

Археологийн олдворыг виртуаль орчинд сэргээн байгуулах

(VIII-IX зууны Уйгурын эзэнт гүрний нийслэл Хар балгасаас олдсон вааран савны жишээн дээр)

Х.Оюундолгор¹, М.Саруул², У.Эрдэнэбат³, А.Энхбаяр²
¹ МУИС, ХШУИС, Мэдээлэл, компьютерийн ухааны тэнхим
² МУИС, ХШУИС, Хэрэглээний математикийн тэнхим
³ МУИС, ШУС, Антропологи, археологийн тэнхим
Цахим шуудан: oyundolgor@seas.num.edu.mn

Хураангуй — Энэхүү ажилд археологийн малтлагаас хамгийн их гардаг олдворын төрөл болох ваар савны хэлбэрийг виртуаль орчинд сэргээх аргыг биет олдвор дээр туршиж хийсэн аргаа танилцуулна. Гурван хэмжээст лазер сканнерын тусламжтай археологийн олдворын гадаргуун цэгэн өгөгдлүүдийг бүртгэж авлаа. Бүртгэсэн өгөгдлүүд дээрээ математик анализ хийж, босоо хөндлөн огтлолын муруйг байгуулав. Байгуулсан муруйгаа ашиглан биетийн ерөнхий загварыг сэргээсэн бөгөөд ваарны хагархай салангид хэсэг бүрийг энэхүү ерөнхий загвартаа байрлуулав. Байрлуулсан хэсэг бүрийн цэгүүдийг хамгийн ойр итерацийн цэгүүд (ICP) аргаар үнэлж дахин байрлуулах замаар олдворын анхны дүр төрхийг сэргээн босголоо.

Түлхүүр үг — Монголын археологи, Уйгурын Хар балгас, Уйгурын ваар сав, 3 хэмжээст лазер сканнер, 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөл, 3 хэмжээст загвар

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хөгжиж буй гурван хэмжээст сканнерын технологи нь аливаа биетийн гадаргуун тоон өгөгдлийг өндөр нарийвчлалтай хэмжиж, 3 хэмжээст загварыг байгуулах боломжийг олгодог. Энэхүү технологийг ашиглан археологийн олдворуудыг сканнердаж өндөр нарийвчлалтай загвар байгуулах, байгуулсан загвараараа тоон архив үүсгэх болон математикийн арга ашиглан анализ хийх зэрэг олон чиглэлээр судалгааны ажилд ашиглаж байна.

Үүний нэг хэрэглээ нь эвдэрч гэмтсэн археологийн олдворуудын 3 хэмжээст загварыг байгуулж, виртуаль орчинд дахин сэргээх, устаж алга болсон хэсгүүдийг тооцоолон гаргах ажил ордог. Виртуаль орчинд археологийн олдворыг сэргээх нь хүний үйл ажиллагааг ихээхэн хялбарчилж, цаг хэмнэдэг арга учраас дэлхийн олон оронд өргөнөөр ашиглаж байна. Энэ чиглэлийн судалгааны ажил ч эрчимтэй хийгдэж байна. Нөгөө талаас археологийн олдвороос байгуулсан 3 хэмжээст загварыг ашиглан виртуаль орчинд судалгаа хийх, музейн виртуаль үзмэр байгуулах зэрэг олон төрлийн боломжийг нээж өгдөг.

Археологийн олдворын геометр шинж чанараас хамааран виртуаль орчинд дахин сэргээн байгуулах арга техникүүд нь ялгаатай байдаг. Тухайлбал, хавтгай биет [1],[2], эргэлтийн биет [3], [4], [5] болон бүхэл биетийн [6], [7], [8] байгуулах аргууд гэж ангилдаг. Хавтгай хэлбэрийн биетийг дахин сэргээхэд гүний мэдээлэл шаардлагагүй тул зөвхөн хэсгүүдийн

тойрсон битүү муруйнуудыг ашигладаг. Энэ нь 2 хэмжээст эвлүүлэг тоглоомтой төстэй тул харьцангуй хялбар байдаг. Эргэлтийн бие буюу ваар, сав хэлбэрийн биетийг угсрахдаа босоо тэнхлэгийн дагуу тэгш хэмтэй байдаг чанарыг нь голчлон ашигладаг. Харин гурван хэмжээст бүхэл биетийг виртуаль орчинд угсрах ажил нь нэлээд төвөгтэй бөгөөд ихэвчлэн хэсэг тус бүрээс хагарсан талуудыг ялгаж аваад хос хосоор нь харьцуулах замаар угсардаг.

