

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Hatékony megoldások lencsefényfoltok és
szimulációs adatsorok vizualizációjára**

Csoba-Bodonyi Andrea Beatrix

Témavezető: Dr. Kunkli Roland Imre



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2026.

Tartalomjegyzék

1. Szakmai előzmények és motiváció	3
2. Új eredmények	6
2.1. Lencsefényfoltok hatékony, valósidejű szimulációja	6
2.1.1. Lencsefényfolt-szellemek csempealapú raszterizációja	6
2.1.2. Lencsefényfolt-szellemek meghatározása polinomil- lesztéssel	10
2.2. Mikroszkopikus élőlény viselkedését vizualizáló keretrendszer	14
2.2.1. Baricentrikus számítási modell	15
2.2.2. A vizualizációs keretrendszer megvalósítása	17
Irodalomjegyzék	19
Publikációs lista	23
3 Previous work and motivation	28
4 New scientific results of the thesis	31
4.1 Efficient real-time rendering of lens flares	31
4.1.1 Tile-based rendering of lens flare ghosts	31
4.1.2 Rendering lens flare ghosts using polynomial optics .	35
4.2 Visualization framework for microscopic organism behavior	39
4.2.1 Barycentric computational model	40

4.2.2	Implementation of the visualization framework . . .	42
	References	44
	List of publications	48

1. Szakmai előzmények és motiváció

A képalkotó rendszerek által létrehozott kimenetek számítógéppel történő reprodukálása hosszú ideje tudományos kutatások tárgya. Kiemelt fontossággal bír az ily módon előállított kimenetek valószerűsége, aminek minél nagyobb fokú eléréséhez a képalkotási folyamatok és a képalkotó rendszerek sajátosságainak figyelembevétele kulcsfontosságú.

A kamerák által készített felvételek esetén sokszor a várt képen kívül egyéb jelenségek is láthatóvá válnak. Ezek között hangsúlyos szerepe van a lencsefényfoltoknak, amelyek az optikai rendszeren végighaladó sugarak nemkívánatos viselkedése miatt jönnek létre. Ezek a lencsefényfoltok alapvetően nem várt jelenségek, így eltávolításuk gyakran kerül tudományos munkák középpontjába [1, 2]. Az ilyen kutatások nagy része gépi tanulási algoritmusokat használ, amelyek becslési fényfoltokat tartalmazó adathalmazokra építkeznek [3, 4]. Nemkívánatos jellegük ellenére azonban erőteljes művészi eszközként vannak jelen a fotográfia és filmográfia területén [5, 6]. A lencsefényfoltok alkalmazása megjelenik továbbá olyan területeken is, ahol a fényfoltok különböző vizuális jelzéseket képesek szolgáltatni. Ilyen például annak a vizualizációja, hogy a fényfoltok milyen hatással vannak olyan hétköznapi feladatokra, mint a vezetés [7], vagy szintetikus képanyagok esetén annak jelzése, hogy a kijelző dinamikai tartományával már nem átadható intenzitású fényforrás jelenik meg [8]. Legyen szó a lencsefényfoltok létrehozásáról vagy eltávolításáról, azok hatékony és hiteles szimulációja lényeges szereppel bír.

A lencsefényfoltok szimulációjára számos létező megoldás elérhető. Ezen megoldások egy része fizikai alapokat nélkülözve statikus textúraelemeket alkalmaz, amik bizonyos szabályok alapján a kimeneti képen vannak elhelyezve. Az elérhető megközelítések másik része a fizikai hitelesség miatt sugárkövetést alkalmaz, amely módszerek viszont magas számí-

tási költséggel rendelkeznek. A fényfoltok reprodukálására gyakran Hulin és mtsai. megközelítését [9] használják, amelyben ritka sugárrácsokat követnek végig az optikai rendszeren az összes szellem esetén. Az optikai rendszerek komplexitásának növekedésével a szellemek száma is jelentősen megnő, a létrejövő szellemtextúrák egyesével történő megjelenítése azonban csökkenti a rendszer áteresztőképességét.

Munkánk során a lencsefényfolt-szimuláció két költséges fázisának vizsgálata és hatékonyságának növelése volt a célunk. A raszterizációs fázisban történő magas számú memóriatranzakció elkerülésére egy csempealapú algoritmust hoztunk létre, amellyel a teljes szellemhalmazt egy lépésben tudjuk megjeleníteni. A sugárkövetés költségének csökkentésére a polinomiális optika [10] alkalmazását tűztük ki célul, amely a sugárkövetés eredményét közelíti sokkal rövidebb idő alatt.

A lencsefényfoltok megjelenítésén túl kutatási munkánk másik részét mikroorganizmusok viselkedési adatainak vizualizációja képezte. Nagy mennyiségű adatok feldolgozása és a bennük rejlő információ feltárása gyakran kihívást jelentő feladat. Az adatok vizualizációja egy olyan eszköz, amivel olyan ismeret válik elérhetővé és észrevehetővé, amivel korábban még nem rendelkezünk. Amennyiben azonban az adatok valamilyen speciális tulajdonsághalmazzal rendelkeznek, a széles körben elérhető adatvizualizációs eszközök használata nem jelent megoldást, így személyre szabott eszközök válnak szükségessé.

A Debreceni Egyetem Pszichológiai Intézetének kutatói vizsgálták a mikroorganizmusok evolúciójában részt vevő szerkezeti tulajdonságokat, különös tekintettel a szimetriára [11, 12]. Munkájuk során megalkottak egy szimulációs modellt, amellyel olyan mikroorganizmusok viselkedését reprezentálták, amelyek egy nedves környezetben kúszó mozgást végeztek. Az általuk létrehozott szimulációs algoritmus kimenete olyan adathalmazoknak egy sora volt, amelyek adott tulajdonságokkal rendelkező mikroorganizmus mozgását írták le. A probléma forrása az volt, hogy a szimulációs algoritmus felépítési koncepciója miatt a kapott adathalma-

zok indirekt, a mikroorganizmus környezetének a saját szemszögéből érzékelt változása által írták le az organizmus viselkedését. Emiatt már létező, mikroorganizmusok vizualizációjával kapcsolatos rendszerek [13, 14] nem voltak alkalmazhatók.

Munkánk során egy olyan vizualizációs keretrendszer létrehozása volt a célunk, amelynek használatával az adathalmazok tulajdonosai képessé válnak az egyes esetekben szereplő mikroorganizmusok tulajdonságait és viselkedését illető magasabb szintű következtetés levonására. Ehhez azonban először az adatok feldolgozására volt szükségünk, mivel nem álltak rendelkezésünkre a koordinátainformációk, amelyekkel egy háromdimenziós jelenetben el tudtuk volna helyezni az elemeket. Ehhez egy olyan számítási modell megalkotása volt a célunk, amellyel a kapott adathalmazokban szereplő relatív pozíciókból tudjuk meghatározni a mozgó mikroorganizmus és az összes környezeti elem globális pozícióját.

2. Új eredmények

2.1. Lencsefényfoltok hatékony, valósídejű szimulációja

2.1.1. Lencsefényfolt-szellemek csempealapú raszterizációja

A szakirodalomban elérhető, fizikai alapú lencsefényfolt-szimulációs eljárások a szellemeket egyesével raszterizálják, ami magas memóriasávszélesség-igényekhez vezet. A gyakran nagy részben fedésben lévő szellemek egyenkénti megjelenítése a közös pixelek sokszori újraírását eredményezi.

1. tézis

A lencsefényfoltok szellemkomponenseinek hatékony raszterizációjához egy csempealapú módszert hoztunk létre. Ezenfelül megalkottunk egy hierarchikus csempeépítési megközelítést is, amivel a szellemtextúrákat alkotó primitívek csoportosíthatók. Létrehoztunk továbbá egy baricentrikus koordinátákon alapuló algoritmust a primitívek képpontenkénti hozzájárulásának a meghatározására.

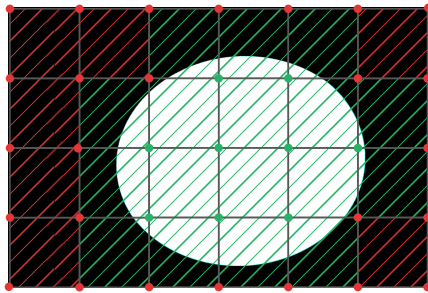
Kapcsolódó publikáció: [15]

A képkötés során létrejövő szellemek nagy része gyakran alig látható, viszont a szellemkomponensek egyesével történő megjelenítése miatt ezek jelentősen növelik a renderelés idejét. A tézisben foglalt raszterizációs eljárásunkkal a kimenet előállításához szükséges adatok hatékonyabban pufferelelhetők, így a renderelési fázis költsége lényegesen csökkenthető, valamint a fényfolt-szimuláció általános áteresztőképessége növelhető. Eljárásunk az alábbi fő lépésekből épül fel:

1. Első lépésben létrehozzuk a szenzorra vetített sugárrácsokat Hullin és mtsai. módszerével [9]. Ekkor egy ritka sugárrácsokkal történő sugár-

követést végzünk el minden csatorna és minden felsorolt szellem esetén.

