

# Комплекс моделийн гурван хэмжээст гадаргууг байгуулах хосолсон арга

Н.Түмэндэлгэр<sup>1</sup>, Ж.Даваацэрэн<sup>2,3</sup>, С.Уянга<sup>1</sup>, Х.Оюундолгор<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МУИС, ХШУИС, Мэдээлэл, Компьютерийн Ухааны Тэнхим

<sup>2</sup>МУИС, ХШУИС, Хэрэглээний Математикийн Тэнхим

<sup>3</sup>БСШУСЯ-ны харьяа Соёлын Өвийн Төв

Цахим шуудан: oyundolgor@seas.num.edu.mn

**Хураангуй** — Энэхүү өгүүлэлд гурван хэмжээст модель байгуулах лазер сканнер болон тооцон бодох фото зургийн аргуудын сул ба давуу талуудыг тодорхойлж, лазер сканнераар хэмжих боломжгүй гадаргууг тухайлбал, комплекс моделийн нуугдмал хэсгүүдийг тооцон бодох фото зургийн аргаар алдаа багатай нөхөх, комплекс моделийг хэрхэн байгуулах талаар танилцуулна.

*Түлхүүр үг* — *комплекс модель, 3 хэмжээст лазер сканнер, 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөл, 3 хэмжээст модель, фото зураг, фото скан*

## I. УДИРТГАЛ

Компьютер графикын шинжлэх ухаан нь сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хөгжиж байгаа салбар бөгөөд анагаах ухаан, урлаг, аж үйлдвэр, археологи зэрэг бүхий л салбарт нэвтэрч тэдгэрийн салшгүй нэг хэсэг болоод байна. Компьютер график нь математик, физик, инженерийн ухаан зэрэг олон салбарын огтлолцол дээр байдаг судалгааны томоохон салбар юм.

Хэрэглээнээс үүдсэн шаардлагын дагуу 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөлд математик боловсруулалт хийх олон төрлийн судалгааны ажлуудыг дэлхийн олон орны эрдэмтэд хийж байна. Эдгээр судалгааны үр дүнгүүд нь амьдрал ахуйд нэвтэрснээр эдийн засгийн өндөр үр өгөөжийг авчирдаг. Тухайлбал, энэ технологийг урвуу инженерчлэл, уул уурхай, хөдөө аж ахуй, анагаах ухаан, барилга, хот байгуулалт, хот төлөвлөлт, археологи зэрэг олон салбарт нэвтрүүлэн ашиглаж байна. Сүүлийн үед өндөр хурдацтай хөгжиж байгаа 3 хэмжээст хэвлэх технологийн нэг үндэс суурь нь энэхүү технологи болж байна. Түүнчлэн 3 хэмжээст дижитал технологийг ашиглаж археологийн болон соёлын өвийн ховор дурсгалуудыг өндөр нарийвчлалтай дижитал хэлбэрт оруулж, соёлын өвийг хойч үедээ үлдээх боломж олгож байна. Дэлхийн өндөр хөгжилтэй олон оронд өөрсдийн соёлын үнэт өв, дурсгалыг өндөр нарийвчлалтай 3 хэмжээст дижитал хэлбэрээр хадгалж, сан бүрдүүлэх ажлыг хийж байна.

Гурван хэмжээст модель байгуулах процесс нь 3 үндсэн үе шаттай: эхний үе шат буюу цэгэн өгөгдөл цуглуулах; дунд шат буюу цуглуулсан өгөгдлөө математик аргаар боловсруулж торолсон модель байгуулах; эцсийн шат буюу байгуулсан 3 хэмжээст моделийн дутуу хэсгийг нөхөж гүйцээх. Бид энэхүү ажилд эцсийн шат буюу байгуулсан 3 хэмжээст моделийн дутуу хэсгүүдийг нөхөж гүйцээх талаар авч үзнэ.

