

Их хэмжээний гурван хэмжээст цэгэн өгөгдлийн боловсруулалт

Ж.Даваацэрэн^{1,2}, Ц.Баасанжаргал¹, Г.Энхбат², Х.Оюундолгор³, А.Энхбаяр¹

¹ МУИС, ХШУИС, Хэрэглээний Математикийн Тэнхим

² БСШУЯ-ны Соёлын Өвийн Төв

³ МУИС, ХШУИС, Мэдээлэл, Компьютерийн Ухааны Тэнхим

Хураангуй — Их хэмжээний 3 хэмжээст цэгэн өгөгдлийг боловсруулахдаа эхлээд файлыг шууд жижиг хэсгүүдэд хувааж, хэсэг тус бүр дэх цэгүүдийн координатын утгыг үнэлсэн. Үнэлсэн координатын утга дээрээ үндэслэн 3 хэмжээст тор байгуулж үүнийхээ тусламжтайгаар өгөгдсөн цэгийн олонлогийг дахин хуваасан. Өгөгдсөн цэгэн олонлогийн шуугианыг арилгахдаа хуваасан хэсэг тус бүр Лапласын гөлийлгөх операторыг ашигласан. Цэгүүд дээрх муруйлтын утгыг харгалзан үзсэний үндсэн дээр цэгэн өгөгдлийн тоог жигд бусаар бууруулах алгоритмыг ашигласан. Хэсэг тус бүр дээр боловсруулсан цэгэн өгөгдлөө нэгтгэж эцсийн үр дүнг гаргаж авсан.

Түлхүүр үг — Их хэмжээний цэгэн өгөгдөл; цэгэн өгөгдлийн шуугиан; цэгэн өгөгдлийг хялбаршуулах; лазерь сканнер;

I. УДИРТГАЛ

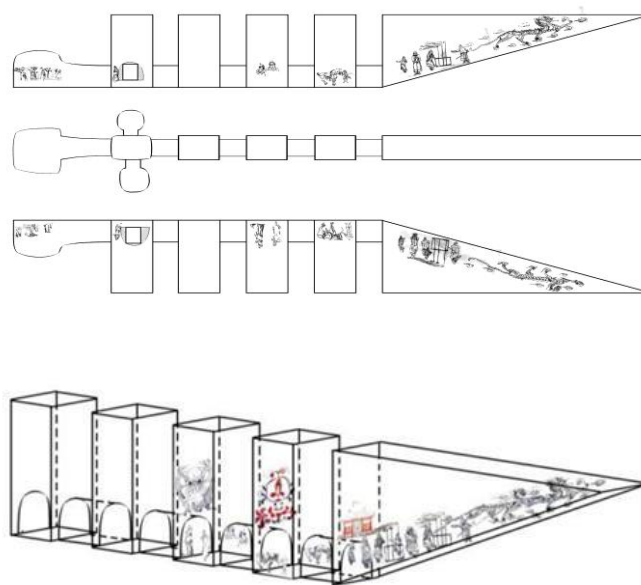
Компьютер графикын шинжлэх ухаан нь сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хөгжиж байгаа салбар бөгөөд анагаах ухаан, урлаг, аж үйлдвэр, археологи зэрэг бүхий л салбарт нэвтэрч тэдгээрийн салшгүй нэг хэсэг болоод байна. Компьютер график нь математик, физик, инженерийн ухаан зэрэг олон салбарын огтлолцол дээр байдаг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

Сүүлийн жилүүдэд энэ салбарт 3 хэмжээст тоон сканнерын дэвшилтэт технологийг ашиглан биетийн 3 хэмжээст тоон загварыг өндөр нарийвчлалтай байгуулах боломжтой болсон. Энэ технологийн гол үндэс нь 3 хэмжээст лазерь сканнераар бүртгэж авсан биетийн гадаргуун цэгэн өгөгдлийг боловсруулж 3 хэмжээст модель байгуулах явдал юм.