Энэхүү ажилд бид эргэлтийн биетийг виртуаль орчинд дахин сэргээн байгуулах шинэ аргыг танилцуулна. Тухайлбал, Монголын нутгаас олдсон Уйгарын үеийн ө.х 1300 жилийн өмнөх ваарыг дахин сэргээсэн арга техникийг танилцуулна. Зураг 1 дээр олдсон ваарны олдворыг харуулав. Энэхүү ваар нь Архангай аймгийн Хотонт сумын нутагт орших Хар балгас гэдэг газраас олдсон (Зураг 2). Хар балгас Төв Азийн нүүдэлчин ард түмний дунд VIII-IX зууны үед төр улсаа байгуулан 100 орчим жил өнөөгийн Монголын хөрс шороон дээр оршин тогтнож байсан Уйгурын эзэнт гүрний сүр жавхлантай нийслэл Ордубалык хэмээх их хотын нуранхай билээ. Судалгааны байдлаас үзэхэд Хар балгас нь 32 км² талбай эзэлсэн асар том хот байсан нь мэдэгддэг. Хотын талбай нь хааны орд харш бүхий засаг захиргааны хэсэг, сүм дугана байрлах шашин мөргөлийн төв, худалдааны гудамж зээл, гар үйлдвэрийн хороолол, урлангууд, хотын оршин суугчдын сууж байсан сууцны дүүрэг зэрэг хэсгүүдээс бүрдэж байв [9].

Хар балгасын баруун хойд, баруун урд, баруун хэсэгт худалдаа, гар үйлдвэрийн хэрэм барилга олон байжээ. Эндээс хотын оршин суугчдын хэрэглэж байсан ваар сав их олддог нь янз бүрийн хэлбэр хэмжээ, зориулалт бүхий зүйл байжээ. Эдгээр бүх сав суулгыг хүрдэн оньсон дээр үйлдсэн, жигд сайн шатаалттай, сайтар хольж нягтруулсан саарал шавраар хийсэн ба хээтэй, хээгүй янз бүр байсан нь тус тусдаа өөр зориулалттай юм. Эдгээр сав нь тусгай хэвээр дарж гаргасан хээтэй байдаг. Хөндлөн зураастай зэргцээ шугам, дарж гаргасан хонхортой хөндлөн зураас, ороолдож сүжилдсэн болон дугуйрсан гэх мэтийн олон хэлбэрийн хээ байна. Энэ нь Дундад Азийн нутгаас олддог сав суулгын хээтэй ижил байдгийг Уйгурын соёлд согд нарын нөлөө оролцоо их байснаар тайлбарлаж болох юм [10].



Зураг 1. Уйгарын үеийн ваарны археологийн олдвор.

Уйгурын нийслэл Хар балгасанд 2009 оноос эхлэн малтлага судалгаа хийж буй Монгол-Германы Орхон Экспедицийн 2014 оны хээрийн шинжилгээний үеэр хотын баруун урд талын дүүргийн талбайгаас газрын хөрснөөс ирмэг нь цухуйж ил гарсан бараг бүтэн шахам вааран савны хэсгүүдийг илрүүлэн олж МУИС-ийн Антропологи, археологийн тэнхимд авчирсан байна. Уг ваар нь том хэмжээтэй ваар боловч ихээхэн эвдэрч гэмтсэн бөгөөд ваарны 20 орчим хэлтэрхий буюу 60 орчим хувь нь олдсон. Иймд энэхүү ваарыг дахин сэргээж угсрах боломжгүй байгаа юм. Иймд бид өөрсдийн боловсруулсан арга техникийг ашиглан энэхүү ваарыг виртуаль орчинд дахин сэргээн байгуулсан.

Эргэлтийн биеийн дахин сэргээн байгуулах хэд хэдэн ажлууд байдаг бөгөөд тухайлбал Cohen [3] нар хэлтэрхий хэсгүүдээс ваарыг дахин байгуулахдаа дифференциаль геометрийн өгөгдөл болон B сплайн ашигласан бол Willis [4] нар гадаргууг байгуулах стохастик аргыг санал болгосон. Түүнчлэн Son [5] нар объектын хэлтэрхий бүрийн тэнхлэгийн хөндлөн огтлолын муруйг тооцож, хэлтэрхий бүрийг хослуулан тааруулах аргаар эргэлтийн биетийг дахин сэргээсэн.



