

НИЙЛМЭЛ ДҮРСЭН ДЭЛГЭЦИЙН ГҮНИЙГ МАТРИЦАН ХААЛТ АШИГЛАЖ САЙЖРУУЛАХ НЬ

Сао Yulian, Д.Номин-Эрдэнэ, Б.Ганбат*

Монгол Улсын Их Сургууль, Хэрэглээний Шинжлэх Ухаан, Инженерчлэлийн Сургууль, Электроник, Холбооны Инженерчлэлийн Тэнхим.

Received on 2020.12.22; revised on 2020.12.27; accepted on 2020.12.31

Холбоо баригч зохиогч: ganbat@seas.num.edu.mn

Хураангуй

Гурван хэмжээт (3D) дэлгэцийн нэг төрөл болох нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн гүний хэмжээ нь бага буюу хэрэглэгчийн шаардлага хангахгүй байна. Тиймээс энэ судалгааны ажлаар гүний хэмжээг ихэсгэх шинэ арга танилцуулна. Гүнийг ихэсгэхийн тулд уламжлалт нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн линз матрицтай ижил хэмжээтэй хаалтыг нэмж байрлуулсан. Сарниулагч дээр үүсэж байгаа дүрсийг ажиглаж гүний хэмжээ хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг судалсан. Туршилтын үр дүнгээс харахад 3D дүрс нь төвөөсөө зах уруу жигд бөгөөд тод үүсэж байгаагаас дэвшүүлж буй шинэ арга нь гүний хэмжээг ихэсгэж байна. Зөвхөн хаалт байрлуулсан энэ арга нь хямд бөгөөд хялбар арга учир ирээдүйд өргөн ашиглах боломжтой.

Түлхүүр үг: Нийлмэл дүрсэн дэлгэц, элементар зураг, хаалт, гурван хэмжээт дэлгэц.

1. Удиртгал

Бид 3D-г ертөнцөд амьдардаг боловч өдөр тутмын амьдралдаа хоёр хэмжээт (2D) дэлгэц ашигладаг. Ирээдүйд бүх дэлгэц 3D болох нь гарцаагүй юм. Тиймээс судлаачид 3D дэлгэцийг хөгжүүлж хэрэглээнд нэвтрүүлэхийг зорьж байна. Линз матриц болон 2D дэлгэцийг ашиглан нийлмэл дүрс (Lippmann, G. 1908) үүсэх нь бусад технологиудтай харьцуулахад бүтцийн хувьд хялбархан, босоо хэвтээ тэнхлэгийн дагуу 3D харах боломжтой, олон хэрэглэгч зэрэг үздэг гэх мэт олон давуу талтай байдаг. Иймээс тусгай нүдний шил шаардахгүй, бүрэн параллакс бөгөөд 3D динамик дүрсийг харуулах боломжтой, автостероскоп 3D дэлгэц (Sandin, D. 2005, Dodson, N. 2005) буюу нүдний шилгүйгээр 3D үздэг арга нь судлаачдын анхаарлыг татдаг (Davies, N. 1994, McCormick, M. 1993, Manolache, S. 2001, Forman, M. 2003, Arai, J. 1998). Хэдийгээр олон давуу талтай боловч нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн харагдах өнцөг бага (Dalkhaa, N.-E., Densmaa, B. 2015), нягтшил бага (Densmaa, B. 2017), гүний хэмжээ бага байдаг. Бид нар энэ судалгааны ажлын гүний талаар авч үзсэн.

Heejin (Heejin, C. 2001) нар шаталсан линз матриц буюу нийлсэн линз матриц ашиглан 3D дэлгэцийн нийлмэл дүрсийн гүнийг ихэсгэсэн боловч нийлмэл дүрсэн дэлгэцийг томоор хийхэд зузаан болдог дутагдалтай.

Jisoo Hong (Jisoo, H. 2004) нар өөр өөр оптик

замаар явуулж гүний хэмжээг ихэсгэх 2 арга санал болгосон. Уг арга нь долгион хуваагч болон туйлшруулагч ашиглах замаар дэлгэц, линз матриц хоорондох зайг өөрчилж гүний хэмжээг ихэсгэдэг. Эхний арга нь механик хөдөлгөөн хийдэг сул талтай.