Биетийг скан хийж цэгэн өгөгдлийг бүртгэж авахад тухайн биетийн геометр болон топологи бүтцээс хамаарч олон талаас нь скан хийж цэгэн өгөгдлийг бүртгэж авдаг. Гэвч зарим төвөгтэй бүтэц бүхий моделийн хувьд өндөр муруйлттай эсвэл далд орших гадаргууг лазер сканнер гэх мэт хэмжих төхөөрөмжөөр хэмжилт хийх боломжгүй байдаг. Эдгээр хэмжилт хийж чадаагүй хэсгүүдээс шалтгаалан 3 хэмжээст модель байгуулах явцад модель дээр том, жижиг янз бүрийн дутуу хэсгүүд буюу нүх үүсдэг. Эдгээр нүхийг тухайн моделийн геометр шинж чанарыг алдагдуулахгүйгээр нөхөх явдал нь нэг чухал судалгааны асуудал юм.

Одоо ашиглаж байгаа нүх бөглөх аргууд нь гадаргуун муруйлт [1], цэгүүдийн нормаль вектор [2] зэрэг өгөгдлүүдийг ашиглан тасралтгүй гөлгөр гадаргуу байхаар нүхийг бөглөдөг. Хэдийгээр эдгээр аргууд нь хэрэглэхэд хялбар боловч биетийн нүхэн дээр байсан зарим чухал геометр мэдээллийг алдагдуулах дутагдалтай байдаг.

Бид энэхүү судалгааны ажилдаа биетийн 3 хэмжээст моделийг байгуулахад үүссэн дутуу хэсэг буюу том хэмжээний нүхийг бөглөх фотограмметр (тооцон бодох фото зураг)-ийн аргад суурилсан шинэ аргыг танилцуулна. Энэ аргын үндсэн санаа нь биетийн дутуу хэсгийг фото зургуудын тусламжтайгаар байгуулж математик тооцооллын тусламжтай бөглөх явдал юм. Бидний боловсруулсан аргын давуу тал нь дутуу хэсгийг бөглөхдөө тэр хэсэгт агуулагдаж байгаа онцлог шинж чанарыг алдагдуулахгүйгээр сэргээж байгаа явдал юм.

Өөрөөр хэлбэл бид 3 хэмжээст моделийг байгуулахдаа цэгэн өгөгдөл цуглуулах аргыг фотограмметрын аргатай хослуулан хэрэглэсэн.

Өөрсдийн боловсруулсан аргаа ашиглан Өндөр гэгээн Г.Занабазарын хосгүй үнэт бүтээлүүдийн нэг болох “Цагаан дара эх” бүтээлийн 3 хэмжээст моделийг байгуулсан (Зураг 1).



Зураг 1. “Цагаан дара эх” бурханы урд, хойд талаасаа харагдах срөнхий байдал.



Зураг 2. Лазерь сканнер хүрч хэмжилт хийх боломжгүй хэсгүүд.

Энэхүү бурхан нь хийцийн хувьд маш нарийн учраас зарим хэсэгт лазерь сканнераар хэмжилт хийх боломжгүй байсан. Лазерь сканнер хүрч хэмжилт хийх боломжгүй хэсгүүдийг Зураг 2-т харуулав.

## II. БИЕТИЙН МОДЕЛЬ ДЭЭРХ НҮХИЙГ БӨГЛӨХ МАТЕМАТИК АРГУУД

Одоогоор 3 хэмжээст модель дээрх нүхийг бөглөх олон янзын аргууд судлагдсан бөгөөд эзэлхүүнд суурилсан болон гадаргууд суурилсан гэх үндсэн 2 төрлийн арга байдаг. Эзэлхүүнд суурилсан аргууд [3], [4], [5] нь торолсон гадаргууг эзэлхүүнт дүрслэлд шилжүүлж янз бүрийн техник ашиглан эзэлхүүний огторгуйд нүхийг бөглөх явдал юм. Эдгээр аргууд нь тогтвортой бөгөөд гадаргуу дээрх төвөгтэй нүхнүүдийг бөглөх боломжтой байдаг. Гэвч энэхүү арга нь тооцоолол маш их шаарддаг дутагдалтай юм.