Хэрэглээнээс үүдсэн шаардлагын дагуу 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөлд математик боловсруулалт хийх олон төрлийн судалгааны ажлуудыг дэлхийн олон орны эрдэмтэд хийсээр 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. Мөн түүнчлэн энэ технологийн тусламжтайгаар

уул уурхайн компаниуд зардал багатай, нарийвчлал өндөртэй уурхайн 3 хэмжээст загварыг байгуулснаар олборлолт, төлөвлөлтийн үр ашгийг дээшлүүлэх боломжтой болсон. 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 хадгалах төслүүд хэрэгжиж байна. Жишээлбэл, Станфордын Их Сургуулийн “Michelangelo”, Токиогийн Их Сургуулийн “Их будда” зэрэг олон төслийг нэрлэж болно.

Байгуулж байгаа 3 хэмжээст загварын хэмжээнээс нь хамаарч ялгаатай техник технологи, аргуудыг хэрэглэдэг бөгөөд үндсэнд нь дараах байдлаар 3 ангилдаг. Үүнд: гоёл чимэглэл, чулуун зэвсэг мэтийн жижиг хэмжээний биетүүд [1], [2]; хүн чулуу, хөшөө дурсгал зэрэг дунд оврын биетүүд [3],[4]; эцэст нь барилга байгууламж, том хэмжээтэй хөшөө дурсгалууд багтана.



Зураг 1. (дээд хэсэгт) Бунхны хананы бүдүүвч зураг; (доод хэсэгт) бунхны 3 талт бүдүүвч зураг.

Том хэмжээний объектыг сканнердахад хэдэн саяас хэдэн тэрбум хүртэл цэг агуулсан их хэмжээний өгөгдлийг бүртгэж авах шаардлагатай болдог. Ийм их хэмжээтэй өгөгдлийг боловсруулахад өндөр хүчин чадалтай компьютер, цаг хугацаа шаардагдана. Тиймээс их хэмжээний 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөл боловсруулах чиглэлээр сүүлийн жилүүдэд олон судалгааны ажил гарсан бөгөөд тухайлбал Elseberg [7] нар том хэмжээний цэгэн өгөгдөл боловсруулах *octree* дээр суурилсан үр ашигтай алгоритм боловсруулсан. Puttonen [8] нар том хэмжээний цэгэн өгөгдлөөс түүвэр хийх түвшинт гистограм болон зайны урвуу жинг агуулсан арга гаргасан. Yu [9] нар цэгэн өгөгдлийг боловсруулахдаа гүдгэрийн тооцоолол болон *octree* ашигласан.

Бид энэ ажилдаа Булган аймгийн Баяннуур сумаас олдсон МЭ-ний VI зууны төгсгөл VII зууны эхэн үед буюу Түрэгийн үед хамаарах бунхны скан хийж авсан 3 хэмжээст өгөгдөл дээр боловсруулалт хийнэ. Уг бунхан нь үүдэвч (42 метр урт, 1.8 метр өргөн), урагшаа харсан налуу нарийн хонгилтой, тус бүрдээ өрх бүхий 4 тасалгаатай. Үүдэвч үргэлжилсээр бунханд хүрэх хэсгээрээ 1 метр орчим нарийссан бөгөөд энэ нарийн хэсгийг хүзүүвч гэх ба хүзүүвчний үзүүрт бунхан байрлаж байгаа. Газрын хөрсийг ухаж хөндийлөн бунхан болгосон ба уг бунхан нь 2.7 метр өндөр, 4.5 метр голчтой, зуйвандуу дугуй хэлбэртэй. Газрын хөрсөн доор 7.5 метрийн гүнд бунхан байрласан. Зураг 1-д бунхны бүдүүвч зургийг харуулав. Мөн Зураг 2-т уг бунхны үүдэвч хэсгийн фото зургийг үзүүлэв.



Зураг 2. Бунхны үүдэвч хэсгийн зураг.

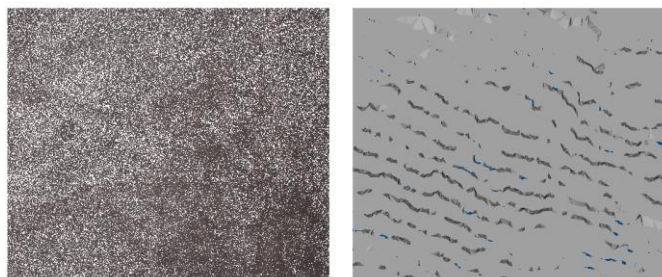
Энэхүү бунхны дотор талыг Faro лазер сканнераар өндөр нарийвчлалтай скан хийсэн. Скан хийж цуглуулсан нийт өгөгдөл нь нэг тэрбум орчим цэг агуулсан бөгөөд өгөгдлийн хэмжээ 50 GB орчим хэмжээтэй нэг файл болж байгаа. Ийм том хэмжээний өгөгдлийг энгийн компьютер дээр шууд боловсруулалт хийхэд маш төвөгтэй бөгөөд компьютерийн шуурхай санах ойгоос хамааран ихэнх програм ачаалж чадахгүй байсан. Тийм учраас математик аргууд ашиглан цэгэн өгөгдлүүдийг хуваах, цэгэн