Зураг 2. Архангай аймгийн Хотонт сумын нутагт орших Хар балгас

Бид өмнө дурьдсан ваарыг хэлтэрхийнүүдээс нь дахин сэргээхдээ эхлээд ваарны *Ox* хавтгайн дагуух босоо хөндлөн огтлолын муруйг байгуулсан. Энэ муруйгаа ашиглан ваарны ерөнхий хэлбэрийг байгуулж, дараа нь хэлтэрхий тус бүрийн онцлог шугамын тусламжтайгаар ваарны ерөнхий загвар дээр урьдчилан байршуулсан. Урьдчилан байршуулсан хэлтэрхий тус бүрийг *хамгийн ойр итерацийн цэгүүд* (ICP) [11] аргаар дахин үнэлж байрлалыг тогтоосон.

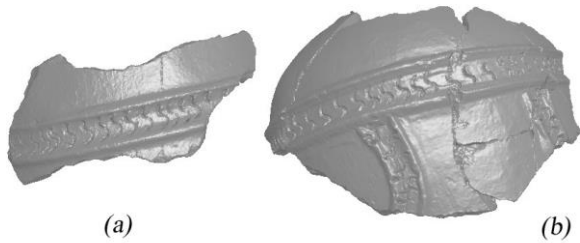
Бидний санал болгож байгаа энэхүү хагас автомат арга нь хэрэглэгчдэд хялбар бөгөөд эргэлтийн биетийг өндөр нарийвчлалтай дахин байгуулах боломжтой юм.

II. ЭРГЭЛТИЙН БИЕТИЙГ ДАХИН БАЙГУУЛАХ

A. Гурван хэмжээст өгөгдөл цуглуулах

Энэхүү ажилд туршиж байгаа ваар нь 20 орчим жижиг, том хэлтэрхийнүүдээс бүрдэх бөгөөд бид хэлтэрхий тус бүрийг Next Engine лазер сканнер ашиглан гадаргуун 3 хэмжээст цэгүүдийг бүртгэж авсан. Хэлтэрхий тус бүрийн овор хэмжээ, геометр бүтцээс хамааруулан төрөл бүрийн аргаар сканнердах ажлыг гүйцэтгэсэн. Жишээлбэл, Зураг 3-д ваарны зарим хэсгийн 3 хэмжээст загварыг үзүүлэв. Энэхүү хэсэг нь жижиг хэмжээтэй бөгөөд сканнер хийхэд хялбар тул автомат эргэлтийн горимд сканнерыг ашиглаж шууд сканнер хийсэн. Гэтэл Зураг 4-т үзүүлж байгаа хэсгүүд нь харьцангуй том бөгөөд геометрийн хувьд төвөгтэй тул тал бүрээс нь салангид скан хийж дараа нь цэгэн өгөгдлүүдээ нэгтгэсэн. Цэгэн өгөгдлүүдээ нэгтгэж нэг координатын системд бүртгэхдээ өмнө дурьдсан “Хамгийн ойр итерацийн цэгүүд” (ICP) алгоритмыг ашигласан.

Хэлтэрхий тус бүрийн моделиудыг 0.5 мм нарийвчлалтай байгуулсан бөгөөд овор хэмжээнээсээ хамаарах 50,000 – 600,000 орчим тооны цэгүүдийг бүртгэж авсан.



Зураг 3. Ваарны хэсгүүдээс байгуулсан 3 хэмжээст загварууд.

В. Босоо хөндлөн огтлолын муруйг байгуулах

Ваарны Oxz хавтгайн дагуух босоо хөндлөн огтлолын муруйг байгуулахдаа зарим нэг онцлог хэсгүүдийн Oz тэнхлэгийн дагуух хөндлөн огтлолын муруйг авсан. Үүний тулд эхлээд хөндлөн огтлол авах биетийн Ox тэнхлэгтэй параллель байх байрлал буюу босоо байрлалыг тогтооно. Энэхүү байрлалыг тогтоохдоо тухайн хэсэг тус бүрийн геометрын онцлогоос хамааран ялгаатай арга хэрэглэсэн. Тухайлбал, ваарны оройн эсвэл суурийн хэсэгт (Зураг 4 *a, b*) амсарын болон суурийн хэсгээс тодорхой тооны цагираг хэлбэрээр байрлах цэгүүдийг ялгаж авсан.