Yunhee Kim (Yunhee, K. 2006) нар олон давхар дэлгэц ашиглаж гүний хэмжээг ихэсгэх арга санал болгосон. Уг арга нь 2D дэлгэц болон 2 тунгалаг дэлгэц ашигладаг. Линз матрицаас өөр өөр зайд байгаа 2D дэлгэцүүд өөр өөр зайд 3D дүрс үүсгэдэг учраас энэ арга нь гүнийг хэмжээг ихэсгэсэн. Хэдий тийм боловч олон давхар дэлгэцүүд нь гэрлийн эрчмийг бууруулдаг болон давхар дүрс үүсгэдэг сул талтай.

Sung-Wook Min (Sung-Wook, M. 2003) нар хоёр нийлмэл дүрсэн дэлгэцийг долгион хуваагчаар нэгтгэж харуулах арга санал болгосон. Уг арга нь хоорондоо перпендикуляр байрласан хоёр дэлгэцийг хагас толь ашиглан нэгтгэж үзүүлснээр гүнийг 2 дахин ихэсгэдэг. Уг арга нь хоёр дэлгэц ашигладаг учраас овор хэмжээ ихтэй болдог сул талтай.

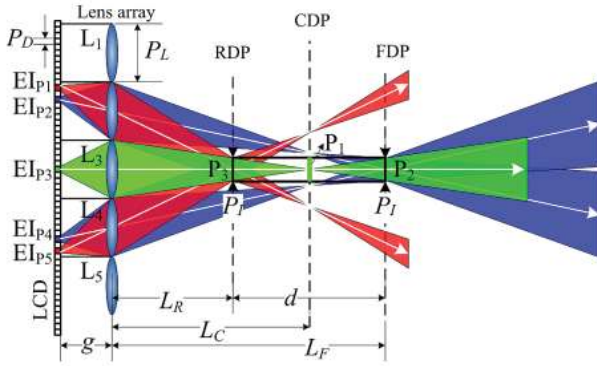
Энэхүү судалгааны ажлаар уламжлалт нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн линз матрицын урд хаалт нэмж байрлуулан нийлмэл дүрсийн гүнийг ихэсгэх шинэ аргыг танилцуулна.

2. Нийлмэл дүрсийн гүний хэмжээ

Нийлмэл дүрсэн дэлгэц нь 2D дэлгэц ба линз матрицаас тогтох бөгөөд Зураг 1-д тус дэлгэцийн бүтцийг харуулав. Линз матрицын нэг жижиг линз болгон нь элементар зургийг Central Depth Plane (CDP) дээр нийлмэл дүрсийг бий болгодог. L_C буюу линз матрицаас CDP хүртэлх зайг Gaussian линзийн томьёог ашиглан олбол:

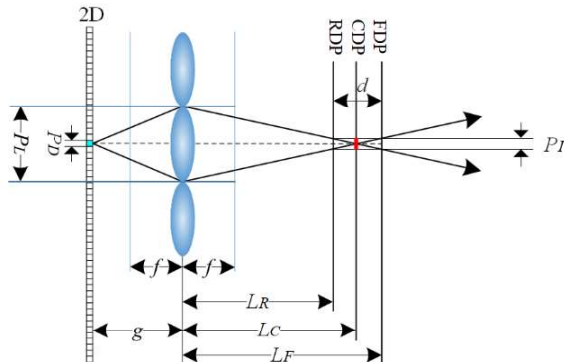
$$L_C = \frac{f \cdot g}{g - f}, \quad (1)$$

энд g зай нь 2D дэлгэцээс линз матриц хүртэлх зай бөгөөд f нь линз матрицын фокусын урт болно.



Зураг 1. Нийлмэл дүрсэн дэлгэц дээрх гэрлийн цацрагийн тархалт.

Элементар зураг нь линз матрицаар нэвтэрч CDP дээр тод 3D нийлмэл дүрсийг үүсгэдэг. CDP-ийн зайнаас холдох тусам нийлмэл дүрсийн нэг цэгийн хэмжээ нь том болж дүрс сарних бөгөөд нийлмэл дүрсийг тайрсан мэт зургийн эффект, давхардсан дүрсийн эффект үүсэж нийлмэл дүрс гаждаг. Энэ гажилтаас болж гүний хэмжээ нь бага болдог. Хэдий тийм боловч гүнийг хэмжээг нарийн тодорхойлсон аргачлал байхгүй байна. Иймээс нийлмэл дүрсийн гүний хэмжээг нарийн тодорхойлох хэрэгтэй.



Зураг 2. Нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн бүтэц.