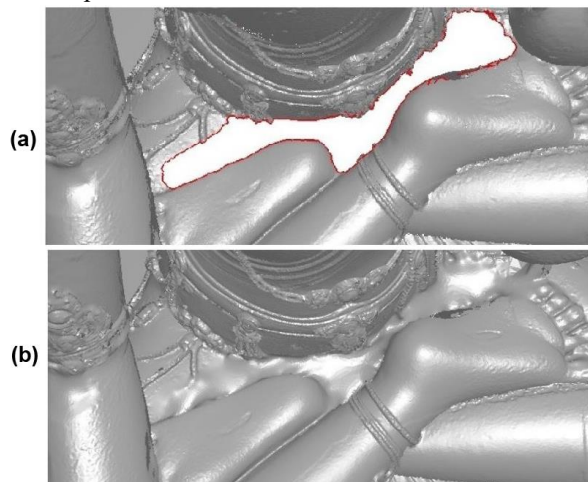
Жишээлбэл, Давис нар [3] нүхийг бөглөхдөө диффузын процесс ашигласан бол Жу нар [4] нь otree ашиглан гадаад/дотоод эзэлхүүнийг байгуулж биетийн эзэлхүүнийг бөглөсөн.

Нөгөө талаас гадаргууд суурилсан аргууд нь гадаргуу дээрх нүхнүүдийг тус тусад нь илээр бөглөдөг. Эдгээр аргууд ([1], [2], [6]) нь нүх тус бүрийг бөглөх жижиг хэсгүүдийг үүсгэж, эдгээр хэсгүүдээрээ нүхээ бөглөдөг. Энэ арга нь ашиглахад хялбар, хурдан байдаг боловч зарим нэг төвөгтэй нүхийг бөглөх боломжгүй байдаг. Гадаргууд суурилсан нүх бөглөх арга нь 2 шатлалтай байдаг бөгөөд эхний шатанд нүхийг ирмэгийн тусламжтай таних янз бүрийн техник

ашиглан бөглөдөг. Дараагийн шатанд бөглөсөн нүхний гадаргууг гөлгөр байлгах аргаар сайжруулдаг.

Жишээлбэл, Брунтон нар [6] нь нүхний хүрээг хавтгай дээр тэнийлгэж 2 хэмжээст нүх бөглөх аргаар бөглөсний дараа бөглөсөн хэсгийн энергийг хамгийн бага байлгах аргаар сайжруулсан. Харин Пернот нар [1] нь нүхний орчимд шинээр нэмж оруулж байгаа хэсгүүдийн орчин дахь муруйлтын өөрчлөлт нь хамгийн бага байхаар сонгосон. Ингэснээр тасралтгүй гөлгөр гадаргуугаар нүх бүрийг амжилттай бөглөсөн.

Дээр дурьдсан аргууд нь биетийн гадаргуу дээрх нүхийг тасралтгүй гөлгөр гадаргуу байхаар хялбар бөглөж чадах боловч нүхний орчимд эсвэл нүхний гадаргуу дээр байсан зарим чухал онцлог шинж нанаруудыг сэргээж чаддаггүй. Жишээ нь “Цагаан дара эх” бүтээлийн моделийг байгуулах явцад 3 хэмжээст модель дээр гарсан том хэмжээний нүхийг Зураг 3(а)-д харуулсан байна. Бүтээлийн эх Зураг 2(б)-ээс харахад энэ хэсэгт олон чухал онцлогууд хадгалагдсан байна. Хэрэв энэ нүхийг [1] ажилд боловсруулсан аргаар нөхвөл энэ онцлог шинжийг агуулсан мэдээллийг сэргээж чадахгүй болохыг Зураг 3(б)-д харуулсан үр дүнгээс харж болно.



Зураг 3. (а) Лазерь сканнераар хэмжилт хийхэд дутуу гарсан хэсэг, (b) уламжлалт арга болох математик аргаар нөхсөн үр дүн.

