

**CGH (COMPUTER-GENERATED HOLOGRAPHY)
KOMPYUTERDA YARATILGAN GOLOGRAMMALAR,
ULARNING ILMIY ASOSOLARI VA RIVOJLANISHI**

Savriyev Sunnat Sobir o‘g‘li

Muhammad Al-Xorazmiy nomidagi Toshkent

Axborot Texnologiyalari Universiteti magistri

Tel: +998931090508,

E-mail:sunnatsavriyev39@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada kompyuterda yaratilgan gologrammalar — CGH (Computer-Generated Holography) texnologiyasi, uning ilmiy asoslari va rivojlanish bosqichlari yoritilgan. CGH texnologiyasi ob’ektlarning optik gologrammalarini kompyuter algoritmlari yordamida raqamli tarzda yaratish imkonini beradi. An’anaviy optik golografiyadan farqli ravishda, CGH virtual va dinamik sahnalarni qayta tiklashga imkon beradi. Maqolada CGH ning asosiy modellari — nuqtali, maydonli, lazerli, va ko‘pburchakli modellari tahlil qilinadi. Ayniqsa nuqtali CGH usuli batafsil yoritilib, unda har bir ob’ekt nuqtasi yorug‘lik manbai sifatida qaraladi va sferik to‘lqinlar orqali gologramma hosil qilinadi. Shuningdek, FP (Fresnel Pattern), LUT (Look-Up Table) va WRP (Wavefront Recording Plane) kabi hisoblash tezligini oshiruvchi usullar tushuntirilgan.

Kalit so‘zlar: CGH(Computer-Generated Holography), Diffraktsiya, Diafragma, FP(Fresnel Pattern), LUT, WRP (Wavefront Recording Plane)

Kirish

1.Golografiya va kompyuter golografiyasi

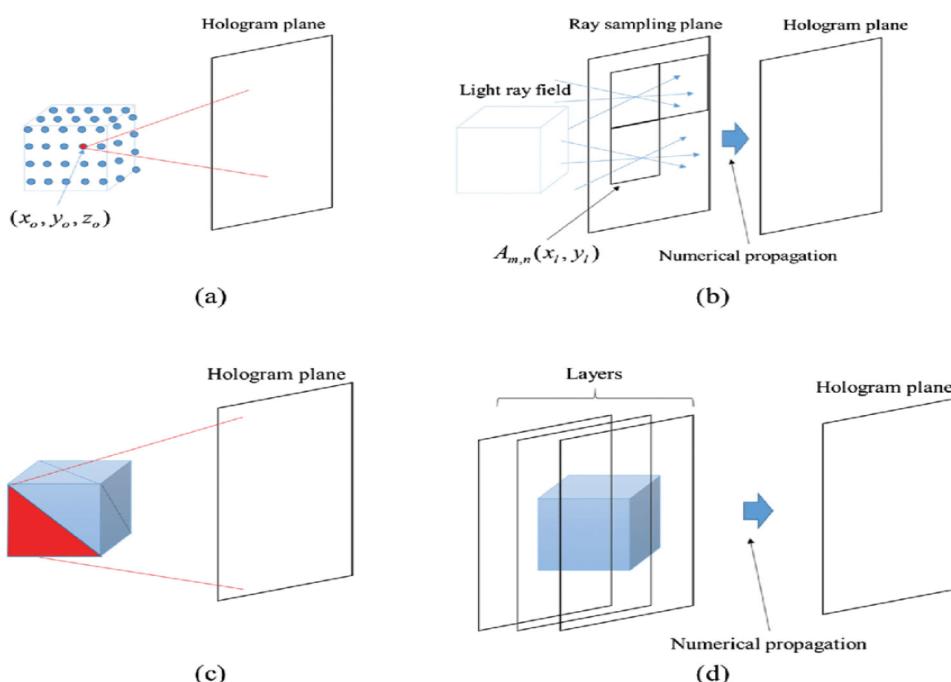
Golografiya 1947-yilda Dennis Gabor tomonidan golografiya nazariyasi ilgari surilgan, ammo bu texnologiya faqat lazerlar ixtiro qilinishi bilan rivojlanishni boshladi. Gaborning dastlabki golografiyasi elektron mikroskopiyada aniqlikni oshirish uchun ishlab chiqilgan edi.

Kompyuter golografiyasi-bu tasvir gologrammasini yaratishda kompyuter algoritmlaridan foydalaniladigan texnikadir. Kompyuterda yaratilgan gologramma dinamik gologramma displayda ko‘rsatilishi yoki litografiya yordamida niqob yoki plyonka yuzasiga chop etilishi mumkin. Gologramma niqob yoki plyonkaga chop etilganda, u gologramma tasvirlarni ko‘rsatish uchun ma’lum yorug‘lik manbayi bilan yoritiladi. Agar mavjud ob’ektlarning gologramma ma’lumotlari optik tarzda yaratilsa va raqamli ravishda yozib olinsa va qayta ishlansa va keyinchalik ko‘rsatilsa, bu ham CGH deb ataladi.(Alonso, M. A., & Wolf, E. (2019))[1]

Kelajakda CGH modellarini turli xil sohalarda faol qo‘llash mumkin masalan:

sanoatda, tibbiyotda, arxitekturada. Ta'lif muassasalarida talaba va o'quvchilarni o'qitishda 3D golografiyadan foydalanish afzal. Tibbiyotda ham operatsiya jarayonida bemorlarning ichki a'zolarini 3D golografiyada ko'rish ish samaradorligini ancha oshiradi, axritekturada - bino va inshootlarning qurilishida avval 3D tasviri yaratilib o'sha asosida qurilishlar olib boriladi.