өгөгдлийн шуугианыг арилгах, хялбаршуулах зэрэг олон төрлийн боловсруулалт хийх шаардлагатай болсон.

II. ИХ ХЭМЖЭЭНИЙ ӨГӨГДЛИЙН БОЛОВСРУУЛАЛТ

A. Цэгэн өгөгдлийг хуваах

Бунхны 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөл нь “.pts” өргөтгөлтэй ASCII форматаар өгөгдсөн файл бөгөөд файлын бүтэц дараах зохион байгуулалттай. Цэгийн мэдээлэл бүр нэг мөрөөс тогтох бөгөөд мөр болгонд i -р цэгт харгалзах координатын утгууд x_i, y_i, z_i тухайн цэгийн өнгөний мэдээлэл R, G, B агуулагдана. Өгөгдлийг боловсруулах эхний алхамд өгөгдлөө хувааж тус бүрдээ 1 сая мөр агуулсан 1000 орчим өгөгдлийн файл үүсгэсэн. Үүний дараа хуваасан өгөгдөл тус бүрт тооцоолол хийж өгөгдөлд байгаа цэгүүдийн хамгийн өндөр, өргөн, уртын тухай мэдээллийг олж авсан. Өндөр, өргөн, уртыг нь өгөгдсөн хэмжээгээр тэнцүү хувааж, улмаар ижил хэмжээтэй 3 хэмжээст 960 тор байгуулсан. Эцэст нь 3 хэмжээст өгөгдлийн цэг бүрийн x, y, z координатын утгуудыг үнэлсний үндсэн дээр байгуулсан торнуудад хуваан байрлуулсан. Зураг 3 (a)-д өгөгдсөн нэг торонд харьяалагдах цэгүүдийн олонлогийг үзүүлсэн.



(a)

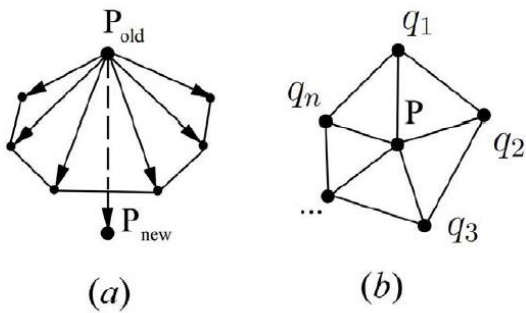
(b)

Зураг 3. (a) Нэг торонд харьяалагдах цэгүүдийн олонлог; (b) цэгэн олонлогийн шуугиан.

B. Цэгэн өгөгдлийн шуугианыг арилгах

Зарим цэгэн өгөгдлүүд тухайн скан хийсэн орчин болон сканнерын хүчин чадлаас хамааран тодорхой түвшний шуугианыг агуулж байдаг. Бидний боловсруулж байгаа цэгэн өгөгдөл 2 мм хүртэл өндөр нарийвчлалтай боловч ихээхэн шуугиантай байсан. Жишээлбэл, Зураг 3 (a)-д үзүүлсэн цэгэн өгөгдлүүдээр 3 хэмжээст торолсон загвар байгуулахад тухайн өгөгдөл дэх шуугиан илүү тод харагдаж байна (Зураг 3 (b)).

Бид цэгэн өгөгдөл дэх энэхүү шуугианыг арилгахдаа Лапласын шуугиан арилгах аргыг [10] ашигласан. Лапласын оператор нь шуугиан ихтэй гадаргууг гөлгөр болгох итерацийн арга бөгөөд дараах байдлаар томъёологддог.