## III. ГАДАРГУУ ДЭЭРХ НҮХИЙГ ФОТОГРАМЕТРЫН АРГА АШИГЛАН НӨХӨХ

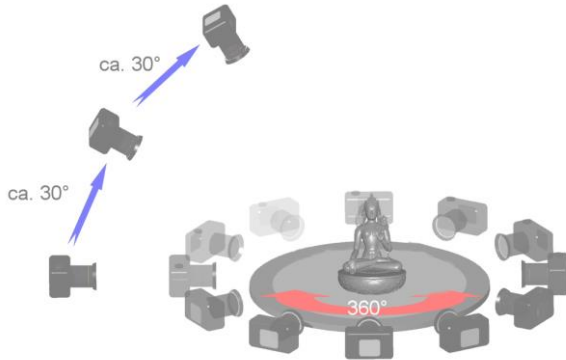
### A. Фотограметрын арга ашиглан 3 хэмжээст модель байгуулах

Байгуулсан модель дээрх нүхний хэмжээ жижиг, гадаргуун тооцоолол нь бага байвал дээр дурьдсан алгоритмуудыг ашиглан цэгэн өгөгдлийг нөхөх боломжтой юм. Харин өмнөх бүлэгт дурьдсан том хэмжээтэй болон гадаргуу дээрээ онцлог агуулсан нүхийг бөглөхдөө бид орчин үеийн компьютерын ухааны нэг чухал ололт болсон фотограметр буюу тооцон бодох фото зургийн аргыг ашигласан.

Энэ аргын үндсэн санаа нь тухайн биетийн 3 хэмжээст моделийг түүний тал бүрээс нь авсан олон тооны фото зургаас компьютерын дүрс боловсруулалт болон математик тооцооллын арга ашиглан байгуулах явдал юм. Энэхүү арга нь хэрэглэхэд хялбар бөгөөд зардал багатай боловч боловсруулалтын хугацаа их

шаарддаг, зургийн аппаратны линзний тохируулгаас хамаарч байгуулсан 3 хэмжээст модель нь масштабын алдаа гардаг дутагдалтай.

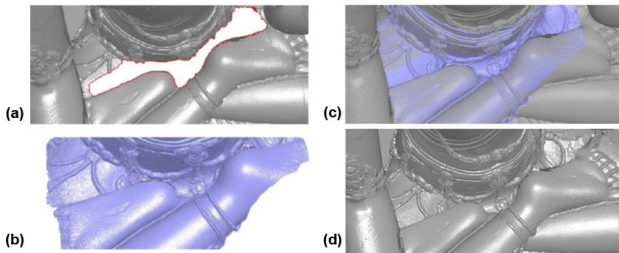
Бид энэхүү аргыг байгуулсан модель дээр үүссэн том хэмжээний нүхийг бөглөхдөө ашигласан (Жишээлбэл Зураг 2-т үзүүлсэн хэсгүүд).



Зураг 4. Фото зураг авах аргачлал.

Үүний тулд мэргэжлийн гэрэл зургийн аппарат ашиглан тухайн объектын шаардлагатай хэсгийг тодорхой зайнаас тодорхой градусаар тойрон мөн өнгө гэрлийг маш сайн тааруулан фото зураг авна. Авсан фото зургуудаа мэргэжлийн програм (agisoft) ашиглан фото зургаар гурван хэмжээст модель үүсгэсэн.

Жишээ нь Зураг 5(а) байгуулсан модель дээр үүссэн нүх болон нүхний орчмын гадаргууд фотограметрын аргаар байгуулсан үр дүнг харуулж байна.



Зураг 5. (а) Хөлний хэсгийн лазер сканнераар хэмжилт хийж авсан гурван хэмжээст модель, (b) фотограметрын аргаар үүсгэсэн гурван хэмжээст модель, (c) лазер сканнераар авсан хэсэг болон фото зургаар авсан хэсэг хоёрыг нийлүүлсэн байдал, (d) лазер сканнераар хэмжилт хийж авсан моделийг фото зургаар авсан модельтой нэгтгэхэд гарсан үр дүн.