Нийлмэл дүрсийн нэг цэгийн хэмжээ P_I ба 2D дэлгэцийн нэг цэгийн хэмжээ P_D -ийг Зураг 2-оос авч үзье. Нийлмэл дүрсийн нэг цэгийг P_I

гэж тэмдэглэх бөгөөд хэмжээг геометр оптикоор олбол:

$$P_I = \frac{L_C \cdot P_D}{g}, \quad (2)$$

энд P_D нь 2D дэлгэцийн нэг цэгийн хэмжээ юм. Front Depth Plane (FDP) ба Rear Depth Plane (RDP)-ийн хоорондох зайг нийлмэл дүрсийн гүний хэмжээ гэх бөгөөд гүний хэмжээг тодорхойлъё.

Зураг 1-д үзүүлснээр 2D дэлгэцийн цэгүүд болох EI_{P2} , EI_{P3} , EI_{P4} -ээс цацарсан гэрэл нь линз матрицын L_2 , L_3 , L_4 -р линзээр FDP-д огтлолцоно. CDP-ийн урд талд байрласан P_2 цэг болон CDP-ийн ар талд байрласан P_3 цэг нь нийлмэл дүрсийн нэг цэгийн хэмжээ P_I -тай тэнцэнэ. FDP-ийн байршил L_F болон RDP-ийн байршил L_R -ийг олбол:

$$L_F = \frac{L_C \cdot (P_L + P_I)}{P_L}, \quad (3)$$

$$L_R = \frac{L_C \cdot (P_L - P_I)}{P_L}, \quad (4)$$

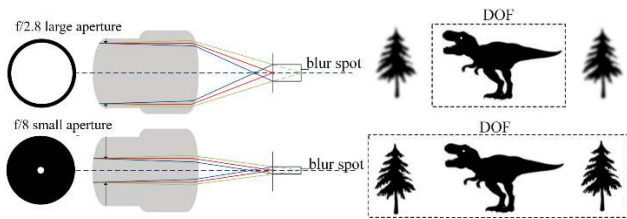
энд P_L нь линз матрицын нэг линзийн хэмжээ юм. Томьёо (3) ба (4)-өөс нийлмэл дүрсийн гүнийг олбол:

$$d = L_F - L_R = \frac{2 \cdot L_C \cdot P_I}{P_L}. \quad (5)$$

Туршилтад ашиглах линз матриц $P_L=50$ мм, фокусын урт $f=90$ мм, 2D дэлгэцийн цэгийн хэмжээ $P_D=0.6$ мм, линз матрицаас 2D дэлгэц хүртэл $g=120$ мм гээд гүний хэмжээг Томьёо (5)-аас олбол $d=25.92$ мм буюу нийлмэл дүрсийн гүний хэмжээ бага юм. Тиймээс гүний хэмжээг ихэсгэх шаардлагатай юм. Энэхүү өгүүлэлд нийлмэл дүрсийн гүний хэмжээг ихэсгэхдээ камерын өрцийг (Aperture) өөрчлөх буюу линз матрицын линз бүрийн урд хаалт байрлуулсан аргыг танилцуулъя.

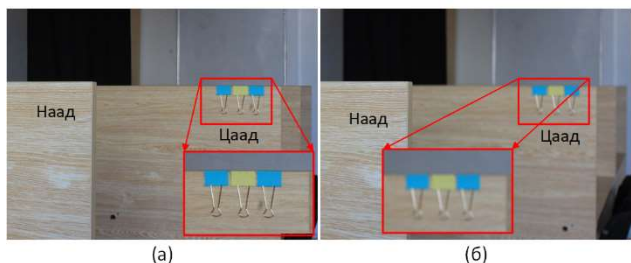
3. Хаалт ашиглах арга

Зураг 3-ыг авч үзье, камерын өрц (Aperture) их буюу $f/2.8$ үед өмнө болон хойно байгаа модны зураг фокусгүй буюу гүний хэмжээ (Depth of field) бага байна. Камерын өрц бага буюу $f/8$ үед өмнө болон хойно байгаа модны зураг тод байгаас гүний хэмжээ их гэж дүгнэж болно. Энд f нь камерын линзийн фокусын зай болно. Үүнээс камерын өрц нь бага байх тусам гүний хэмжээ ихэснэ.



Зураг 3. Камерын өрц.

Зураг 4-д камерын өрцийн хэмжээ их болон бага үед авсан зургийг харьцуулан үзүүлэв. Зураг 4(a)-д наад талд болон цаад талд байгаа нь тод харагдаж байна.