2. A szellemek egyes részeinek csoportosítása miatt primitíveket hozunk létre. Ehhez négyszögeket építünk az előző lépés kimeneti sugárrácsainak minden 2×2 szomszédságából. Ugyanebben a lépésben végrehajtunk egy szűrést a primitívek érvényességére vonatkozóan. Ennek eredményeként kizárjuk a későbbi feldolgozásból azokat a négyszögeket, amelyek az egyes létrejövő szellemek megjelenéséhez nem járulnak hozzá. Ennek a szűrési folyamatnak az eredményét illusztrálja a 2.1. ábra.



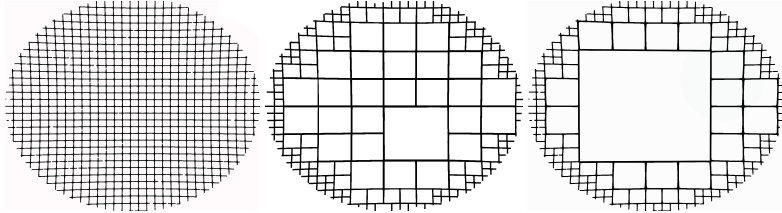
2.1. ábra. A sugárrács primitívjeinek szűrése az adatmennyiség csökkentése érdekében. A zöld pontok az érvényes, a piros pontok pedig az érvénytelen sugarakat jelölik. Egy primitívet akkor tárolunk el, ha az legalább egy érvényes sugarat tartalmaz (zölddel kiemelve), egyébként eldobjuk (pirossal kiemelve).

3. Mivel a szellemek magas komplexitású részei általában a sugárrácsok széleihez közel jönnek létre, így az ettől eltérő régiókat nem szükséges sűrű sugárráccsal reprezentálni. Ebben a lépésben olyan 2×2 -es blokkokat próbálunk összevonni, amelyeket alkotó primitívek egy feltételhalmaz alapján kellően hasonlóak egymáshoz. Ehhez egyrészt a primitív érvényességét ellenőrizzük, hogy a magas komplexitású régiók változatlanok maradjanak. Másrészt a komplex görbületek megtartásához a vizsgált primitívpárok azonos oldalon elhelyezkedő élpárjainak hasonlóságát határozzuk meg. Az \mathbf{e}_A és \mathbf{e}_B élekről akkor állítjuk, hogy egy irányba néznek, ha:

$$\mathbf{e}_A = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_B = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

$$(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) < \gamma. \quad (2.2)$$

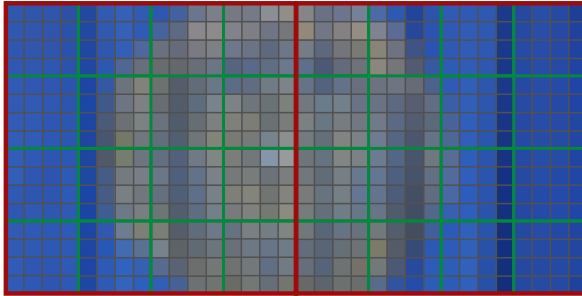
Mivel az összevonási lépésben csökken a primitívek mennyisége azokban a régiókban, ahol nem indokolt a részletes reprezentáció, így a végrehajtásával drasztikusan csökken a későbbi lépésekben feldolgozandó adat mennyisége. A 2.4. ábra egy létrejövő rácsképnek az iteratív primitívösszevonási folyamatunk végrehajtása során létrejövő néhány fázisát mutatja be.



2.2. ábra. Eltérő mértékű primitívösszevonások. Összevonás nélkül (baloldali), mérsékelt összevonás (középső), nagy mértékű összevonás (jobboldali).

4. A következő fázisban egy kétszintű hierarchikus csoportosítást hajtunk végre a szellemeket alkotó primitíveken, azok átfedésben lévő részei alapján. Először a kimeneti kép egy durva rácsfelosztását létrehozva csoportokba soroljuk a primitíveket. Ezt követően a durva felosztást felhasználva létrehozunk egy finomított csoportosítást. A primitívek és a kimeneti kép egyes részeinek átfedésvizsgálatához baricentrikus koordinátákat használunk. A kétszintű hierarchikus megközelítés jelentősen meggyorsítja a primitívek csoportosítását, mivel a durva felosztás szignifikánsan csökkenti a következő szinten lévő finomító lépésben feldolgozandó adatmennyiséget. Egy létrejövő csempehierarchia látható a 2.3. ábrán.

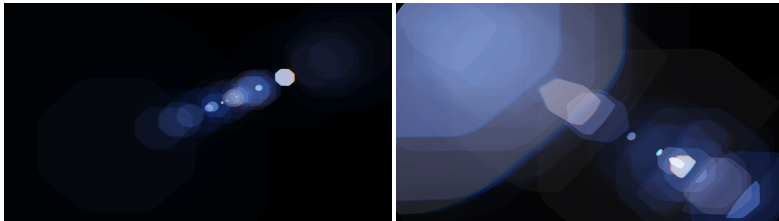
5. A megjelenítéshez képpontonként bejárjuk a kimeneti képet, majd min-



2.3. ábra. Csempehierarchia. A pirossal, zölddel és szürkével körvonalazott cellák jelölik a durva felosztást, finom felosztást és a kimeneti képpontokat.

den képpont esetén megvizsgáljuk, hogy az az egyes primitíveknek része-e. Ezen vizsgálat során hasznosítjuk a primitívcsoportosítást, mivel így csupán a régióban releváns szellemprimitíveket szükséges feldolgozni.

6. Utolsó lépésben a primitívek képpontonkénti hozzájárulását határozzuk meg. Ebben a lépésben szintén baricentrikus koordinátákat alkalmazunk a Loop és DeRose által javasolt számítási móddal [16]. A primitívek hozzájárulásainak kiértékelése lehetővé teszi az egy lépésben, egyszerre történő renderelését a teljes szellemhalmaznak. Ezáltal a jelentős memóriasávszélességre vonatkozó igény elkerülhetővé válik.



2.4. ábra. Az általunk javasolt módszerrel generált lencsefényfoltok egy Itoh (bal) és egy Canon objektívet alkalmazva (jobb).

2.1.2. Lencsefényfolt-szellemek meghatározása polinomillesztéssel

A lencsefényfolt-szimulációs folyamat egyik legköltségesebb fázisa a sugárkövetés. A polinomiális optika [10] alkalmazása ezen probléma megoldására ígéretesnek bizonyult a korábban megjelent munkákban, ezek a kutatások azonban figyelmen kívül hagyták a lencsefényfoltok kulcsaspektusait, valamint a precíz validációt, amelyek miatt a gyakorlati használhatóságuk korlátozott volt.

2. tézis

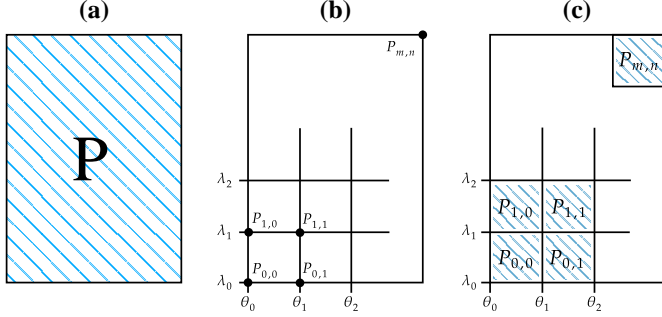
Létrehoztunk egy olyan, polinomiális optikán alapuló algoritmust, amely a lencsefényfoltok szellemkomponenseit fizikailag megalapozott módon képes szimulálni komplex optikai rendszerek használatával is. Megalkottunk továbbá egy saját sugárátviteli modellt is, amellyel a szellemkomponensek szimulációját csökkentett darabszámú változóval és polinomiális taggal vagyunk képesek végrehajtani valós idejű környezetekben.

Kapcsolódó publikáció: [17]

Mivel a korábbi, polinomiális optikát alkalmazó megközelítések a sugárkövetés offline felhasználására fókuszáltak, így nem volt fontos a polinomiális modell bemeneti és kimeneti változóinak, valamint a létrejövő polinomiális tagok számának minimalizálása. A korábbi modellek esetén egy polinomiális rendszer egy szellem tulajdonságait írja le. Ahogyan az a korábbi munkák során is bemutatásra került [6, 10, 18, 19], ezzel a megközelítéssel az összesített relatív sugár- és intenzitás tagok komplex viselkedése miatt megnövekedhet a polinomiális tagok száma, ennek következtében pedig a rendszer kiértékelési ideje is magas lehet.

Munkánk során ezen probléma megoldására az egyes hullámhosszakat külön kezeltük, a beesési szögek bemeneti tartományát pedig részleges lokális zónákra osztottuk fel. Az összes ilyen hullámhossz és beesési szög

kombinációra egy különálló polinomiális rendszert illesztettünk. Ezen zónaalapú reprezentáció látható a 2.5. ábrán.



2.5. ábra. Egy vizuális összehasonlítása az eredeti teljes polinomiális modellnek (a), a saját részleges modellünknek (b) és a kettő hibrid kombinációjának (c).