Энэ цэгүүдийн олонлог тус бүр дээр үндсэн компонентын анализын (РСА) [12] тооцоог хийсэн. Тухайлбал, цэгүүдийн олонлог p_i тус бүр дээр ковариацийн матриц C дараах байдлаар байгуулагдана.

$$C = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (q_j - p_i)^T (q_j - p_i) \quad (1)$$

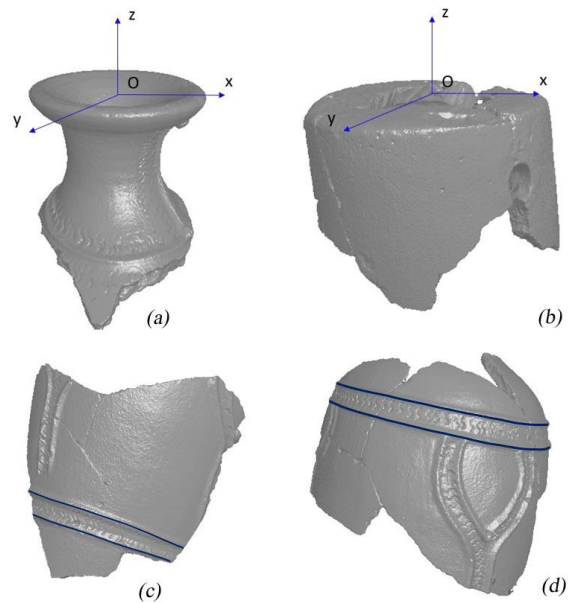
Энэхүү C матрицын хувийн утга ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), хувийн векторууд (e_1, e_2, e_3)-ыг олсоноор орчны координатын систем (e_1, e_2, e_3)-ийг байгуулсан. Энэ координатын системийг тухайн хэсгийг тооцоолж буй ерөнхий координатын системтэй хамт давхар хувиргалт хийхэд Зураг 4 (*a, b*) дэх хэсгүүдийн Oy тэнхлэг дагуух хөндлөн огтлолын муруй нь босоо хөндлөн огтлол болж чадна.

Харин Зураг 4 (*c, d*)-д үзүүлсэн хэсгүүдийн хувьд биет дээрх онцгой шугамуудыг [13] алгоритмаар таньсан бөгөөд энэ шугамыг Ox тэнхлэгтэй параллель байхаар хувиргалт хийсний дараа босоо хөндлөн огтлолын муруйг олсон. Зураг 4 (*c, d*)-д үзүүлсэн хэсгүүд дээр [13] алгоритмаар ялгаж авсан онцгой шугамуудыг тод зураасаар дүрслэн харуулав.

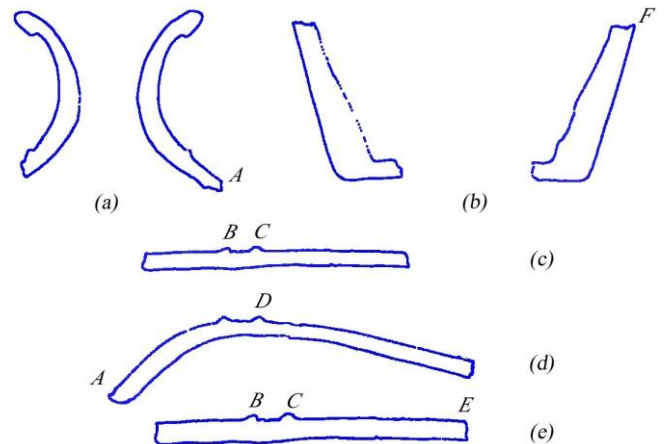
Зураг 5-д Oz тэнхлэгийн дагуу огтлол хийж байгуулсан босоо хөндлөн огтлолын муруйнуудыг үзүүлэв. Зарим нэг хэсэг дээр Oz тэнхлэгийн дагуу параллель огтлолууд хийж олон муруйнууд ялгаж авсан.

Ялгаж авсан босоо хөндлөн огтлолын муруйнаас бид зөвхөн биетийн гадна талын гадаргуу дээрх хэсгийг сонгож авсан. Энэхүү муруйнуудаас математик геометрийн чанаруудыг ашиглан ваарны

босоо, хөндлөн огтлолын ерөнхий муруйг тооцож гаргасан.