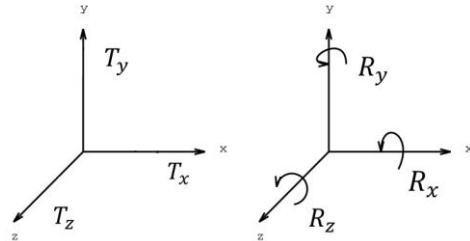
**В. Фотограметрын аргаар байгуулсан гадаргуугаар нүхийг бөглөх**

Фотограметрын аргаар байгуулсан нүхний орчим дахь 3 хэмжээст гадаргууг ашиглан нүхийг бөглөхдөө хамгийн ойр цэгийн итераци (ICP) [7], [8] аргыг ашигласан.

Энэ арга нь дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$E = \min \sum_i [(R p_i + T - q_i) \cdot n_i]^2 \tag{1}$$

Үүнд  $E$  - цэгүүдийн хоорондох зай буюу алдаа,  $p_i$  - эхний олонлогийн цэгүүд,  $q_i$  - 2 дахь олонлогийн цэгүүд,  $R$  - эргэлтийн матриц,  $T$  - шилжилтийн матриц,  $n_i$  нь  $p_i$  цэгийн нормаль. Энэ арга нь итерацийн арга бөгөөд гол санаа нь 2 цэгэн олонлогийн давхардсан хэсгүүд дэх цэгүүдийн хоорондох зай хамгийн бага байхаар шилжилтийн матриц  $T$ , эргэлтийн матриц  $R$ -г олох явдал юм.



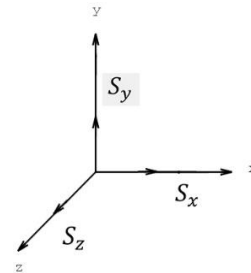
Зураг 6. Координатын системийн дагуу зөөх, эргүүлэх.

Гэвч фото зурагнаас үүсгэсэн гурван хэмжээст модель нь лазер сканнераар хэмжилт хийж авсан мэдээлэлтэй харьцуулахад нарийвчлалын хувьд харьцангуй муу байдаг. Иймд 2 цэгэн олонлогийг нийлүүлэхийн тулд анхны байрлалын тусламжтай тодорхойлогдсон цэгэн олонлогуудыг хамгийн ойр цэгийн итераци (ICP) аргыг шууд ашиглах боломжгүй юм.

ICP аргыг ашиглахад координатын дагуу зөөх, координатын дагуу эргүүлэх боловч фото зургаар үүссэн гурван хэмжээст моделийг томруулж, жижигрүүлэх боломжгүй. Иймд (1) томъёогоор өгөгдсөн ICP аргад  $S$  гэсэн масштабын матрицыг нэмж дараах байдлаар томъёолно [9].

$$E = \min \sum_i [(S R p_i + T - q_i)]^2$$

$$S = \text{diag}(S_1 S_2 S_3) \tag{2}$$



Зураг 7. Координатын системийн дагуу томруулах, жижигрүүлэх (scaling)

Үүнд:  $S$  нь масштаб (томруулж, жижигрүүлэх) өөрчлөх матриц. Алдаа багатай нийлүүлэх хамгийн боломжтой арга нь фото зургийн аргаар байгуулсан моделийг лазер сканнер ашиглан байгуулсан модельтой хэмжээний (масштабын) хувьд тэнцүү болгох юм.

Хоёр цэгэн өгөгдлийн масштабын хэмжээ зөрүү ихтэй, цэгэн өгөгдлийн тоо их тул сайжруулсан ( $S$  матрицаар үржүүлсэн) ICP алгоритм харьцангуй сайн ажилладаг. Гэвч ICP алгоритмд  $S$  матрицыг нэмж өгснөөр (2) бодлого нь шугаман бус болж тооцоолоход харьцангуй төвөгтэй болдог. Иймд (2) томъёогоор



өгсөн бодлогыг хялбарчлахын тулд бид дараах хялбар алгоритмыг гаргасан.