Зураг 4. Камерын өрцийн хэмжээ (a) бага болон (б) их үед авсан зураг.

Зураг 4(б)-д наад талд байгаа нь тод, цаад талд байгаа нь бүдэг харагдаж байна. Үүнээс камерын өрцийн хэмжээ бага байвал гүний хэмжээ ихсэх нь харагдаж байна. Тиймээс бид линз матрицын өмнө хаалт ашиглаж нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн гүнийг ихэсгэж болох санааг дэвшүүлж байна.

4. Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

Хоёр төрлийн туршилт хийсэн. Нэгдүгээр туршилтаар хаалт нь гүний хэмжээнд хэрхэн нөлөөлж байгааг судалсан. Хоёрдугаар туршилтаар хаалт ашигласан үед нийлмэл дүрсийн дэлгэцийн гүний хэмжээ хэрхэн нэмэгдэж байгааг туршсан.

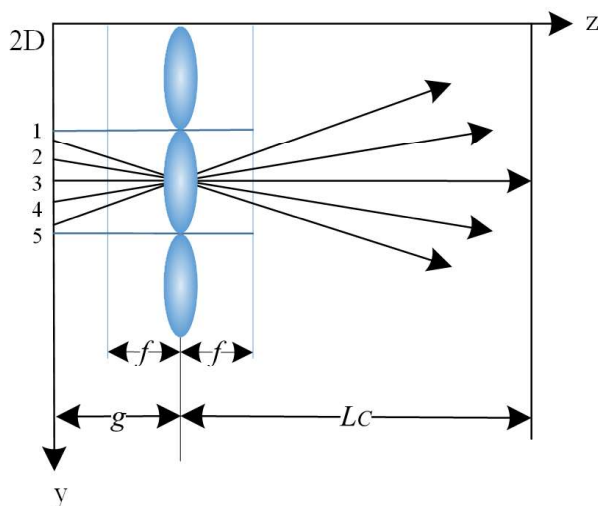
4.1 Гүн хаалтын хэмжээнээс хамаарах туршилт

Хаалтын хэмжээ линзийн гүнд хэрхэн нөлөөлж байгааг гурван тохиолдолд харьцуулан туршсан. Туршилтад $5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$ хэмжээтэй тэгш өнцөгт линз матриц ашиглах учраас ижил хэмжээтэй хаалт хийж төвд нь $3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ болон $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$ хэмжээтэй хоёр төрлийн хаалт үүсгэснийг Зураг 5-д харуулав. MATLAB-ыг ашиглан $5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$ хэмжээтэй хар квадратын төвд $3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ болон $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$ хэмжээтэй цагаан дүрс үүсгээд цаасан дээр хэвлэж цагаан хэсгийг ухаж аван хаалтаа хийсэн.



Зураг 5. Хаалтын хэмжээ (a) $3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ болон (б) $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$.

MATLAB-ыг ашиглан талын урт нь 5 см болох цагаан хүрээтэй хар квадратаа нэг линзийн ард байрлуулаад, хоорондоо 14 мм зайтай таван цэг үүсгэж 2D дэлгэц дээр байрлуулсныг Зураг 6-д үзүүлэв.

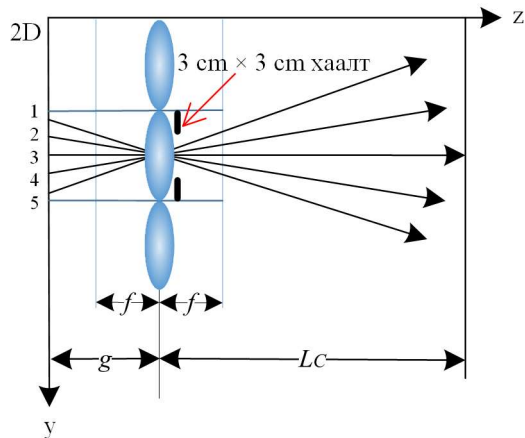


Зураг 6. Хаалтгүй үеийн таван цэгийн гэрлийн тархалт.