A részleges, zónaalapú polinomiális rendszer a következő módon formalizálható:

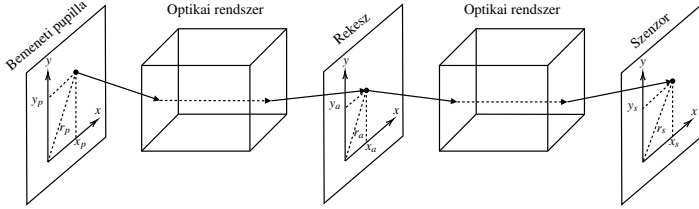
$$(x_p, y_p, r_p, \bar{r}_p) \rightarrow (x_a, y_a, x_s, y_s, \tau_s, \rho_s), \quad (2.3)$$

ahol (x_p, y_p) a sugár pozíciója a bemeneti pupillán, r_p az (x_p, y_p) -hez tartozó polárkoordináták sugárkomponense és $\bar{r}_p = 1 - r_p$. A kimeneteket illetően (x_a, y_a) és (x_s, y_s) az áthaladó sugár pozíciója a rekesznyíláson és a szenzoron, τ_s és ρ_s pedig a sugárhoz tartozó intenzitás és relatív sugár a szenzoron. A 2.6. ábrán láthatók a folyamatban részt vevő releváns síkok és változók.

A hatékony feldolgozás miatt az ugyanahhoz a szellemhez tartozó polinomok esetén polinombázisok egy egységes rendszerét alkalmaztuk. Az ugyanahhoz a szellemhez tartozó polinomok a következőképp írhatók fel:

$$p_{mn}(x) = \sum_{k=0}^t c_k^{mn} \cdot v_k, \quad v_k = \prod_{j=1}^d x_j^{l_{k,j}}, \quad (2.4)$$

ahol c_k^{mn} a polinom-együttható, v_k a megosztott polinombázis k -adik tag-



2.6. ábra. A saját polinomiális sugárítviteli modellünk által használt fő síkok és koordináta-rendszerek vizualizációja.

ja, $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ egy d dimenziós bemeneti vektora a polinomnak, t a polinomtagok száma, $l_{k,j}$ a j -edik változó k -adik polinomtaghoz tartozó hatványkitevője, m és n pedig a beesési szög és a hullámhosszminták indexei.

A saját polinomiális modellünkkel való illesztés elvégzéséhez saját illesztési adatokat hoztunk létre. Az illesztési adatok birtokában iteratív módon elvégeztük a polinomillesztést, amelyhez egy egyetlen tagból álló polinomtól indultunk, amelyen kiterjesztési és csökkentési operátorokat alkalmaztunk. Az iteratív folyamat során létrejövő új állapotok kiértékelésére az átlagos négyzetes hibaoperátort használjuk:

$$\Omega(\Theta) = \frac{\sum_{\theta \in \Theta} (\omega(\theta))^2}{|\Theta|}, \quad (2.5)$$

ahol Θ az illesztési adathalmazok uniója az összes beesési szögre, θ egy adott beesési szöghöz tartozó illesztési adathalmaz, ω pedig a hibafüggvény egyetlen lokális illesztési zónához, amely a következőképpen írható fel formálisan:

$$\omega(\theta) = \frac{\sum_{r \in \theta} w(r) \cdot (\hat{y}(r) - y(r))^2}{|\theta|}. \quad (2.6)$$

A fenti formulában r egyetlen illesztési adatelem, $\hat{y}(r)$ és $y(r)$ a valós (su-

gárkövetett) és generált (polinomiális rendszer felhasználásával) értékei az r minta kimeneti változóinak, $w(r)$ pedig r súlya, amit a következőképpen definiálunk:

$$w(r) = \begin{cases} w_r, & \text{ha } y_{min} \leq y(r) \leq y_{max} \\ 1, & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (2.7)$$

ahol w_r egy felhasználó által konfigurálható paraméter, ami az r érvényességétől függ, y_{min} és y_{max} pedig az y célváltozó legkisebb és legnagyobb érvényes értékei.

A végső megjelenítéshez a polinomok kiértékelését volt szükséges elvégezni. Mivel modellünk diszkrét beesési szögeket használ, így a köztes szögek kezelésére a forgásfüggő c_k^{mn} polinomiális együtthatókat interpoláljuk, majd az interpolált együtthatókkal kiértékeljük a polinomiális modellt.

Mivel a lencsefényfolt-szimulációt illető eredményeink a folyamat két különböző fázisát érintik, ezért az általunk javasolt eljárások együttesen is használhatók. Ezáltal a két megközelítés előnyeinek kombinálásával nagyobb mértékű teljesítményjavulás érhető el. A 2.7. ábrán látható két olyan kimenet, amelyeket az általunk megalkotott eljárások együttes használatával hoztunk létre.



2.7. ábra. Egy Itoh (közepes komplexitású) és egy Nikon (magas komplexitású) optikai rendszerrel és a javasolt megközelítéseinkkel létrehozott lencsefényfoltok a *San Miguel* jelenetben alkalmazva.

2.2. Mikroszkopikus élőlény viselkedését vizualizáló keretrendszer

A nagy mennyiségű adatok vizuális formában történő megjelenítése az adatelemzést hatékonyabbá, a rejtett információkat pedig felismerhetővé teszi. Tudományos kutatási feladatok során azonban létrejöhetnek olyan adatok, amelyek bizonyos szempontokból speciális jelleggel rendelkeznek. Ezek vizualizációja viszont gyakran személyre szabott rendszerek létrehozását teszi szükségessé.

3. tézis

Megalkottunk egy baricentrikus koordinátákon alapuló számítási modellt, aminek segítségével képesek vagyunk egy mozgó objektum pozícióját meghatározni környezeti elemek relatív pozíciójából. Létrehoztunk továbbá egy vizualizációs keretrendszert is, amely a baricentrikus eljárás felhasználásával képes mikroorganizmusok viselkedési adatait megjeleníteni.

Kapcsolódó publikációk: [20, 21]

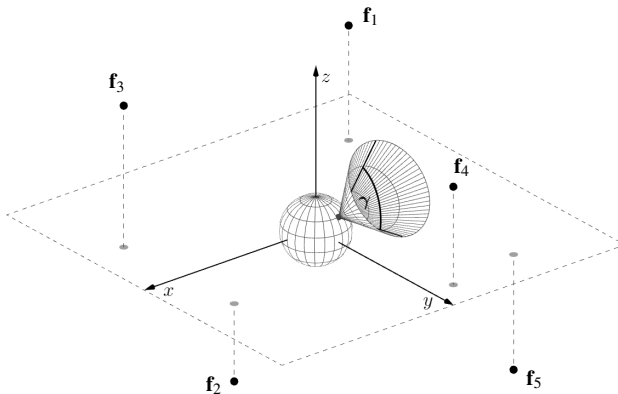
A Debreceni Egyetem Pszichológiai Intézetének kutatói a mikroszkopikus élőlények evolúciójában részt vevő szerkezeti tényezőket vizsgálták. A munka során egy szimulációs modellt hoztak létre, amely segítségével a különböző tulajdonságokkal rendelkező mikroorganizmusok viselkedését tudták szimulálni. A 2.8. ábrán láthatók a modell fő elemei.

A szimuláció során egy futópálya működéséhez hasonlóan a mikroorganizmus tulajdonképpen nem vált pozíciót, hanem a mozgó szalag analógiájaként az élőlény környezetének elemei mozdulnak el ellentétes irányban. Emiatt azonban a rendszer kimenete egy olyan adatsor volt, amely a mozgást indirekt módon írta le.

2.2.1. Baricentrikus számítási modell

Az adathalmazok a mozdulatsor leírására a környezetben jelen lévő táplálékoknak a mikroorganizmus szemszögéből rögzített pozícióit tartalmazzák. Mivel a mozgó organizmus globális koordinátái nem álltak rendelkezésünkre, így azok meghatározására egy baricentrikus koordinátákon alapuló objektumlokalizációs algoritmust hoztunk létre. Mivel minden képkocka garantáltan tartalmazott legalább öt környezeti elemet, így elegendő információ állt rendelkezésünkre ahhoz, hogy a mozgó organizmus baricentrikus koordinátáit meg tudjuk határozni három dimenzióban. A környezetben megjelenő táplálékokat tehát referenciapontokként használtuk fel.