Зураг 4. Лапласын гөлийлгөх оператор.

$$P_{old} = P_{new} + \lambda U(P_{old}) \quad (1)$$

$$U(P) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \omega_i} \sum_{k=1}^n \omega_i q_i - P$$

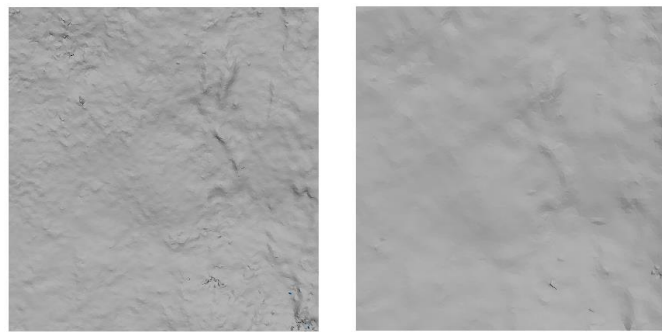
Энд P_{old} нь P цэгийн хуучин байрлал, P_{new} нь P цэгийн шинэ байрлал, λ нь бага эерэг тоо, $U(P)$ нь “umbrella” оператор. $U(P)$ “umbrella” операторын хувьд q_i нь P цэгийг хүрээлсэн хуучин цэгүүд бөгөөд w_i нь жингийн функц болно. Зураг 4-г Лапласын операторыг дүрслэн үзүүлсэн болно.

Лапласын операторыг ашиглахын тулд бид эхлээд өгөгдлийн цэг бүр дээр “umbrella” операторыг байгуулах шаардлага гарна. Иймээс хэсэг тус бүрийн цэгэн өгөгдөл дээр KD-tree алгоритмаар мод байгуулж, P цэг бүрийн N тооны хөрш цэгүүдийг олсон. P цэг болон түүний хөрш цэгүүдийн хувьд үндсэн компонентын анализ (PCA) [11] арга ашиглан P цэгийн нормаль векторыг тооцоолон гаргасан. Үндсэн компонентын анализ (PCA) дараах байдлаар томъёологдоно.

$$C = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (q_i - P)^T (q_i - P) \quad (2)$$

Энд C нь P цэгийн коварианс матриц, $(\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3)$ нь тус матрицын хувийн утга, (e_1, e_2, e_3) нь хувийн векторууд болно. PCA арга ёсоор хамгийн бага хувийн утга λ_1 -г харгалзах хувийн вектор e_1 нь P цэгийн нормаль вектор болдог.

Цэг тус бүрийн нормаль векторыг олсны дараа тухайн цэг дээрх шүргэгч хавтгайг хялбархан байгуулж чадна. P цэг бүрийн хувьд олсон N тооны хөрш цэгүүдийг уг шүргэгч хавтгайд буулгалт хийж, буулгалт хийсэн цэгүүд дээр өнцгийн шинжүүд [12] ашигласнаар тухайн цэгийн “umbrella” операторыг байгуулж чадна. Лапласын шуугиан дарах операторыг байгуулсан цэгэн олонлог тус бүр дээр ашигласан бөгөөд итерацийн тоог өөрсдөө зааж өгсөн. Зураг 5 дээр Лапласын операторын итерацийн тоо 5 болон 9 байхад гарсан үр дүнг харуулав.



Зураг 5. Лапласын операторын итерацийн тоо (a) N=5; (b) N=9.

С. Цэгэн өгөгдлийн хэмжээг багасгах

Бидний боловсруулж байгаа 3 хэмжээст цэгэн өгөгдөл дэх цэгийн тоо 1 тэрбум орчим байсан тул цэгийн тоог бууруулах шаардлага тулгарсан. Цэгэн өгөгдлийн тоог жигд бууруулахад хялбар байдаг боловч скан хийсэн эх загварын зарим нэг онцлог шинжүүд бүдэгрэх, устаж алга болох эрсдэлтэй байдаг. Иймд бид цэгэн өгөгдлийг байгуулахдаа жигд бус байхаар бууруулсан. Өөрөөр хэлбэл хавтгай хэлбэрийн гадаргуу дээр байгаа цэгийн тоог их хэмжээгээр бууруулсан бол харин ямар нэг нарийн геометр бүтэцтэй хэсэг дээрх цэгийн тоог бага хэмжээтэй бууруулсан.