Тухайн таван цэгийн дүрс үүсэж байгаа зайг хэмжихдээ сариулагч ашигласан бөгөөд хамгийн тод дүрс үүсэж байгаа зайг тухайн цэгийн зай гээд хэмжилт хийсэн. Тод дүрс гэдэг нь фокус сайтай хамгийн бага сарнисан дүрсийг хэлнэ. Хоёр хэмжээст дэлгэц дээрх 3-р цэгийн гэрэл нь линзээр нэвтэрч CDP-д буюу линз матрицаас 360 мм -ийн зайд тод дүрс үүссэн. Хоёрдугаар болон 4-р цэгийн гэрэл нь CDP-ын ард буюу линзээс 310 мм -ийн зайд тод дүрс үүссэн, 1 болон 5-р цэгийн гэрэл нь CDP-ын ард буюу линзээс 280 мм -ийн зайд тод дүрс үүссэн.

Зураг 7-д $3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ хэмжээтэй хаалтыг линзийн урд байрлуулсныг үзүүлэв. Хаалт нь $3 \text{ см} \times 3 \text{ см}$ -ийн хэмжээтэй үед өмнөх туршилтыг давтсан бөгөөд 3-р цэгийн гэрэл нь линзээр дамжин CDP-д тод дүрс үүссэн. Хоёрдугаар болон 4-р цэгийн гэрэл нь CDP-ын ард буюу линзээс 330 мм -ийн зайд тод цэг үүсэж, 1 болон 5-р цэгийн гэрэл нь CDP-ын ард буюу линзээс 290 мм -ийн

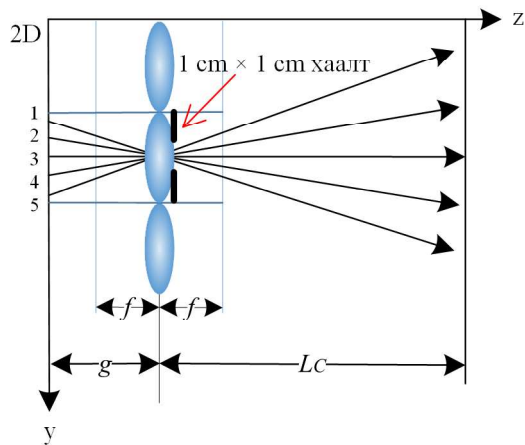
зайд тод дүрс үүссэн.



Зураг 7. 3 см × 3 см хэмжээтэй хаалттай үеийн таван цэгийн гэрлийн тархалт.

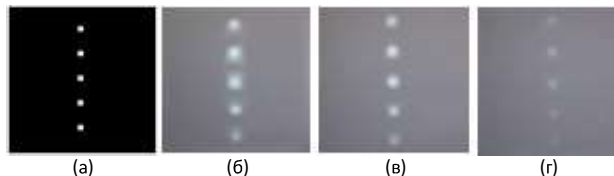
Зураг 8-д 1 см × 1 см хэмжээтэй хаалтыг линзийн урд байрлуулсныг үзүүлэв. Хаалт нь 1 см × 1 см-ийн хэмжээтэй үед 3-р цэгийн гэрэл нь CDP-д тод дүрс үүссэн. Хоёрдугаар болон 4-р цэгийн гэрэл нь линзээс 356 мм-ийн зайд тод дүрс үүссэн, 1 болон 5-р цэгийн гэрэл нь линзээс 355 мм-ийн зайд тод дүрс үүссэн.

Хоёр хэмжээст дэлгэц дээр үзүүлсэн таван цэг болон тэдгээрийн зургийг хаалтгүй, 3 см × 3 см хаалттай болон 1 см × 1 см хаалттай үед сарниулагчаа CDP дээр буюу 360 мм зайд байрлуулаад эгц урд талаас камераар авсан нийлмэл дүрсийг Зураг 9-д үзүүлэв. Зураг 9(а)-д таван цэгийн 2D дэлгэц дээр харагдаж байгааг үзүүлэв. Зураг 9(б)-д хаалтгүй үед таван цэгийн линзээр нэвтэрсэн зураг нь том бөгөөд голоосоо зах уруу бүдгэрсэн байна. Зураг 9(в)-д 3 см × 3 см-ийн хаалттай үед таван цэгийн линзээр нэвтэрсэн зураг нь голоосоо зах уруу бүдгэрсэн нь багассан байна.



Зураг 8. 1 см × 1 см хэмжээтэй хаалттай үеийн таван цэгийн гэрлийн тархалт.

Зураг 9(г)-д 1 см × 1 см-ийн хаалттай үед таван цэгийн линзээр нэвтэрсэн зураг нь голоосоо зах уруу бүдгэрээгүй жигд гарсан. Туршилтын үр дүнгээс үзвэл хаалттай үед гүний хэмжээ ихсэж байна.