Legyenek $x_{i,k}$, $y_{i,k}$ és $z_{i,k}$ ($i \in \{1,2,3,4\}$) az i -edik környezeti referenciapont koordinátái a k -adik lépésben. Legyenek továbbá $w_{i,k}$ ($i \in \{1,2,3,4\}$) a mozgó objektum baricentrikus koordinátái a k -adik lépésben a fenti referenciarendszerre vonatkozóan. A Marschner és Shirley könyvében [22] javasoltakat felhasználva a számítás a következő módon formalizálható:



2.8. ábra. A szimulációs környezet fő elemei.

$$A_k \cdot \mathbf{w}_k = \mathbf{b}_k, \quad (2.8)$$

ahol

$$A_k := \begin{pmatrix} x_{1,k} - x_{4,k} & x_{2,k} - x_{4,k} & x_{3,k} - x_{4,k} \\ y_{1,k} - y_{4,k} & y_{2,k} - y_{4,k} & y_{3,k} - y_{4,k} \\ z_{1,k} - z_{4,k} & z_{2,k} - z_{4,k} & z_{3,k} - z_{4,k} \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{w}_k := \begin{pmatrix} w_{1,k} \\ w_{2,k} \\ w_{3,k} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}_k := - \begin{pmatrix} x_{4,k} \\ y_{4,k} \\ z_{4,k} \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

A súlyok tehát a következőképpen kaphatók meg:

$$\mathbf{w}_k = A_k^{-1} \cdot \mathbf{b}_k, \quad (2.11)$$

$$w_{4,k} = 1 - \langle \mathbf{w}_k, \mathbf{1} \rangle, \quad (2.12)$$

ahol $\langle \cdot, \cdot \rangle$ a skaláris szorzatot, $\mathbf{1}$ pedig az $(1, 1, 1)^T$ vektort jelöli. A k -adik lépés baricentrikus koordinátáit a $\hat{\mathbf{w}}_k$ vektorba rendezzük:

$$\hat{\mathbf{w}}_k := (w_{1,k}, w_{2,k}, w_{3,k}, w_{4,k})^T. \quad (2.13)$$

Tekintve, hogy a mikroorganizmus minden mozgulatsorozatát a globális origóban kezdte, így az első képkockát felhasználva egy statikus bázist tudunk felépíteni. Erre a bázisra alapozva az élőlény pozíciójának egyes képkockákban meghatározott baricentrikus koordinátáinak segítségével a globális koordináta-rendszerbe tudtuk konvertálni az élőlény pozícióját. Ehhez legyen G_1 a referenciapontok első képkockabeli lokális koordinátáit tartalmazó mátrix:

$$G_1 := \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & x_{4,1} \\ y_{1,1} & y_{2,1} & y_{3,1} & y_{4,1} \\ z_{1,1} & z_{2,1} & z_{3,1} & z_{4,1} \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Jelöljük a k -adik képkockában keresett globális koordinátákat x_k , y_k és z_k -val, amelyek a következő módon kaphatók meg:

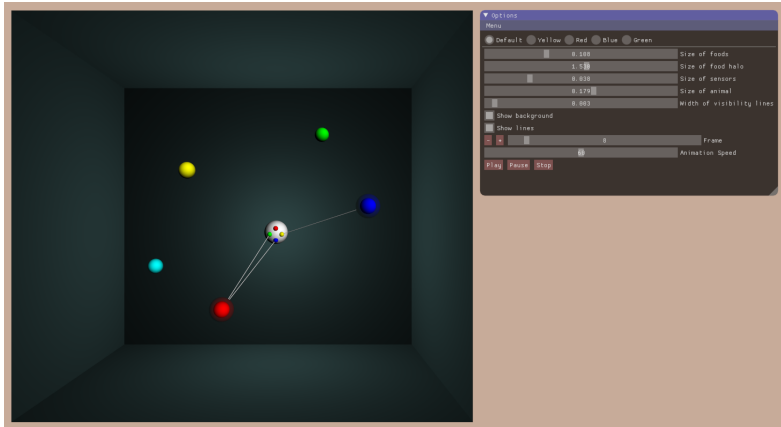
$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = G_1 \cdot \hat{\mathbf{w}}_k. \quad (2.15)$$

A kapott adatsorokban léteznek olyan esetek, amikor egy táplálék eltűnik, majd helyette egy másik jelenik meg egy új pozícióban. Ilyen esetben azonban sérül a statikus bázis, ami annak frissítését vonja maga után. Ekkor egyrészt az újonnan megjelent táplálék globális koordinátáit a mikroorganizmushoz hasonlóan meg kell határozni, másrészt a statikus bázist az új elemmel szükséges frissíteni.

2.2.2. A vizualizációs keretrendszer megvalósítása

A baricentrikus számítási modell felhasználásával létrehoztunk egy háromdimenziós vizualizációs keretrendszert, amelynek célja a kutatás előrehaladásának elősegítése volt. Ehhez elengedhetetlen volt a kapott adatok feldolgozása. Emiatt első lépésként a baricentrikus modellünkkel meghatároztuk a környezetben található összes elem globális pozícióját, valamint kezeltük az új és eltűnő táplálékokat is.

A keretrendszerbe a megjelenítésen felül számos olyan funkciót építettünk be, amely az egyszerű és átlátható adatelemzést teszi lehetővé. Az animáció tetszőleges időpillanatban megállítható, visszaléptethető, illetve a nézőpont tetszőleges érzősejtbe áthelyezhető. Azokat a táplálékokat, amiket az élőlény legalább egy érzékelőjével észlel, egy áttetsző burokba helyeztük. Az érzékelt táplálékokat ugyanakkor összekötöttük azokkal az érzékelőkkel, amelyek észlelik azt. A mozgatlansor térbeli kiterjedésének érzékeltetésére egy befoglaló dobozt használtunk a teljes jelenet körül. Az itt felsorolt analitikai eszközökkel a viselkedés részletes és több irányból történő elemezhetősége válik elérhetővé.



2.9. ábra. A vizualizációs keretrendszer egy pillanatképe. Ebben a jelenetben a középű fehér gömb reprezentálja a mozgó mikroorganizmust, ami a piros táplálékot két szenzorával, a kék táplálékot pedig eggyel érzékeli. Az áttetsző burkok az érzékelt táplálékok körül az észlelés tényét, az egyes szenzorokhoz kötődő kapcsolatok pedig az adott táplálékot érzékelő szenzorokat jelölik.

Irodalomjegyzék

- [1] G. Zou, H. Bai, Y. Yuan, T. Deng, Z. Yin és J. Wei. „Research on Flare Removal Network Based on Channel Attention Mechanism and Depthwise Over-parameterized Convolution”. *Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE 2023)*. New York, USA: ACM, 2024, 919–926. DOI: <https://doi.org/10.1145/3652628.3652781>.
- [2] Y. Dai, Y. Luo, Z. Shangchen, C. Li és C. C. Loy. „Nighttime Smartphone Reflective Flare Removal Using Optical Center Symmetry Prior”. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos, USA: IEEE, 2023, 20783–20791. DOI: <http://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01991>.
- [3] Y. Wu, Q. He, T. Xue, R. Garg, J. Chen és A. Veeraraghavan. „How to Train Neural Networks for Flare Removal”. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos, USA: IEEE, 2021, 2219–2227. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00224>.
- [4] Z. Jin, F. Huajun, Z. Xu és C. Yueting. „A Data Generation Method for Image Flare Removal Based on Similarity and Centrosymmetric Effect”. *Photonics* 10 (2023), 1072:1–1072:19. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10101072>.
- [5] Pixar. *The imperfect lens: Creating the look of Wall-E*. Wall-E Three-DVD Box. 2008.
- [6] E. Pekkarinen és M. Balzer. „Physically Based Lens Flare Rendering in «The Lego Movie 2»”. *Proceedings of the 2019 Digital Pro-*

- duction Symposium*. DigiPro '19. Los Angeles, USA: ACM, 2019, 1:1–1:3. DOI: <https://doi.org/10.1145/3329715.3338881>.
- [7] B. Haycock, J. L. Campos, N. Koenraad, M. Potter és S. Advani. „Creating headlight glare in a driving simulator”. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 61 (2019), 93–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.10.006>.
- [8] T. Ritschel, M. Ihrke, J. R. Frisvad, J. Coppens, K. Myszkowski és H.-P. Seidel. „Temporal Glare: Real-Time Dynamic Simulation of the Scattering in the Human Eye”. *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), 183–192. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01357.x>.
- [9] 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>.
- [10] M. B. Hullin, J. Hanika és W. Heidrich. „Polynomial Optics: A Construction Kit for Efficient Ray-Tracing of Lens Systems”. *Computer Graphics Forum* 31.4 (2012), 1375–1383. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03132.x>.
- [11] G. Holló és M. Novák. „The manoeuvrability hypothesis to explain the maintenance of bilateral symmetry in animal evolution”. *Biology Direct* 7.1 (2012), 22:1–22:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/1745-6150-7-22>.
- [12] G. Holló. „A new paradigm for animal symmetry”. *Interface Focus* 5.6 (2015), 20150032:1–20150032:10. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0032>.

- [13] T. Ishikawa. „Suspension biomechanics of swimming microbes”. *Journal of The Royal Society Interface* 6.39 (2009), 815–834. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0223>.
- [14] A. Compagnoni, V. Sharma, Y. Bao, M. Libera, S. Sukhishvili, P. Bidinger, L. Bioglio és E. Bonelli. „Bioscape: A modeling and simulation language for bacteria-materials interactions”. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 293 (2013), 35–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2013.02.017>.
- [15] A. Bodonyi és R. Kunkli. „Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. *Computers & Graphics* 115 (2023), 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>.
- [16] C. T. Loop és T. D. DeRose. „A multisided generalization of Bézier surfaces”. *ACM Transactions on Graphics* 8.3 (1989), 204–234. DOI: <https://doi.org/10.1145/77055.77059>.
- [17] A. Bodonyi, I. Csoba és R. Kunkli. „Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials”. *The Visual Computer* 41.5 (2025), 3645–3662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>.
- [18] S. Dilorio. „Optimizations for Rendering Realistic Lens Flares in Polynomial Optics”. Honors thesis. Union College Schaffer Library Special Collections. Schenectady, NY, 2015. URL: <https://arches.union.edu/do/fff31b3d-3ecb-4c4a-979d-b550dc65e38e#mode/2up>. Elérés dátuma: 2026. február 24.
- [19] E. Sabatschus. „Polyflare: Sparse Polynomial Modeling for Efficient Approximate Lens Flare Rendering”. Szakdolgozat. University of Bonn, Bonn, Germany, 2022. URL: <https://emmabyte.de/projects/polyflare/thesis.pdf>. Elérés dátuma: 2026. február 24.