Тиймээс бид цэгийн тоог бууруулахаас өмнө цэг бүр дээр муруйлтыг дараах томъёогоор [11] тооцоолсон.

$$\sigma(P) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (3)$$

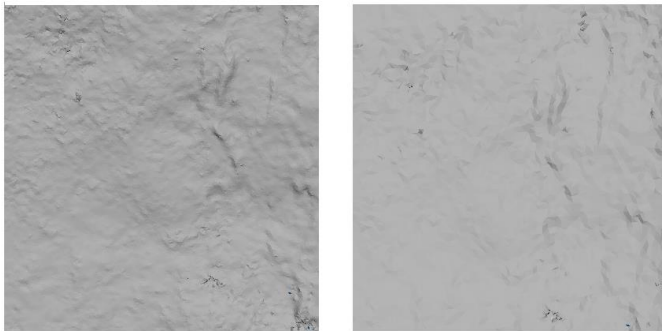
Энд $\sigma(P)$ нь P цэг дээрх муруйлтын хэмжээ, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ нь (1) томъёогоор өгөгдсөн P цэгийн коварианс матрицын хувийн утгууд.

Цэгийн хэмжээг бууруулахын тулд аль нэг P цэгээс эхлэн R радиустай бөмбөрцөг байгуулсан. Байгуулж байгаа бөмбөрцөгийн радиусын хэмжээ R дараах томъёогоор өгөгдсөн.

$$R = \frac{r}{1.0 + \sigma(P)} \quad (4)$$

Энд r өгөгдсөн радиусын хэмжээ, $\sigma(P)$ нь нь (2) томъёогоор өгөгдсөн P цэгийн муруйлтын хэмжээ. Өөрөөр хэлбэл, бөмбөрцөгийн радиус R нь $\sigma(P)$ -ээс урвуу хамааралтайгаар сонгогдож байна.

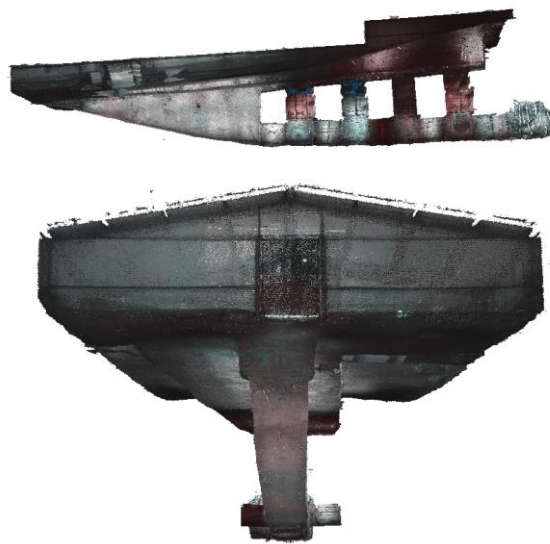
Байгуулсан бөмбөрцөгт агуулагдаж байгаа цэгүүдийг устгах үйлдлийг бүх цэгүүдийн хувьд давтан хийх замаар цэгүүдийн тоог бууруулсан. Зураг 6(a) 600,000 цэгтэй өгөгдөл, Зураг 6(b) энэ өгөгдлийг бууруулж 20,000 цэгтэй болгосон өгөгдлүүдийг харуулж байна.



(a)

(b)

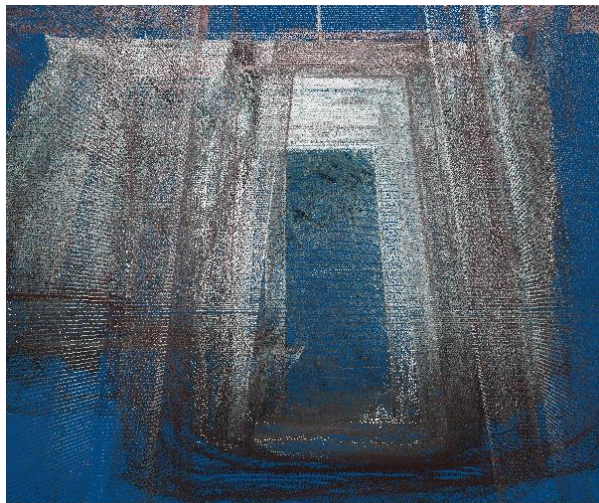
Зураг 6. (a) Анхны өгөгдөл 600,000 цэгтэй; (b) цэгийн тоог бууруулсан өгөгдөл 20,000 цэгтэй.



