/10.1145/2010324.1965003>.
- [11] I. Csoba and R. Kunkli. “Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. In: *Computer Graphics Forum* 40.6 (2021), pp. 182–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14267>.
- [12] I. Csoba and R. Kunkli. “Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization”. In: *The Visual Computer* 40.5 (2024), pp. 3709–3731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>.
- [13] I. Csoba and R. Kunkli. “Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach”. In: *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*. Debrecen, Hungary: IEEE Computer Society, 2022, pp. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITDS54976.2022.9914232>.
- [14] J. J. M. Braat, S. van Haver, A. J. E. M. Janssen, and P. Dirksen. “Assessment of optical systems by means of point-spread functions”. In: *Progress in Optics* 51 (2008), pp. 349–468. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(07\)51006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(07)51006-1).
- [15] A. J. E. M. Janssen, J. J. M. Braat, and P. Dirksen. “On the computation of the Nijboer-Zernike aberration integrals at arbitrary defocus”. In: *Journal of Modern Optics* 51.5 (2004), pp. 687–703. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500340408235546>.

- [16] I. Csoba and R. Kunkli. “Real-Time Rendering of Spherocylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. In: *IX. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (conference proceedings)*. Budapest, Hungary: Neumann János Számítógép-tudományi Társaság (NJSZT), 2018, pp. 38–45.
- [17] B. A. Barsky. “Vision-Realistic Rendering: Simulation of the Scanned Foveal Image with Elimination of Artifacts due to Occlusion and Discretization”. In: *Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Applications*. Angers, France: Springer, 2011, pp. 3–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-25382-9_1.
- [18] J. A. Rodríguez Celaya, P. Brunet Crosa, N. Ezquerro, and J. E. Palomar. “A Virtual Reality approach to progressive lenses simulation”. In: *Actas del XV Congreso Español de Informática Gráfica*. Madrid, Spain: Thomson-Paraninfo, 2005, pp. 43–52.
- [19] D. Gonzalez Utrera. “Metrology and Simulation with Progressive Addition Lenses”. PhD dissertation. The University of Arizona, Arizona, USA, 2018. URL: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/631382>. Date of access: 3 June 2024.
- [20] I. Csoba. “OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework”. In: *WSCG 2017. Short Papers Proceedings*. Computer Science Research Notes. Pilsen, Czech Republic: Vaclav Skala–UNION Agency, 2017, pp. 195–203.
- [21] I. Csoba and R. Kunkli. “Efficient Parametrization Method for Real-time Lens Flare Rendering Algorithm”. In: *Graphics and Application—The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Abstracts*. Beijing, China: China Graphics Society, 2019, pp. 118–120.

List of publications

Journal papers

- [J1] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization”. In: *The Visual Computer* 40.5 (2024), pp. 3709–3731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>. Journal ranking: Q2 (impact factor: 3.5).
- [J2] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Rendering algorithms for aberrated human vision simulation”. In: *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 6 (2023), 5:1–5:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>. Journal ranking: D1 (impact factor: 2.8).
- [J3] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. In: *Computer Graphics Forum* 40.6 (2021), pp. 182–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.14267>. Journal ranking: D1 (impact factor: 2.363).

Conference papers

- [C1] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach”. In: *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*. Debrecen, Hungary: IEEE Computer Society, 2022, pp. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/CITDS54976.2022.9914232>.
- [C2] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Real-Time Rendering of Spherocylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. In: *IX. Magyar Számítógépes Grafika*

és Geometria Konferencia. Budapest, Hungary: Neumann János Számítógép-tudományi Társaság (NJSZT), 2018, pp. 38–45.

- [C3] **I. Csoba**. “OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework”. In: *WSCG 2017. Short Papers Proceedings*. Computer Science Research Notes. Pilsen, Czech Republic: Vaclav Skala–UNION Agency, 2017, pp. 195–203.

Other conference talks

- [T1] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting”. The 33rd Eurographics Symposium on Rendering (EGSR 2022). Prague, Czech Republic, 2022.
- [T2] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Real-Time Rendering of Sphero-Cylindrical Refractive Errors of the Human Eye using Separable Complex Convolution”. 12th Conference of the Hungarian Association for Image Processing and Pattern Recognition (KÉPAF 2019). Debrecen, Hungary, 2019.
- [T3] **I. Csoba**. “Hatékony paraméterkeresési módszer valós idejű lencsefényfolt renderelő algoritmushoz”. XXXIV. Országos Tudományos Diákköri Konferencia. Budapest, Hungary, 2018.

Poster presentations

- [P1] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Efficient Parametrization Method for Real-time Lens Flare Rendering Algorithm”. The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Kunming, China, 2019.
- [P2] **I. Csoba** and R. Kunkli. “Real-Time Rendering of Low-Order Visual Aberrations of the Human Eye using Complex Phasors”. 5th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics. Debrecen, Hungary, 2018.



Registry number: DEENK/170/2024.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: István Csoba
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10061645

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (3)

1. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Fast rendering of central and peripheral human visual aberrations across the entire visual field with interactive personalization.
Visual Comput. 40 (5), 3709-3731, 2024. ISSN: 0178-2789.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-023-03060-0>
IF: 3.5 (2022)
2. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Rendering algorithms for aberrated human vision simulation.
Vis. Comput. Ind. Biomed. Art. 6, 1-25, 2023. EISSN: 2524-4442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s42492-023-00132-9>
IF: 2.8 (2022)
3. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Efficient Rendering of Ocular Wavefront Aberrations using Tiled Point-Spread Function Splatting.
Comput. Graph. Forum. 40 (6), 182-199, 2021. ISSN: 0167-7055.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.14267>
IF: 2.363

Foreign language conference proceedings (3)

4. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Fast, GPU-based Computation of Large Point-Spread Function Sets for the Human Eye using the Extended Nijboer-Zernike Approach.
In: 2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS) / István Fazekas, IEEE Computer Society, Washington, 69-73, 2022. ISBN: 9781665496537
5. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Real-time rendering of sphero-cylindrical refractive errors of the human eye using separable complex convolution.
In: IX. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia. Szerk.: Szirmai-Kalós László, Renner Gábor, Neumann János Számítógép-tudományi Társaság, Budapest, 38-45, 2018. ISBN: 9789633132821





6. **Csoba, I.:** OpenLensFlare: an Open-Source, Lens Flare Designing and Rendering Framework.
In: WSCG 2017 Short Paper Proceedings. Eds.: Vaclav Skala, Union Agency, Plzen, Czech Republic, 195-203, 2017, (Computer Science Research Notes, ISSN 2464-4625 ; 2702)
ISBN: 9788086943459

Foreign language abstracts (2)

7. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Efficient Parametrization Method for Real-Time Lens Flare Rendering Algorithm.
In: Graphics and Application : the 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Ed.: Baoling Han, Xiao Luo, Hongliang Fan, Beijing Institute of Technology Press, China Graphics Society, Beijing, 118-120, 2019. ISBN: 9787893910319
8. **Csoba, I., Kunkli, R.:** Real-time rendering of low-order visual aberrations using complex phasors.
In: 5th Winter School of PhD Students in Informatics and Mathematics. Ed.: Hudoba Péter, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 23, 2018. ISBN: 9786155586231

Total IF of journals (all publications): 8,663

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,663

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

24 April, 2024