- [20] A. Bodonyi és R. Kunkli. „Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 3 (2020), 18:1–18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>.
- [21] A. Bodonyi, Gy. Kurucz, G. Holló és R. Kunkli. „A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 53 (2021), 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>.
- [22] S. Marschner és P. Shirley. *Fundamentals of Computer Graphics*. 4. kiad. Boca Raton, USA: A K Peters/CRC Press, 2015. ISBN: 978-1-4822-2939-4.

Az értekezés alapjául szolgáló publikációk

Referált folyóiratcikkek

- [F1] **A. Bodonyi**, I. Csoba és R. Kunkli. „Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials”. *The Visual Computer* 41.5 (2025), 3645–3662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>.
Folyóirat besorolása: Q2 (impakt faktor: 3).
- [F2] **A. Bodonyi** és R. Kunkli. „Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. *Computers & Graphics* 115 (2023), 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>.
Folyóirat besorolása: Q1 (impakt faktor: 2,5).
- [F3] **A. Bodonyi**, Gy. Kurucz, G. Holló és R. Kunkli. „A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 53 (2021), 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>.
Folyóirat besorolása: Q3.
- [F4] **A. Bodonyi** és R. Kunkli. „Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 3 (2020), 18:1–18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>.

Konferencia-előadások

- [E1] **A. Bodonyi** és R. Kunkli. „Lencsefényfoltok hatékony csempealapú szintézise”. XI. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (GRAFGEO 2024). Budapest, 2024.

- [E2] **A. Bodonyi** és R. Kunkli. „Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. 18th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics 2023). Shanghaj, Kína, 2023.
- [E3] **A. Bodonyi** és R. Kunkli. „Efficient tile-based lens flare rendering”. 2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS 2022). Debrecen, 2022.
- [E4] **A. Bodonyi**, Gy. Kurucz, G. Holló és R. Kunkli. „Implementing a Barycentric Coordinates-based Visualization Framework for Movement of Microscopic Organisms”. 2020 IEEE 1st Conference on Information Technology and Data Science (CITDS 2020). Debrecen, 2020.

Poszterprezentáció

- [P1] R. Kunkli és **A. Bodonyi**. „A Barycentric Coordinates based Object Location Determination Method for Animation Purposes”. The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Kunming, Kína, 2019.



Nyilvántartási szám: DEENK/330/2025.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Csoba-Bodonyi Andrea Beatrix
Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10073731

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

1. **Bodonyi, A. B.**, Kurucz, G., Holló, G., Kunkli, R.: A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms.
Ann. Math. Inform. 53, 61-72, 2021. ISSN: 1787-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

2. **Bodonyi, A. B.**, Csoba, I., Kunkli, R.: Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials.
Visual Comput. 41 (5), 3645-3662, 2025. ISSN: 0178-2789.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>
IF: 3 (2023)
3. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts.
Comput. Graph.-UK. 115, 472-483, 2023. ISSN: 0097-8493.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>
IF: 2.5
4. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates.
Vis. Comput. Ind. Biomed. Art. 3 (1), 1-7, 2020. EISSN: 2524-4442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

5. **Bodonyi, A. B.**, Kurucz, G., Holló, G., Kunkli, R.: Implementing a barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms.
In: The 1st Conference on Information Technology and Data Science. Ed.: Fazekas István, Hajdu András, Debreceni Egyetem, Debrecen, 40-42, 2020.





6. Kunkli, R., **Bodonyi, A. B.**: A Barycentric Coordinates based Object Location Determination Method for Animation Purposes.
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, 149-150, 2019. ISBN: 9787893910319

További közlemények

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

7. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Improved Algorithm for Simulating Glare in the Human Eye.
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, 130-132, 2019. ISBN: 9787893910319

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 5,5

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 5,5

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

Debrecen, 2025.05.27.



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

**Efficient methods for visualizing lens flares and
simulation datasets**

by Andrea Beatrix Csoba-Bodonyi

Supervisor: Dr. Roland Imre Kunkli



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Informatics
Debrecen, 2026.

3. Previous work and motivation

The computer-based reproduction of outputs generated by imaging systems has been a subject of scientific research for a long time. The plausibility of the created outputs has a high importance. Achieving a high degree of realism requires the consideration of the properties for both the imaging processes and the imaging systems.

In the case of camera images, phenomena besides the expected image often become visible. Lens flares have an important role among these. They arise from the undesired behavior of rays traversing an optical system. In many cases, lens flares are unintended phenomena, therefore, its removal is frequently the main focus of scientific studies [1, 2]. A large portion of these research works rely on machine learning methods trained on datasets that contain lens flares [3, 4]. Despite its undesirable nature, lens flares are also widely used as a powerful artistic tool in photography and cinematography [5, 6]. Furthermore, lens flares appear in applications where such light artifacts can provide informative visual cues. Some examples of these kind of applications include visualizing the impact of flares on everyday tasks such as driving [7], or indicating the presence of light sources with intensities exceeding the dynamic range of the display [8]. The efficient and plausible simulation of the lens flares is essential, let it be about their reproduction or removal.

There are numerous solutions available for simulating lens flares. Some methods, without relying on physical bases, use static texture elements that are placed on the output image based on some predefined rules. Other approaches use ray-tracing to achieve physical plausibility. However, these methods typically come with a high computational cost. The approach of Hullin et al. [9] is often used for simulating lens flares, which uses sparse ray grids propagated through the optical system for each ghost.

As the complexity of optical systems increases, the number of ghost images grows as well. Rendering the resulting ghost textures individually, however, reduces the system throughput.

In our work, we analyzed the two computationally expensive phases of the lens flare simulation, with the aim of improving their efficiency. To avoid the high number of memory transactions in the rasterization phase, we developed a tile-based algorithm that enables the rendering of the entire ghost set in a single step. To reduce the cost of the ray tracing phase, we applied polynomial optics [10], which approximates the result of ray tracing in a significantly shorter time.

Another part of our research focused on the visualization of the behavioral data of microorganisms. Processing large volumes of data and exploring hidden information and patterns is often challenging. Through data visualization, the previously inaccessible knowledge can become available. However, when the dataset has some specific characteristics, widely available visualization tools may not provide a viable solution, making personalized applications necessary.

Researchers at the Institute of Psychology of the University of Debrecen analyzed the structural properties involved in the evolution of microorganisms, with particular focus on symmetry [11, 12]. In their work, they developed a simulation model to represent the behavior of microorganisms performing a crawling motion in a wet environment. The output of their simulation algorithm consisted of a series of datasets describing the motion of the microorganisms with given properties. The core difficulty was that, due to the design of the simulation algorithm, the resulting datasets described the behavior of the organism indirectly. This means that the data contained the changes perceived from the microorganism's own viewpoint of its environment. As a result, existing tools for microorganism visualization [13, 14] were not applicable.

In our work, the goal was to develop a visualization framework that allows the owners of these datasets to get higher-level observations about

the behavioral properties of the microorganisms represented in each of the cases. To this end, we first needed to process the data, as the coordinate information was not available that would have allowed us to place the elements in a three-dimensional scene. Therefore, we created a computational model capable of determining the global positions of the moving microorganism and the environmental elements from the relative positions provided in the datasets.

4. New scientific results of the thesis

4.1 Efficient real-time rendering of lens flares

4.1.1 Tile-based rendering of lens flare ghosts

The available methods for physically based lens flare simulation typically rasterize the resulting ghost components individually, which results in high memory bandwidth requirements. Since ghosts often have large overlapping regions, rendering them one by one results in a high number of overwriting of the same pixels.

Thesis 1

We developed a tile-based method for the efficient rasterization of the lens flare ghosts. In addition, we designed a hierarchical tile-building approach that is able to group the primitives building up the ghosts. We also created a barycentric coordinates-based algorithm to determine the per-pixel contributions of the primitives.

Related publication: [15]

A large proportion of the ghosts created during the imaging process is often barely visible. However, rendering the ghosts individually can still substantially increase the overall rendering time. With the rasterization approach presented in this thesis, the data required to produce the output can be buffered more efficiently, significantly reducing the cost of the rendering phase and improving the overall throughput of lens flare simulation. Our method consists of the following steps:

1. In the first step, we generate the ray grids projected to the sensor using the approach of Hullin et al. [9]. In this phase, we perform ray tracing with

sparse ray grids for each channel and for each enumerated ghost.