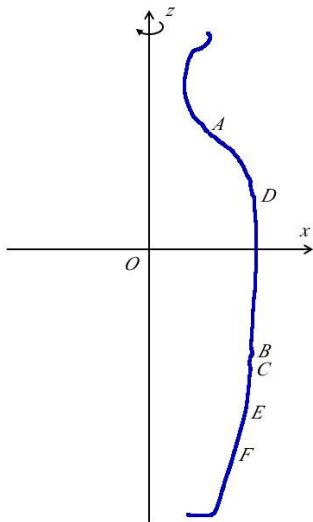


Зураг 4. Ваарны хэсгүүдийг босоо, хөндлөн огтлолын дагуу байрлуулах процесс.



Зураг 5. Ваарны хэсгүүдийн Oz тэнхлэгийн дагуух босоо, хөндлөн огтлолын шугамууд.

Жишээлбэл, Зураг 4 (*a, b*)-д үзүүлсэн хэсгүүдийн Oy болон Ox тэнхлэгийн байрлалыг өмнө нь тогтоосон тул тэдгээрийн хөндлөн огтлолын муруйн Oz тэнхлэгийн дагуух өндрийг тодорхойлоход хангалттай. Харин Зураг 4 (*c, d*)-д үзүүлсэн хэсгүүдээс ялгаж авсан огтлолын муруйн хувьд дахин үнэлж байрлалыг тогтоох хэрэгтэй. Үүний тул Зураг 5 (*a, d*)-д үзүүлсэн муруйнуудыг авч үзье. Байгуулсан загваруудаас харахад энэ 2 муруй огтлолдохгүй бөгөөд A цэгээр залгагдаж байгаа. Энэхүү залгаасыг хийхдээ A цэг дээр муруй тасралтгүй гөлгөр үргэлжилж байхаар хийсэн. Өөрөөр хэлбэл, A цэгийн орчим дахь муруйлт нь A цэг дээрх муруйлттай ижил



Зураг 6. Байгуулсан босоо хөндлөн огтлолын шугам.

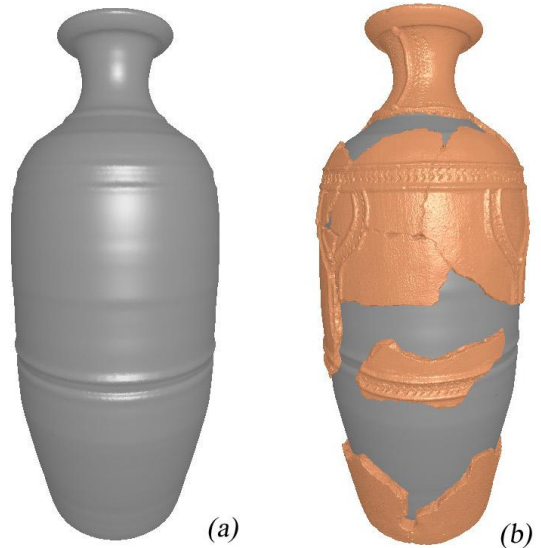
байхаар муруйг байрлуулсан. Тасралттай цэгүүд дээрх муруйлтыг олохдоо [13] ажилд дэвшүүлсэн аргыг ашигласан.

Харин Зураг 5 (c, d) дэх муруйнуудыг нэг хэсгээс нь параллель огтлол хийсний үр дүнд гаргаж авсан бөгөөд зарим хэсгээрээ давхцаж байгаа тул муруйнууд дээрх онцгой цэг B, C-г ашиглан муруйнуудын анхны байрлалыг ойролцоогоор тогтоосон.

Үүний дараа “Хамгийн ойр итерацийн цэгүүд” (ICP) [11] алгоритмын “цэгээс цэгт” хувилбарыг ашиглаж байрлалыг нь дахин сайжруулсан. Зураг 5 (b, e)-д үзүүлсэн муруйнууд огтлолцохгүй байгаа тул муруйнуудын байрлалыг холбосон шугам тасралтгүй гөлгөр муруй үүсгэж байхаар байрлалыг тогтоосон. Дээрх процессын үр дүнд бид өгөгдсөн ваарны Oxz тэнхлэгийн дагуу босоо огтлолын муруйг байгуулж чадсан. Ваарны босоо хөндлөн огтлолыг байгуулсан үр дүнг Зураг 6-д үзүүлэв.