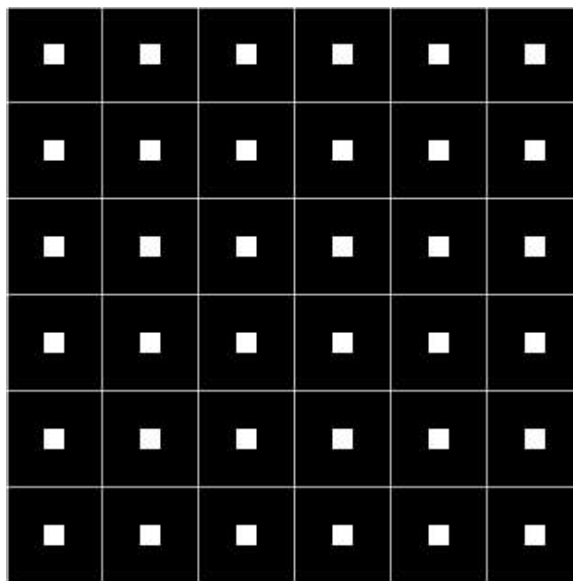


Зураг 9. Туршилтын үр дүн. (а) Таван цэг тэдгээрийн дүрс (б) хаалтгүй, (в) 3 см × 3 см-ийн хаалттай болон (г) 1 см × 1 см-ийн хаалттай үед.

4.1 Хаалт ашиглаж гүний хэмжээг ихэсгэх туршилт

Өмнөх туршилтын үр дүнгээс харвал 1 см × 1 см хэмжээтэй хаалт нь гүний хэмжээг 3 см × 3 см хаалтаас илүү ихэсгэсэн учраас 1 см × 1 см хэмжээтэй хаалтыг нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн гүний хэмжээг ихэсгэх туршилтад ашигласан.

Матрицан хаалтыг хийхдээ линз матрицын нэг линзийн хэмжээтэй адилхан буюу 5 см × 5 см хэмжээтэй хар квадратуудын төвд нь 1 см × 1 см хэмжээтэй цагаан квадрат үүсгэснийг Зураг 10-д үзүүлэв. Уг үүсгэсэн зургийг цагаан цаасан дээр хэвлээд доторх цагаан хэсгийг ухаж авсан. Матрицан хаалтыг линз матрицын урд линзийн хэмжээнд тааруулж байрлуулсан.



Зураг 10. Матрицан хаалт.

Туршилтад нэг линзийн хэмжээ нь 5 см × 5 см тэгш өнцөг линз матриц болон 2D дэлгэц ашигласан. Эдгээрийн параметрийг Хүснэгт 1-д үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Туршилтын параметр.

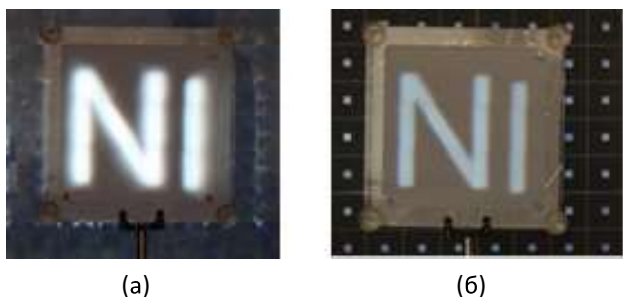
№	Зориулалт	Үзүүлэлт
1	Линз матрицын элементар линзийн тоо	12 (Б) × 16 (Х)
2	Линз матрицын хэмжээ	50 мм × 50 мм
3	Линз матрицын фокусын зай	90 мм
4	2D дэлгэцээс линз матриц хүртэлх зай	120 мм
5	2D дэлгэцийн нэг цэгийн хэмжээ	0.6 мм
6	Нийлмэл 3D дүрсийн нэг цэгийн хэмжээ	1.8 мм

Зураг 11-д MATLAB ашиглан ‘N’ болон ‘I’ хоёр дүрсийн элементар зургийг үүсгэснийг үзүүлэв. ‘N’ болон ‘I’ хоёр дүрсийн 3D нийлмэл дүрсийн байршлыг тодорхойлохын тулд сарниулагч ашиглаж, сарниулагч дээр тод дүрс үүсэж байгаа зайг тухайн дүрсийн гүний зай гэж үзсэн.



Зураг 11. N болон I-ийн элементийн зураг.