2. For the grouping of the ghost parts, we construct a set of primitives. We build quadrilaterals from every 2×2 neighborhood of the output ray grids produced in the previous step. We also perform a filtering with regard to the primitive validities. As a result, we exclude from the subsequent processing those quadrilaterals that do not contribute to the appearance of the generated ghosts. The output of this filtering process is illustrated in Figure 4.1.

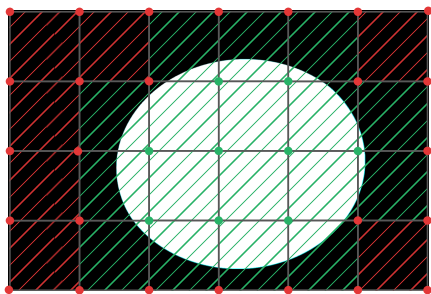


Figure 4.1: Filtering the ray-grid primitives to reduce the data amount. The green points indicate valid rays, while red points represent invalid rays. A primitive is stored if it contains at least one valid ray (marked by green), it is discarded otherwise (marked by red).

3. Since the parts of the ghosts with high complexities are typically formed at the boundaries of the ray grids, other regions do not need to be represented with a dense ray grid. In this step, we attempt to merge 2×2 primitive blocks, where the primitives forming the block are sufficiently similar based on a set of conditions. On one hand, we check the validity of the primitives to ensure that the high complexity regions remain unchanged. Secondly, to preserve the complex curvatures, we determine the similarity of the edge pairs that lie on the same side of the observed primitive pair. The edges e_A and e_B face the same direction if:

$$\mathbf{e}_A = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_B = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

$$(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) < \gamma. \quad (4.2)$$

Since the primitive merging step reduces the number of primitives in regions where a detailed representation is unnecessary, its application significantly decreases the amount of data that must be processed in the other stages. Figure 4.2 visualizes several phases of the iterative primitive merging process on a generated grid.

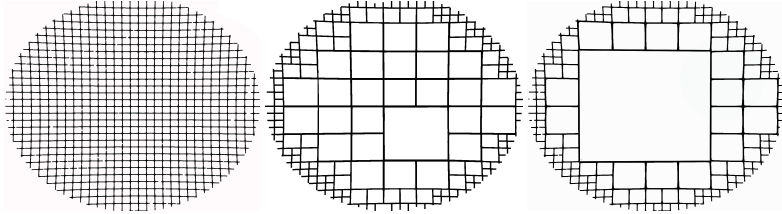


Figure 4.2: Different levels of primitive merging: no merging (left), moderate merging (middle), extensive merging (right).

4. In the next phase, we perform a two-level hierarchical grouping of the primitives that form the ghosts, based on their overlapping regions. First, we assign the primitives to a coarse tile grid. Then, using this coarse partitioning, we construct a refined grouping. To find the overlapping parts of the primitives and regions of the output image, we apply barycentric coordinates. The two-level hierarchical approach significantly increases the performance of the primitive grouping, as the coarse partitioning substantially reduces the amount of data to be processed in the refinement step at the next level. An example of the resulting tile hierarchy is shown in Figure 4.3.

5. For the final rendering, we traverse the output image on a per-pixel basis, and for each pixel we check its containing by any of the primitives.

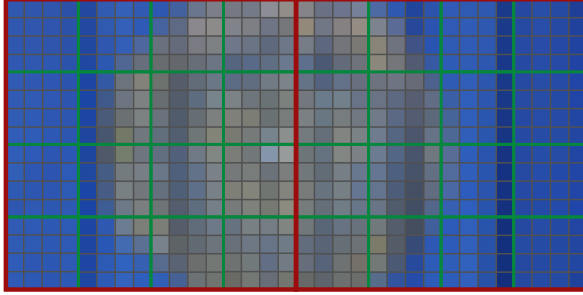


Figure 4.3: Tile hierarchy. Cells outlined in red, green, and gray denote, respectively, the coarse partitioning, the refined partitioning, and the output pixels.

During this evaluation, we take advantage of the primitive grouping, as it allows us to process only those ghost primitives that are relevant to the given region.

6. In the final step, we compute the per-pixel contributions of the primitives. We apply barycentric coordinates using the computation approach proposed by Loop and DeRose [16]. Evaluating the primitive contributions enables rendering the entire set of ghosts in a single step. As a result, the substantial memory bandwidth requirement can be eliminated.

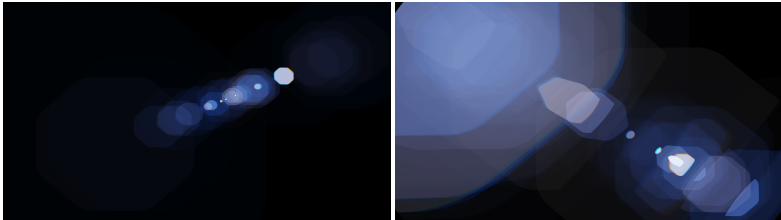


Figure 4.4: Outputs generated with our method using an Itoh (left) and a Canon lens (right).

4.1.2 Rendering lens flare ghosts using polynomial optics

One of the most computationally expensive phases of the lens flare simulation is ray tracing. Polynomial optics [10] has proven to be a promising solution in previous works. However, these studies ignored key aspects of lens flares, as well as precise validation, which limited their practical applicability.

Thesis 2

We developed a polynomial-optics-based algorithm that can simulate physically-based lens flare ghosts, even with complex optical systems. We also created a custom ray transfer model that enables the simulation of the ghosts with a reduced number of variables and polynomial terms, making it suitable for real-time environments.

Related publication: [17]

Since previous approaches based on polynomial optics focused on of-fine use of ray tracing, minimizing the number of input and output variables of the polynomial model, as well as the number of resulting polynomial terms, did not have high importance. In these models, a single polynomial system described the properties of one ghost component. As presented in the previous works [6, 10, 18, 19], this approach can lead to an increased number of polynomial terms due to the complex behavior of the aggregated relative radius and intensity terms, leading to high evaluation times.

To solve the above problem, we handled the distinct wavelengths individually and divided the input domain of incidence angles into partial local zones. For each combination of wavelength and incidence angle, we fit a separate polynomial system. This zone-based representation is shown in Figure 4.5. The partial, zone-based polynomial system can be formalized as follows:

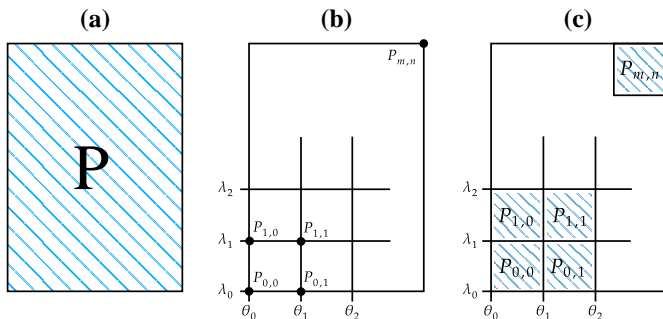


Figure 4.5: A visual comparison of the full polynomial model (a), our partial model (b) and their hybrid combination (c).

$$(x_p, y_p, r_p, \bar{r}_p) \rightarrow (x_a, y_a, x_s, y_s, \tau_s, \rho_s), \quad (4.3)$$

where (x_p, y_p) denotes the ray position on the input pupil, r_p is the radial component of the polar coordinates belonging to (x_p, y_p) , and $\bar{r}_p = 1 - r_p$. Regarding the outputs, (x_a, y_a) and (x_s, y_s) denote the position of the transmitted ray on the aperture and on the sensor, τ_s and ρ_s are the corresponding intensity and relative radius on the sensor. Figure 4.6 illustrates the relevant planes and variables involved in the process.

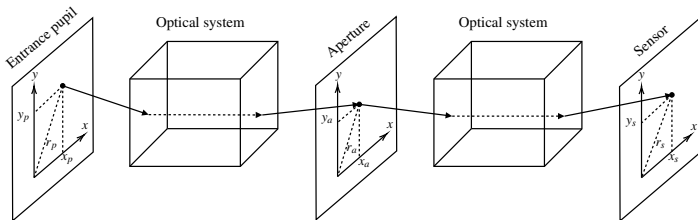


Figure 4.6: Visualization of the relevant planes and coordinate systems used by our polynomial ray transfer model.

For the efficient evaluation of the resulting polynomials during rendering, we applied a uniform system of polynomial bases for each polynomial

belonging to the same ghost. The polynomials corresponding to a given ghost can be expressed as follows:

$$p_{mn}(x) = \sum_{k=0}^t c_k^{mn} \cdot v_k, \quad v_k = \prod_{j=1}^d x_j^{l_{k,j}}, \quad (4.4)$$

where c_k^{mn} is the polynomial coefficient, v_k is the k th element of the shared polynomial basis, $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ is a d dimensional input vector of the polynomial, t is the number of the polynomial terms, $l_{k,j}$ is the power of the k th polynomial term belonging to the j th variable, and m and n are the indices of the incidence angle and the wavelength samples.