С. Эргэлтийн биетийг байгуулах

Өмнөх хэсэгт байгуулсан босоо огтлолын муруйг Oz тэнхлэгийн дагуу нэг нэг хэмээр 360 удаа эргүүлэлт хийж цэгүүдийг бүртгэж авснаар бид ваарны ерөнхий загварыг байгуулсан (Зураг 7a). Энэ байгуулсан ваарны ерөнхий загварыг ашигласнаар ваарыг дахин сэргээх процесс ихээхэн хялбар болсон. Тухайлбал, ваарны хэсэг тус бүрийг гадаргуу дээрх онцлог шинж болон муруйлтын радиусыг урьдчилан тооцсоны үндсэн дээр байгуулсан ваарны загвар дээрээ байрлуулсан. Байрлуулсан хэсгийн гадна талын гадаргуун цэгүүдийн олонлог болон үүнтэй давхцаж байгаа ваарны загварын цэгүүдийн олонлогийн хооронд “Хамгийн ойр итерацийн цэгүүд” (ICP) алгоритмын “цэг хавтгай” гэсэн хувилбарыг ашигласан.



Зураг 7. (a) Ваарны 3 хэмжээст ерөнхий загвар; (b) Ерөнхий загвар дээр байрлуулсан ваарны хэсгүүд; (c) Ваарны боломжит дахин сэргээлт; (d) Виртуаль орчинд байгуулсан ваарны загвар.

Энэ алгоритм нь дараах минимумчлалын бодлогоор тавигддаг.

$$E = \min \sum_i [(Rp_i + T - a_i) n_i]^2 \quad (2)$$

Үүнд, E – цэгүүдийн хоорондох зай буюу алдаа, p_i – ваарны хэсгийн цэгүүд, q_i – ваарны загвар дээрх цэгүүд, R – эргэлтийн матриц, T шилжилтийн матриц, n_i нь p_i цэгүүдийн нормаль.

Ваарны бүх хэсгүүдийн байрлалыг дээрх аргаар тодорхойлсоноор уг биетийн боломжит дахин сэргээсэн хувилбарыг гаргаж авна. Зураг 7 (b) ваарны хэсгүүдийн ваарны загвар дээр байгуулсан үр дүнг харуулж байна. Хамгийн сүүлийн шатанд ваарны

босоо тэнхлэгийн дагуу тэгш хэмтэй байх чанарыг ашиглан ваарны дутуу хэсгүүдийн геометр хэлбэр дүрсийг таамаглаж, дутуу хэсгүүдийг гүйцээж бөглөсөн. Эцсийн үр дүнг Зураг 7(d)-д харуулав.

III. ТООН ТУРШИЛТ

Ваарны хэсгүүдийн цэгэн өгөгдлийг Next Engine лазер сканнераар 0.5 мм нарийвчлалтайгаар авсан. Цуглуулсан өгөгдлийг Intel Xeon E-5-1603 2.8 GHz процессортой, 8 GB санах ойтой машин дээр C++ болон OpenGL графикын нээлттэй сан ашиглан гүйцэтгэсэн. Зарим биетийн сканнер хийж модель байгуулахад үүссэн жижиг хэмжээний нүхнүүдийг дүрсийн муруйлт дээр суурилсан нүх бөглөх алгоритм ашиглаж бөглөсөн.

Гадаргуу дээрээ онцлог шугам буюу хээ агуулсан эсвэл том хэмжээтэй хэсгүүдийн урьдчилсан байрлалыг тогтоож алдааг үнэлэхэд хялбар байсан. Харин ямар нэг онцлог шугам агуулаагүй жижиг хэсгүүдийн байрлалыг урьдчилан тогтооход төвөгтэй байсан бөгөөд “Хамгийн ойр итерацийн цэгүүд” (ICP) алгоритмын алдаа олон байрлалд ойролцоо алдаатай гарч байсан. Өөрөөр хэлбэл ийм төрлийн хэсгүүд нь ваарны олон байрлалд байх боломжтой гэсэн дүгнэлт өгсөн. Тиймээс ийм төрлийн жижиг хэсгүүдийг ваарыг дахин сэргээхэд оруулаагүй болно.