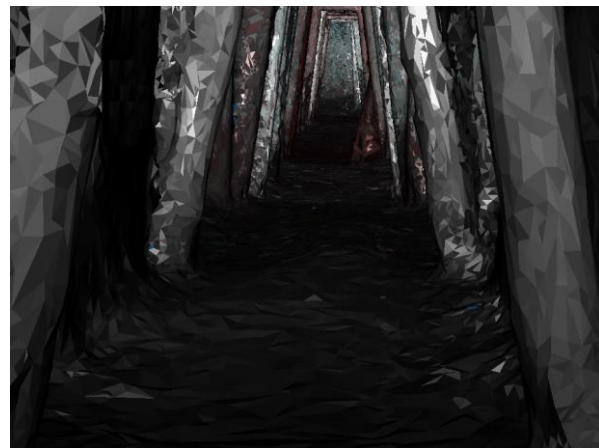
Зураг 7. Боловсруулсан цэгэн өгөгдлийн гаднаасаа харагдах байдал.

III. ТООН ТУРШИЛТ

Бид өгөгдсөн их хэмжээний өгөгдлийг Intel Xeon E-5-1603 2.8 GHz процессортой, 8 GB санах ойтой машин дээр C++ болон OpenGL графикын нээлттэй сан ашиглан гүйцэтгэсэн. Өгөгдлийг олон жижиг хэсэг буюу 930 хэсэг болгож хуваасны дараа шуугианыг арилгах Лапласын оператор хэрэглэсэн. Операторын итерацийн тоог 5 байхаар авсан. Итерацийн тоо их байхаар авахад цэгэн өгөгдлүүдээр үүсэх гадаргууг хэт гөлгөр гадаргуу болгох, гадаргуун зарим нэг геометр шинж чанарууд алдагдах эрсдэлтэй байсан. Цэгэн өгөгдөл тус бүрийг өөрийн шинж чанараас нь хамааруулан 30-100 дахин багасгасан. Түүнчлэн салангид цэгэн олонлогуудыг буцааж залгахад завсар үүсэхээс сэргийлж цэгэн олонлогуудын захын цэгүүд дээр шуугиан арилгах болон цэгийн тоо багасгах үйлдлийг хийгээгүй.



Цэгэн өгөгдлийн шуугианыг арилгаж, цэгийн тоог муруйлтаас хамааруулан жигд бусаар багасгасны дараа хуваасан олон жижиг хэсгүүдээ нэгтгэж нэг файл болгосон. Нийт цэгийн тоог багасгаж 13 сая орчим цэгтэй болгосон. Цэгэн өгөгдөл боловсруулах зарим үе шат хийгдэж буй үйлдлээсээ хамааран ихээхэн цаг хугацаа шаарддаг. Жишээлбэл, цэгэн өгөгдлийн шуугианыг арилгах, цэг бүрийн муруйлтыг тооцоход олон цагийн тооцоолол ордог.



Зураг 7-д боловсруулсан цэгэн олонлогийн гадна талын харагдах байдлыг үзүүлэв. Зураг 8-ын дээд хэсэгт бунхны дотор талын хэсгийн цэгэн олонлогийг, Зураг 8-ын доод хэсэгт энэхүү цэгэн олонлогоор байгуулсан 3 хэмжээст загварыг тус тус үзүүлэв.

Скан хийсэн анхны өгөгдөл нь цэг бүрт цэгийн анхны өнгөний мэдээллийг агуулж байсан боловч цэгийн тоог олон дахин бууруулах явцад бунхны ханан дээрх зургууд бүдгэрч ялгахад төвөгтэй болсон. Зураг 9-д бунхны ханан дээрх фото зургуудыг үзүүлэв.

Зураг 8. (дээд хэсэгт) боловсруулсан цэгэн өгөгдлийн дотор талаасаа харагдах байдал; (доод хэсэгт) уг цэгэн өгөгдлөөр байгуулсан загвар.

Иймд боловсруулсан цэгэн өгөгдлөөрөө 3 хэмжээт загвар байгуулсны дараа компьютер графикын арга техникүүд ашиглан зургийг дахин сэргээх шаардлагатай байгаа.