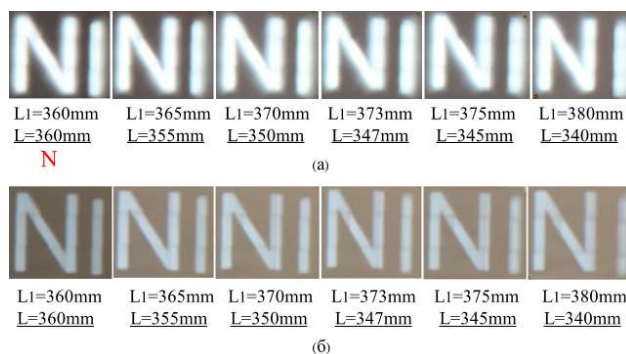
Эхлээд ‘N’ болон ‘I’-ыг CDP дээр буюу 360 мм зайд үүсэхээр элементар зургийг үүсгээд хаалттай болон хаалтгүй үед авсан нийлмэл дүрсийг Зураг 12-д үзүүлэв.



Зураг 12. Нийлмэл дүрс ‘N’ болон ‘I’ (а) хаалтгүй болон (б) хаалттай үеийн туршилтын үр дүн.

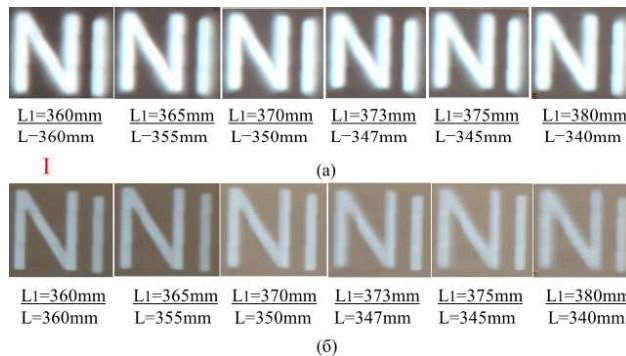
Зураг 12(а)-д хаалтгүй үед ‘N’ болон ‘I’ зураг нь том бөгөөд голоосоо зах уруу бүдгэрсэн, Зураг 12(б)-д хаалт байрлуулсан үед зураг нь голоосоо зах уруу бүдгэрээгүй жигд гарсан.

‘N’ болон ‘I’ хоорондох зайг CDP-ээс буюу 360 мм-ээс эхлээд ‘N’ зай L1-ийг 380 мм, ‘I’ зай L-ийг 340 мм хүртэл 5 мм-ийн алхамтайгаар сарниулагчийн байрлалыг өөрчилж 2 бүлэг туршилт хийж уламжлалт аргатай харьцуулсан. Эхний туршилт нь ‘N’ дүрс дээр сарниулагчийг байрлуулж туршсан бөгөөд үр дүнг Зураг 13-д үзүүлэв.



Зураг 13. ‘N’ дээр сарниулагчийг байрлуулсан бөгөөд (а) хаалтгүй болон (б) хаалттай үеийн туршилтын үр дүн.

Дараагийн туршилт нь ‘I’ дээр сарниулагчийг байрлуулж өмнөх туршилтыг давтсан бөгөөд туршилтын үр дүнг Зураг 14-д үзүүлэв. Зураг 13(а) болон (б)-ийн хамгийн сүүлийн хоёр ‘N’ дүрсийг харьцуулан үзье, хаалтгүй үед ‘N’ нь голоосоо зах уруу бүдгэрсэн байна, хаалттай үед ‘N’ нь голоосоо зах уруу жигд гарсан байна. Зураг 14(а) болон (б)-ийн хамгийн сүүлийн хоёр ‘I’ дүрсийг харьцуулахад өмнөхтэй адил үр дүн гарсан.



Зураг 14. ‘I’ дээр сарниулагчийг байрлуулсан үед (а) хаалтгүй болон (б) хаалттай үеийн туршилтын үр дүн.

Хаалт ашигласан үед нийлмэл ‘N’ болон ‘I’ дүрс L1= 380 мм болон L=340 мм зайд уусаагүй жигд үүсэж байгаас тухайн мужид 3D нийлмэл дүрс амжилттай үүссэн гэж дүгнэж болно. Тиймээс энэ хоёр зайны зөрөөгөөр гүний хэмжээг тодорхойлох бөгөөд гүн нь 40 мм буюу уламжлалт нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн гүний хэмжээнээс 15 мм-ээр их байна. Туршилтын үр дүнгээс матрицан хаалт ашиглах шинэ арга нь гүний хэмжээг ихэсгэж байна.