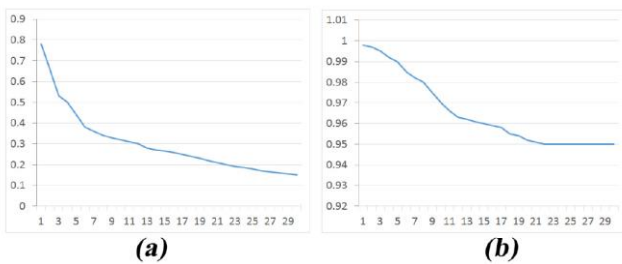
$$E = \min \sum_i [(SRp_i + T - q_i)]^2$$

$$S = \text{diag}(S_1 S_2 S_3) \quad (3)$$

$$S(k) = \begin{cases} \text{diag}(s_1, s_2, s_3) & k \text{ сондгой үед} \\ \text{diag}(1, 1, 1) & k \text{ тэгш үед} \end{cases} \quad (4)$$

Үүнд  $S(k)$  нь масштабын матриц ба  $k$  нь (2) томъёонд итерацийн тоог илэрхийлнэ. Энэхүү алгоритм тооцоолоход хялбар шугаман алгоритм бөгөөд алхам бүртээ ердийн ICP алгоритм болон масштабын матриц  $S$ -ийг агуулсан ICP алгоритмыг хослуулан хэрэглэнэ.

Туршилтын үр дүнгээс харахад Томъёо (3) болон (4) өгөгдсөн алгоритмын нийлэлт нь сайн байгаа бөгөөд тодорхой тооны давталтын дараа  $S(k)$  матриц нь нэгж матриц руу нийлснээр энэхүү арга ердийн ICP аргад шилжинэ.



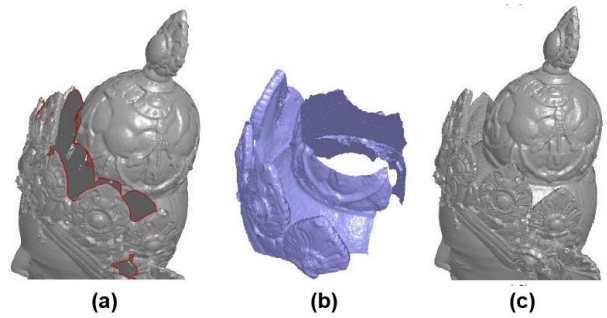
Зураг 8. (a) Манай алгоритмын бүртгэлийн алдаа (б) алгоритмын  $S$  матрицын дундаж утгуудыг итерацийн тооноос хамааруулсан дүрслэл.

Зураг 8-д Томъёо (3), (4)-д өгөгдсөн алгоритмаар 3 хэмжээст модель болон фотограметрын аргаар байгуулсан цэгэн өгөгдлийг нэг координатын системд бүртгэхэд гарч буй алдааны нийлэлт болон давталт бүр дээрх хуримтлагдсан  $S$  матрицын дундаж утгыг үзүүлэв. Зураг 5(c)-(d)-д шинэ алгоритмын тусламжтайгаар бөглөсөн нүхний зургийг харуулав.

#### IV. ТООН ТУРШИЛТ

Бид цуглуулж авсан цэгэн өгөгдлийг Intel Xeon E-5-1603 2.8 GHz процессортой, 8 GB санах ойтой машин дээр C++ болон OpenGL графикын нээлттэй сан ашиглан гүйцэтгэсэн. Мөн Canon EOS 6D мэргэжлийн гэрэл зургийн аппарат ашиглан фото зургийг авсан. Agisoft PhotoScan програм ашиглан фото зургаар гурван хэмжээст моделийг байгуулсан.

“Цагаан дара эх” бурханы моделийг байгуулахад нэг удаагийн лазерь сканнераар ойролцоогоор 200,000 орчим цэгэн өгөгдөл бүртгэсэн ба нийтдээ 200 гаруй удаа скан хийж нийт 20 сая орчим цэгэн өгөгдөл бүртгэж авсан. Харин лазерь сканнер хүрч чадахгүй хэсгүүдийн фото зургийг авч 3 хэмжээст моделийг байгуулсан. Фото зургаар модель байгуулахад нийтдээ 300 орчим фото зураг авсан.