We also constructed a custom dataset to perform the fitting with our custom polynomial model. With the created fitting data, we executed the polynomial fitting iteratively, starting from a single-term polynomial and applying expansion and reduction operators. To evaluate a possible new state generated during the iterative process, we used the mean-squared error (MSE) aggregation operator:

$$\Omega(\Theta) = \frac{\sum_{\theta \in \Theta} (\omega(\theta))^2}{|\Theta|}, \quad (4.5)$$

where Θ is the full set of fitting datasets for each incidence angle, θ is the fitting dataset corresponding to a given incidence angle, and ω is the error function for a single local fitting zone. We defined ω as follows:

$$\omega(\theta) = \frac{\sum_{r \in \theta} w(r) \cdot (\hat{y}(r) - y(r))^2}{|\theta|}, \quad (4.6)$$

where r is a single fitting data entry, $\hat{y}(r)$ and $y(r)$ are the true (ray traced) and generated (using the polynomial system) values of the output variable for the entry r , and $w(r)$ is the weighting term for r . We defined $w(r)$ in the following form:

$$w(r) = \begin{cases} w_r, & \text{if } y_{min} \leq y(r) \leq y_{max} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4.7)$$

where w_r is a user-configurable parameter that depends on the validity of r , and y_{min} and y_{max} are the lowest and highest valid values for the target variable.

For the final rendering, we had to perform the polynomial evaluation. Since our model uses discrete incidence angles, we handled the intermediate angles by interpolating the rotation-dependent polynomial coefficients c_k^{mn} , then evaluated the polynomial model using the interpolated coefficients.

Considering, that our results on lens flare simulation address two different phases of the process, the methods we proposed can also be applied together. By combining the benefits of the two approaches, a larger performance improvement can be achieved. Figure 4.7 shows two outputs generated using the simultaneous application of our proposed methods.

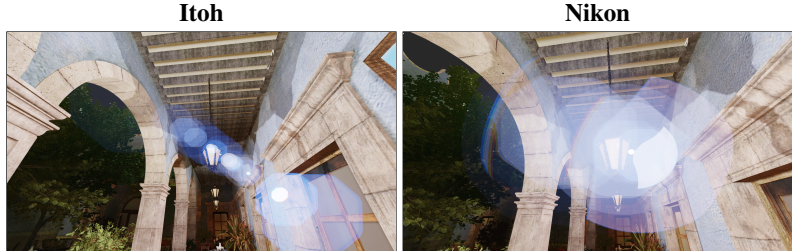


Figure 4.7: Lens flares generated with an Itoh (medium complexity) and a Nikon (high complexity) optical system using our proposed approaches, applied to the *San Miguel* scene.

4.2 Visualization framework for microscopic organism behavior

Presenting large volumes of data in a visual form makes data analysis more efficient and can reveal previously hidden information. However, scientific research tasks may produce datasets that have special properties. Visualizing such data often requires the development of personalized, application-specific systems.

Thesis 3

We developed a computational model based on barycentric coordinates that determines the position of a moving object from the relative positions of some environmental elements. We also created a visualization framework that renders behavioral data of microorganisms using the barycentric approach.

Related publications: [20, 21]

Researchers at the Institute of Psychology of the University of Debrecen analyzed structural factors involved in the evolution of microscopic organisms. During this work, they developed a model that simulates the behavior of microorganisms with different properties. The main components of the model are shown in Figure 4.8.

During the simulation, similarly to the operation of a treadmill, the microorganism does not actually change its position. Instead, analogous to a moving belt, the environmental elements of the organism shift in the opposite direction. Consequently, the system output is a time series that describes the motion indirectly.

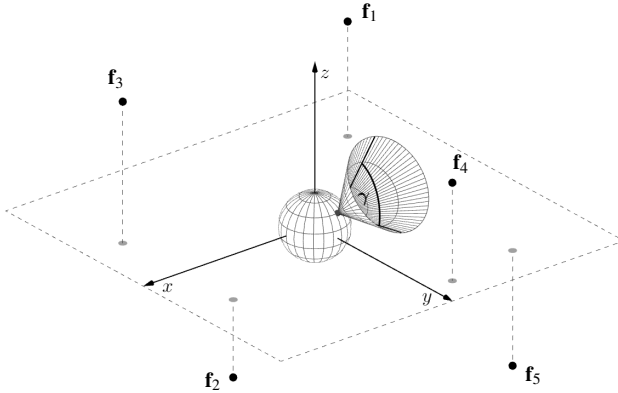


Figure 4.8: The main elements of the simulation environment.

4.2.1 Barycentric computational model

The datasets contained the positions of foods present in the environment, which were recorded from the viewpoint of the microorganism to describe the motion sequence. Since the global coordinates of the moving organism were not available, we developed an object localization algorithm based on barycentric coordinates to determine them. Because each frame was guaranteed to contain at least five environmental elements, sufficient information was available to compute the barycentric coordinates of the organism in three dimensions. The food items present in the environment were therefore used as reference points.

Let $x_{i,k}$, $y_{i,k}$ and $z_{i,k}$ ($i \in \{1,2,3,4\}$) denote the coordinates of the i th environmental reference point at step k . Let $w_{i,k}$ ($i \in \{1,2,3,4\}$) denote the barycentric coordinates of the moving object at step k with respect to the reference system defined above. Following the formulation proposed in the book by Marschner and Shirley [22], the computation can be formalized as follows:

$$A_k \cdot \mathbf{w}_k = \mathbf{b}_k, \quad (4.8)$$

where

$$A_k := \begin{pmatrix} x_{1,k} - x_{4,k} & x_{2,k} - x_{4,k} & x_{3,k} - x_{4,k} \\ y_{1,k} - y_{4,k} & y_{2,k} - y_{4,k} & y_{3,k} - y_{4,k} \\ z_{1,k} - z_{4,k} & z_{2,k} - z_{4,k} & z_{3,k} - z_{4,k} \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

$$\mathbf{w}_k := \begin{pmatrix} w_{1,k} \\ w_{2,k} \\ w_{3,k} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}_k := - \begin{pmatrix} x_{4,k} \\ y_{4,k} \\ z_{4,k} \end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

Therefore, the weights can be obtained as follows:

$$\mathbf{w}_k = A_k^{-1} \cdot \mathbf{b}_k, \quad (4.11)$$

$$w_{4,k} = 1 - \langle \mathbf{w}_k, \mathbf{1} \rangle, \quad (4.12)$$

where $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denotes the dot product, and $\mathbf{1}$ denotes the vector $(1, 1, 1)^T$. We collect the barycentric coordinates at step k into the vector $\hat{\mathbf{w}}_k$:

$$\hat{\mathbf{w}}_k := (w_{1,k}, w_{2,k}, w_{3,k}, w_{4,k})^T. \quad (4.13)$$

Since the microorganism started each motion sequence at the global origin, we were able to construct a static basis using the first frame. Based on this basis, we converted the position of the organism into the global coordinate system using the barycentric coordinates determined for each frame. To this end, let G_1 denote the matrix containing the local coordinates of the reference points in the first frame:

$$G_1 := \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & x_{4,1} \\ y_{1,1} & y_{2,1} & y_{3,1} & y_{4,1} \\ z_{1,1} & z_{2,1} & z_{3,1} & z_{4,1} \end{pmatrix}. \quad (4.14)$$

Let x_k, y_k and z_k denote the global coordinates to be determined in the k th frame, which can be obtained as follows:

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = G_1 \cdot \hat{\mathbf{w}}_k. \quad (4.15)$$

There are cases in the datasets where a food disappears and then reappears in a new position. As a direct consequence, the static basis becomes invalid and it needs to be updated. The global coordinates of the newly appeared food must be determined with the same process as in the case of the microorganism, and the static basis has to be updated to include this new element.

4.2.2 Implementation of the visualization framework

With the application of our barycentric method, we developed a three-dimensional visualization framework for supporting the progress of the research. For this reason, the preprocessing of the recorded data from the simulation model was essential. In the first step, we used our barycentric model to determine the global positions of all elements in the environment, while also handling the newly appearing and disappearing food items.

We also integrated a range of features into the framework to support the simple and transparent data analysis. The animation can be paused at an arbitrary time, it also can be stepped backward and forward, and the viewpoint can be moved to any selected sensory cell. Food items detected by at least one of the sensors are surrounded by a translucent halo. The detected food items are also connected to the sensors that perceive them. For visualizing the extent of the motion sequence, we used a bounding box around the entire scene. With these analytical tools, detailed analysis of the behavior from multiple perspectives becomes possible.

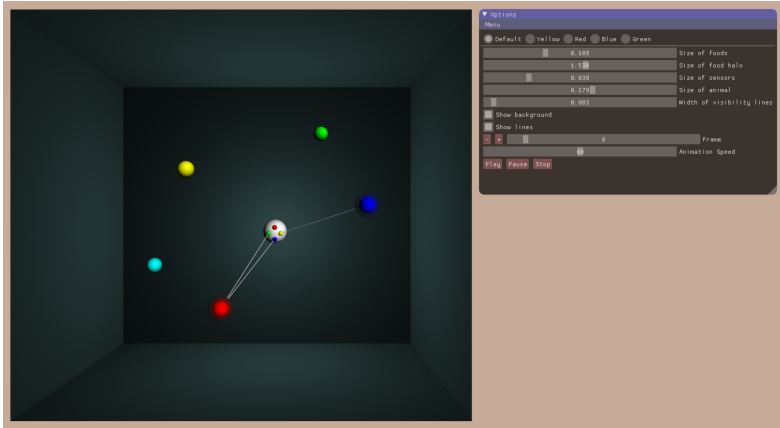


Figure 4.9: A snapshot of the visualization framework. In this scene, the central white sphere represents the moving microorganism, which detects the red food item with two sensors and the blue food item with one. The translucent halo around the detected food items indicate that they are perceived, while the links attached to the individual sensors mark the sensors that detect a given food item.