5. Дүгнэлт

Уг судалгааны ажлаар нийлмэл дүрсэн дэлгэцийн гүний хэмжээг ихэсгэхийн тулд хаалт ашигласан шинэ аргыг танилцуулав. Туршилтын үр дүнгээс харахад линз матрицын урд хаалт байрлуулснаар 3D дэлгэцийн нийлмэл дүрсийн

гүний хэмжээ ихэссэн боловч нийлмэл дүрсийн гэрэлтүүлэг буурч байна. Зөвхөн хаалт байрлуулах энэ аргыг ямар ч нийлмэл дүрсийн дэлгэцэд ашиглах боломжтой юм. Хэдийгээр энэ арга нь хялбархан боловч дүрсийн эрчмийг бууруулдаг сул талтай. Дүрсийн эрчмийг сайжруулах цаашдын судалгааны ажилдаа авч үзнэ.

Талархал

Энэхүү дипломын ажлыг гүйцэтгэхэд гүн тусалцаа үзүүлсэн удирдагч проф. Б.Ганбат багшдаа талархал илэрхийлье. Алдаа оноо болгоныг минь залруулж чиглүүлж өгсөн багшдаа баярлалаа. Мөн ХШУИС-ийн электроник, холбооны инженерчлэлийн тэнхимийн нийт багш нартаа талархал илэрхийлж байна.

Зохиогчийн оролцоо

Уг судалгааг Б.Ганбат дизайн хийж, дүн шинжилгээ хийсэн. Д. Номин-Эрдэнэ дэлгэцийн тохиргоог хийсэн. С.Yulian туршилтын хэмжилтийг хийж өгүүллийг бичсэн.

Ном зүй

- Lippmann,G. (1908) La photographie integrale. *Comptes-Rendus Acad. Sci.*, **146**, 446-451.
- Sandin,D. J., Margolis,T., Dawe,G., Leigh,J., and DeFanti,T. A. (2005) Varrier auto stereographic display. *Proc. SPIE.*, **4297**, 204-211.
- Dodson,N. A. (2005) Autostereoscopic 3D displays. *Computer*, **38**, 31-36.
- Davies,N., McCormick,M., and Brewin,M. (1994) Design and analysis of an image transfer system using microlens arrays. *Opt. Eng.*, **33**, 3624-3633.
- McCormick,M. and Davies,N. (1993) Full natural colour 3D optical models by intgral imaging. *Fourth Int. Conf. on Holographic Syst., Compon. and Appl.*, (Neuchatel, Switzerland), 237-242.
- Manolache,S., Aggoun,A., McCormick,M., Davies,N., and Kung,S.-Y. (2001) Analytical model of a threedimensional integral image recording system that uses circular and hexagonal-based spherical surface micro lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, **18**, 1814-1821.
- Forman,M.C., Davies,N., and McCormick,M. (2003) Continuous parallax in discrete pixelated integral threedimensional displays. *J. Opt. Soc. Am.*, **20**, 411-420.
- Arai,J., Okano,F., Isono,H., and Yuyama,I. (1998) Gradient-index lens array method based on real

time integral photography for three-dimensional images. *Appl. Opt.*, **37**, 2034-2045.

- Dalkhaa,N.-E., Densmaa,B., and Baasantseren,G. (2015) Nonuniform viewing angle of integral imaging display. *Jnl Soc Info Display*, **23**, 457– 463.
- Densmaa, B., Nomin-Erdene, D., Munkh-Uchral, E., Nam, K., Ganbat B. (2017) Point light source display with a large viewing angle using multiple illumination sources. *Opt. Eng.*, **56**, 053113.
- Heejin,C., Jae-Hyeung,P., Jisoo,H., and ByoungHo,L. (2001) Depth-enhanced integral imaging with a stepped lens array or a composite lens array for three-dimensional display. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 730-731.
- Jisoo,H., Jae-Hyeung,P., Sungyong,J., and ByoungHo, L. (2004) Depth-enhanced integral imaging by use of optical path control. *Opt. Lett.*, **29**, 1790-1792.
- Yunhee,K., Jae-Hyeung,P., Heejin,Ch., Joohwan,K., Seong-Woo,Ch., and ByoungHo, L., (2006) Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices. *Appl. Opt.*, **45**, 4334-4343.
- Sung-Wook, M., Bahram,J., and ByoungHo, L. (2003) Enhanced three-dimensional integral imaging system by use of double display devices. *Appl. Opt.*, **42**, 4186-4195.