Байгуулсан загвараас хэмжилт хийж үзэхэд тухайн ваарны өндөр нь 65 см, хамгийн өргөн хэсгийн диаметр нь 29.5 см, хамгийн нарийн хэсгийн диаметр нь 10.5 см, суурийн диаметр нь 18 см байсан. Эргэлтийн биеийн эзэлхүүнийг ойролцоо бодох аргаар тооцоолоход тус ваарны эзэлхүүн 10.2 литр гэж гарсан.

IV. ДҮГНЭЛТ

Бид энэхүү ажилдаа археологийн олдворууд болох ваар, сав зэрэг эргэлтийн биетийг виртуаль орчинд дахин сэргээх хялбар алгоритмыг танилцуулсан. Эхний шатанд ваарны зарим нэг онцлог хэсгүүдийн тусламжтайгаар биетийн босоо, хөндлөн огтлолын муруйг тооцоолон гаргаж, эргэлтийн биеийн ерөнхий загварыг байгуулсан. Уг байгуулсан 3 хэмжээст загварын тусламжтай хэсэг тус бүрийн байрлалыг урьдчилан тооцоолж, “Хамгийн ойр итерацийн цэгүүд” (ICP) алгоритмын тусламжтай байрлалыг нь нарийвчлан тогтоосон.

Бидний боловсруулсан энэхүү аргаар гадаргуу дээрээ онцгой шугам агуулсан эргэлтийн биетийг дахин сэргээхэд хялбархан. Харин ямар нэг онцлог шугам агуулаагүй, олон жижиг хэсгээс бүтсэн биетийг дахин сэргээхэд учир дутагдалтай бөгөөд энэ тохиолдолд аргыг сайжруулж улам боловсронгуй болгох шаардлагатай. Энэхүү виртуаль орчинд дахин сэргээсэн 3 хэмжээст загваруудыг археологийн

судалгаа болон виртуаль музейн үзмэр болгон ашиглах өргөн боломжтой юм.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Da Gama Leita, H.C. and Stolfi, J., 2002. A multiscale method for the reassembly of two-dimensional fragmented objects. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(9), pp.1239-1251..
- [2] Kong, W. and Kimia, B.B., 2001. On solving 2D and 3D puzzles using curve matching. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 2, pp. II-583). IEEE.
- [3] Cohen, F., Liu, Z. and Ezgi, T., 2013. Virtual reconstruction of archeological vessels using expert priors and intrinsic differential geometry information. *Computers & Graphics*, 37(1), pp.41-53.
- [4] Willis, A. and Cooper, D.B., 2004, August. Alignment of multiple non-overlapping axially symmetric 3d datasets. In *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on* (Vol. 4, pp. 96-99). IEEE.
- [5] Son, K., Almeida, E. and Cooper, D., 2013. Axially symmetric 3D pots configuration system using axis of symmetry and break curve. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 257-264).
- [6] Huang, Q.X., Flöry, S., Gelfand, N., Hofer, M. and Pottmann, H., 2006. Reassembling fractured objects by geometric matching. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25(3), pp.569-578.
- [7] Winkelbach, S. and Wahl, F.M., 2008. Pairwise matching of 3D fragments using cluster trees. *International Journal of Computer Vision*, 78(1), pp.1-13.
- [8] Altantsetseg, E., Matsuyama, K. and Konno, K., 2014. Pairwise matching of 3D fragments using fast fourier transform. *The Visual Computer*, 30(6-8), pp.929-938.
- [9] Эрдэнэбат У. Архангай аймгийн Хотонт сумын нутаг Хар Балгас болон Олон довын дурсгалт газар явуулж буй археологийн судалгаа. *Хүннүгийн эзэнт улс ба Монголын эртний түүхийн судалгаа*. УБ., 2012, 483-527.
- [10] Huettel H.-G., Erdenebat U. Karabalgasun und Karakorum – Two late nomadic urban settlements in the Orkhon Valley. *Archaeological excavation and Research of the German Archaeological Institute (DAI) and the Mongolian Academy of Sciences*, 2000-2009. Ulaanbaatar, 2010.
- [11] 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
- [12] Pauly, M., Keiser, R. and Gross, M., 2003, September. Multi-scale Feature Extraction on Point-Sampled Surfaces. In *Computer graphics forum* (Vol. 22, No. 3, pp. 281-289). Blackwell Publishing, Inc.
- [13] Altantsetseg, E., Muraki, Y., Matsuyama, K. and Konno, K., 2013. Feature line extraction from unorganized noisy point clouds using truncated Fourier series. *The Visual Computer*, 29(6-8), pp.617-626.