Зураг 9. (a) Толгой хэсгийн лазерь сканнераар хэмжиж авсан 3 хэмжээст модель, (b) фото зургаар авсан 3 хэмжээст модель, (c) лазерь сканнераар хэмжилт хийж авсан моделийг фото зургаар авсан модельтой нийлүүлэхэд гарсан үр дүн.



Зураг 10. Байгуулсан 3 хэмжээст модель.

Цуглуулсан цэгэн өгөгдлөө боловруулсны үр дүнд 4 сая орчим цэг, 8 сая орчим гурвалжин агуулсан 3 хэмжээст моделийг байгуулсан. Байгуулсан модель дээрх жижиг хэмжээний нүхийг хамгийн бага муруйлтын арга [1] ашиглаж бөглөсөн бөгөөд Зураг 2-т үзүүлсэн хэсэг дэх нүхийг бөглөхдөө өөрсдийн боловсруулсан фотограметрын хосолсон аргыг ашигласан. Толгойн дээд хэсэг дэх нүхийг бөглөсөн үр дүнг Зураг 9-д харуулав. “Цагаан дара эх” бүтээлийн 3 хэмжээст модель байгуулсан эцсийн үр дүнг Зураг 10-т үзүүлэв.

#### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд гурван хэмжээст модель байгуулах лазерь сканнер, фото зургийн аргуудыг судлан, хослуулан ашигласнаар комплекс моделийг алдаа багаатайгаар байгууллаа.

Лазерь сканнерын аргыг ашиглан бүртгэсэн цэгэн өгөгдлийн үр дүнд байгуулсан 3 хэмжээст модель дээрх нүхийг бөглөхдөө фотограметрын арга

ашигласан. Энэ аргыг хэрэглэснээр нүхний орчимд болон түүн дээрх биетийн онцлог шинжийг алдагдуулахгүйгээр нүхийг бөглөх боломж бүрдсэн.

Фотограметрын аргаар байгуулсан гадаргуугаар байгуулсан модель дээрх том хэмжээний нүхийг бөглөхдөө масштабын матриц агуулсан шугаман ICP ашигласан. Энгийн ICP алгоритмд томсгож, жижигрүүлэх масштабын матрицыг нэмж өгснөөр ICP алгоритм илүү үр дүнтэй болсон.

#### НОМ ЗҮЙ

- [1] J. P. Pernot, G. Moraru, P. Veron, Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization, *Computers and Graphics*, Vol. 30, No. 6, pp. 892-902, 2006.
- [2] W. Zhao, S. Gao, H. Lin, A robust hole-filling algorithm for triangular mesh, *The Visual Computer*, Vol. 23, No. 12, pp. 987-997, 2007.
- [3] J. Davis, S. R. Marschner, M. Garr, M. Levoy, Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion, In *3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp. 428-441, 2002.
- [4] T. Ju, Robust repair of polygonal models, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 23, No. 3, pp. 888-895, 2004.
- [5] S. Bischof, D. Pavic, L. Kobbelt, Automatic restoration of polygon models, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 24, No. 4, pp.1332-1352, 2005.
- [6] A. Brunton, S. Wuhler, C. Shu, P. Bose, E. D. Demaine, Filling holes in triangular meshes by curve unfolding, In *Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications*, pp. 66-72, 2009.
- [7] Besl, P.J. and McKay, N.D., 1992, April. Method for registration of 3-D shapes. In *Robotics-DL tentative* (pp.586-606). International Society for Optics and Photonics.
- [8] Chen Y., Medioni G.: Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing* 10, 3 (1992), 145-155.
- [9] Du S., Zheng N., Xiong L., Ying S., Xue J.: Scaling iterative closest point algorithm for registration of m-d point sets. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 21, 5 (2010),442-452.