IV. ДҮГНЭЛТ, ЦААШИД ХИЙГДЭХ АЖЛУУД

Бид энэ ажилд их хэмжээний цэгэн өгөгдлийг боловсруулахдаа олон жижиг хэсэг болгон хуваах хялбар боловч үр дүнтэй аргыг санал болгож байна. Олон зуун саяас хэдэн тэрбум хүртэл тооны цэгүүд агуулсан их хэмжээтэй өгөгдлийг боловсруулахдаа эхлээд шууд хувааж олон жижиг файл үүсгэсний дараа цэг бүрийн x , y , z координатыг үнэлэн дахин бүлэглэсэн. Үүний дараа хэсэг бүрийн шуугианыг арилгахдаа Лапласын шуугиан арилгах итерацийн операторыг ашигласан. Мөн цэгийн тоог бууруулахдаа цэг бүрийн муруйлт дээр үндэслэн жигд бус бууруулах алгоритм хэрэглэсэн. Боловсруулж багасгасан олон хэсэг өгөгдлүүдээ нэгтгэсний үр дүнд бид анх өгөгдсөн их хэмжээний өгөгдлөөр 3 хэмжээт загварыг байгуулж чадсан.

Энэхүү виртуаль орчинд байгуулсан 3 хэмжээт бунхны загварыг археологийн судалгаа, соёлын өвийн хадгалалт хамгаалалт болон виртуаль музей байгуулахад ашиглах өргөн боломжтой юм.



Зураг 9. Бунхны ханан дээр анх байсан зурагнууд.

Талархал. Энэхүү судалгааны ажилд ашигласан цэгэн өгөгдөл, бунхны бүдүүвч зураг, хананы фото зургуудыг Монгол Улсын БСШУЯ-ны харъяа Соёлын өвийн төв болон Япон Улсын Рэцүмейкан Их Сургуулийн судлаач Ямагүчи Хирохи нараас авсан болно.

НОМЗҮЙ

- [1] R. Bernardini and H. Rushmeier. The 3d model acquisition pipeline, *Computer Graphics Forum*, vol. 21, pp. 149–172, 2002.
- [2] C. Georgiadis, P. Patias and G. Stylianou. Capturing the past and present: tools and methodologies for 3D modeling of small objects, 22nd CIPA Symposium, Japan, 2009.
- [3] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. E. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade and D. Fulk. The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues, in *Proceedings SIGGRAPH*, pp. 131–144, 2000.
- [4] M. Tsakiri, C. Ioannidis and A. Carty. Laser scanning issues for the geometric recording of a complex statue, in *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VI*, pp. 214–222, 2003.
- [5] G. Guidi, F. Remondino, M. Russo, F. Menna, A. Rizzi and S. Ercoli. A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas. *International Journal of Architectural Computing*, vol.7, no. 1, pp. 40–55, 2009.
- [6] K. Ikeuchi, T. Oishi, J. Takamatsu, R. Sagawa, A. Nakazawa, R. Kurazume, K. Nishino, M. Kamakura and Y. Okamoto. The great Buddha project: digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects, *International Journal of Computer Vision*, vol. 75, no. 1, pp. 189–208, 2007.
- [7] Elseberg, J., Borrmann, D. and Nüchter, A., 2011, October. Efficient processing of large 3d point clouds. In *Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2011 XXIII International Symposium on*(pp. 1-7). IEEE.
- [8] Puttonen, E., Lehtomäki, M., Kaartinen, H., Zhu, L., Kukko, A. and Jaakkola, A., 2013. Improved sampling for terrestrial and mobile laser scanner point cloud data. *Remote Sensing*, 5(4), pp.1754-1773.
- [9] Yu, H., Wang, R., Chen, J., Liu, L. and Wan, W., 2012, December. Saliency computation and simplification of point cloud data. In *Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2012 2nd International Conference on* (pp. 1350-1353). IEEE.
- [10] Taubin, G., 1995, June. Curve and surface smoothing without shrinkage. In *Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on* (pp. 852-857). IEEE.
- [11] 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.
- [12] Lars Linsen. Point cloud representation. Technical report, University of Karlsruhe, Germany, 2001.