References

- [1] G. Zou, H. Bai, Y. Yuan, T. Deng, Z. Yin, and J. Wei. “Research on Flare Removal Network Based on Channel Attention Mechanism and Depthwise Over-parameterized Convolution”. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE 2023)*. New York, USA: ACM, 2024, pp. 919–926. DOI: <https://doi.org/10.1145/3652628.3652781>.
- [2] Y. Dai, Y. Luo, Z. Shangchen, C. Li, and C. C. Loy. “Nighttime Smartphone Reflective Flare Removal Using Optical Center Symmetry Prior”. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos, USA: IEEE, 2023, pp. 20783–20791. DOI: <http://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01991>.
- [3] Y. Wu, Q. He, T. Xue, R. Garg, J. Chen, and A. Veeraraghavan. “How to Train Neural Networks for Flare Removal”. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos, USA: IEEE, 2021, pp. 2219–2227. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00224>.
- [4] Z. Jin, F. Huajun, Z. Xu, and C. Yueting. “A Data Generation Method for Image Flare Removal Based on Similarity and Centrosymmetric Effect”. *Photonics* 10 (2023), 1072:1–1072:19. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10101072>.
- [5] Pixar. *The imperfect lens: Creating the look of Wall-E*. Wall-E Three-DVD Box. 2008.
- [6] E. Pekkarinen and M. Balzer. “Physically Based Lens Flare Rendering in «The Lego Movie 2»”. In: *Proceedings of the 2019 Digi-*

- tal Production Symposium*. DigiPro '19. Los Angeles, USA: ACM, 2019, 1:1–1:3. DOI: <https://doi.org/10.1145/3329715.3338881>.
- [7] B. Haycock, J. L. Campos, N. Koenraad, M. Potter, and S. Advani. “Creating headlight glare in a driving simulator”. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 61 (2019), pp. 93–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.10.006>.
- [8] T. Ritschel, M. Ihrke, J. R. Frisvad, J. Coppens, K. Myszkowski, and H.-P. Seidel. “Temporal Glare: Real-Time Dynamic Simulation of the Scattering in the Human Eye”. *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), pp. 183–192. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01357.x>.
- [9] M. Hullin, E. Eisemann, H.-P. Seidel, and 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>.
- [10] M. B. Hullin, J. Hanika, and W. Heidrich. “Polynomial Optics: A Construction Kit for Efficient Ray-Tracing of Lens Systems”. *Computer Graphics Forum* 31.4 (2012), pp. 1375–1383. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03132.x>.
- [11] G. Holló and M. Novák. “The manoeuvrability hypothesis to explain the maintenance of bilateral symmetry in animal evolution”. *Biology Direct* 7.1 (2012), 22:1–22:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/1745-6150-7-22>.
- [12] G. Holló. “A new paradigm for animal symmetry”. *Interface Focus* 5.6 (2015), 20150032:1–20150032:10. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0032>.

- [13] T. Ishikawa. “Suspension biomechanics of swimming microbes”. *Journal of The Royal Society Interface* 6.39 (2009), pp. 815–834. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0223>.
- [14] A. Compagnoni, V. Sharma, Y. Bao, M. Libera, S. Sukhishvili, P. Bidinger, L. Bioglio, and E. Bonelli. “Bioscape: A modeling and simulation language for bacteria-materials interactions”. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 293 (2013), pp. 35–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2013.02.017>.
- [15] A. Bodonyi and R. Kunkli. “Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. *Computers & Graphics* 115 (2023), pp. 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>.
- [16] C. T. Loop and T. D. DeRose. “A multisided generalization of Bézier surfaces”. *ACM Transactions on Graphics* 8.3 (1989), pp. 204–234. DOI: <https://doi.org/10.1145/77055.77059>.
- [17] A. Bodonyi, I. Csoba, and R. Kunkli. “Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials”. *The Visual Computer* 41.5 (2025), pp. 3645–3662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>.
- [18] S. Dilorio. “Optimizations for Rendering Realistic Lens Flares in Polynomial Optics”. Honors thesis. Union College Schaffer Library Special Collections. Schenectady, NY, 2015. URL: <https://arches.union.edu/do/fff31b3d-3ecb-4c4a-979d-b550dc65e38e#mode/2up>. Date of access: 19 February 2026.
- [19] E. Sabatschus. “Polyflare: Sparse Polynomial Modeling for Efficient Approximate Lens Flare Rendering”. Szakdolgozat. University of Bonn, Bonn, Germany, 2022. URL: <https://emmabyte.de/projects/polyflare/thesis.pdf>. Date of access: 19 February 2026.

- [20] A. Bodonyi and R. Kunkli. “Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 3 (2020), 18:1–18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>.
- [21] A. Bodonyi, Gy. Kurucz, G. Holló, and R. Kunkli. “A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 53 (2021), pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>.
- [22] S. Marschner and P. Shirley. *Fundamentals of Computer Graphics*. 4th ed. Boca Raton, USA: A K Peters/CRC Press, 2015. ISBN: 978-1-4822-2939-4.

List of the publications related to the dissertation

Journal papers

- [J1] **A. Bodonyi**, I. Csoba, and R. Kunkli. “Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials”. *The Visual Computer* 41.5 (2025), pp. 3645–3662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>.
SJR: Q2, IF: 3.
- [J2] **A. Bodonyi** and R. Kunkli. “Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. *Computers & Graphics* 115 (2023), pp. 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>.
SJR: Q1, IF: 2,5.
- [J3] **A. Bodonyi**, Gy. Kurucz, G. Holló, and R. Kunkli. “A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 53 (2021), pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>.
SJR: Q3.
- [J4] **A. Bodonyi** and R. Kunkli. “Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates”. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 3 (2020), 18:1–18:7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>.

Other conference talks

- [T1] **A. Bodonyi** and R. Kunkli. “Lencsefényfoltok hatékony csempealapú szintézise”. XI. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (GRAFGEO 2024). Budapest, 2024.

- [T2] **A. Bodonyi** and R. Kunkli. “Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts”. 18th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics 2023). Shanghai, China, 2023.
- [T3] **A. Bodonyi** and R. Kunkli. “Efficient tile-based lens flare rendering”. 2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS 2022). Debrecen, 2022.
- [T4] **A. Bodonyi**, Gy. Kurucz, G. Holló, and R. Kunkli. “Implementing a Barycentric Coordinates-based Visualization Framework for Movement of Microscopic Organisms”. 2020 IEEE 1st Conference on Information Technology and Data Science (CITDS 2020). Debrecen, 2020.

Poster presentation

- [P1] R. Kunkli and **A. Bodonyi**. “A Barycentric Coordinates based Object Location Determination Method for Animation Purposes”. The 12th Asian Forum on Graphic Science (AFGS 2019). Kunming, China, 2019.



Registry number: DEENK/330/2025.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Andrea Beatrix Csoba-Bodonyi
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10073731

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (1)

1. **Bodonyi, A. B.**, Kurucz, G., Holló, G., Kunkli, R.: A barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms.
Ann. Math. Inform. 53, 61-72, 2021. ISSN: 1787-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.04.006>

Foreign language scientific articles in international journals (3)

2. **Bodonyi, A. B.**, Csoba, I., Kunkli, R.: Real-time ray transfer for lens flare rendering using sparse polynomials.
Visual Comput. 41 (5), 3645-3662, 2025. ISSN: 0178-2789.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-024-03625-7>
IF: 3 (2023)
3. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Efficient tile-based rendering of lens flare ghosts.
Comput. Graph.-UK. 115, 472-483, 2023. ISSN: 0097-8493.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2023.07.019>
IF: 2.5
4. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Efficient object location determination and error analysis based on barycentric coordinates.
Vis. Comput. Ind. Biomed. Art. 3 (1), 1-7, 2020. EISSN: 2524-4442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s42492-020-00052-y>

Foreign language abstracts (2)

5. **Bodonyi, A. B.**, Kurucz, G., Holló, G., Kunkli, R.: Implementing a barycentric coordinates-based visualization framework for movement of microscopic organisms.
In: The 1st Conference on Information Technology and Data Science. Ed.: Fazekas István, Hajdu András, Debreceni Egyetem, Debrecen, 40-42, 2020.





6. Kunkli, R., **Bodonyi, A. B.**: A Barycentric Coordinates based Object Location Determination Method for Animation Purposes.
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, 149-150, 2019. ISBN: 9787893910319

List of other publications

Foreign language abstracts (1)

7. **Bodonyi, A. B.**, Kunkli, R.: Improved Algorithm for Simulating Glare in the Human Eye.
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, 130-132, 2019. ISBN: 9787893910319

Total IF of journals (all publications): 5,5

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 5,5

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

27 May, 2025