An'anaviy optik golografiya bilan solishtirganda, CGH virtual sahnalarni va dinamik sahnalarni qayta qurish qobiliyati kabi aniq afzalliklarga ega. Jismoniy simulyatsiyaga asoslangan CGH algoritmlarini nuqtaga asoslangan usulga, nurga asoslangan usulga, ko'pburchaklarga asoslangan usulga va qatlamga asoslangan usulga bo'lish mumkin. Bularga misol qilib esa 1- rasmda keltirilgan usullarni ko'rish mumkin. (Goodman, J. W. (2017)) [3]



1-rasm Turli CGH usullari: (a) nuqtaga asoslangan, (b) nurga asoslangan, (c) qatlamga asoslangan, (d) ko'pburchakka asoslangan.

Nuqtaga asoslangan CGH usuli

Gyugens-Fresnel tamoyiliga asosan (bu tamoyil har bir nuqtaning to'lqin manbai sifatida qaralishiga asoslanadi). Uch o'lchovli sahnaning modeli N nuqtali uch o'lchovli nuqta massiviga olingan. Keyin har bir nuqta sferik to'lqinlarni chiqaradigan nuqta yorug'lik manbai sifatida qabul qilinadi. Yakuniy kompleks amplituda gologrammasini olish uchun gologramma tekisligidagi har bir nuqtaning kompleks amplituda taqsimoti qo'shiladi. Gologramma tekisligidagi optik maydonni bitta nuqtadan tasvirlash mumkin.(Chellappan, K. V., Erdenebat, M., & Tsang, P. W. M. (2021))[2]

$$H_0(x, y) = U_0 \cdot \exp(-j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2}) \quad (1)$$

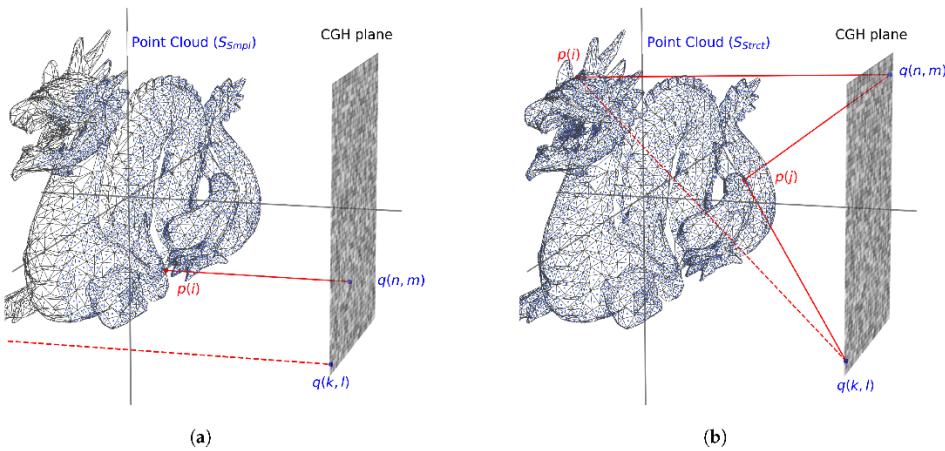
- H₀(x, y)** – gologramma tekisligidagi kompleks to‘lqin maydoni;
- U₀** – boshlang‘ich to‘lqin amplitudasi (yorug‘lik kuchi);
- j** – imaginariya birlik ($j = \sqrt{-1}$);
- λ** – yorug‘lik to‘lqin uzunligi;
- (x, y)** – gologramma tekisligidagi koordinatalar;
- (x₀, y₀, z₀)** – 3D fazodagi obyekt nuqtasining koordinatalari;
- exp** – to‘lqinning fazasini (bosqichini) ko‘rsatadi.

Bu usul eng ko‘p qo‘llaniladigan CGH usullaridan biri nuqta buluti usuli ham deyiladi. Bunga tenglikni diskretlash orqali erishiladi. 1 S va amplitudalar U sirtlaridan namuna olish yo‘li bilan. (Lohmann, A. W., & Paris, D. W. (1967)) [5]

$$H(x) = H(x_h, y_h, z_h) = \sum_{j=1}^N a_j \left(\frac{\exp(i k * ||p_j - x||)}{||p_j - x||} \right) \quad (2)$$

- H(x_h, y_h, z_h)** – gologramma tekisligidagi yakuniy to‘lqin maydoni;
- a_j** – j-chi nuqtaning yorqinligi (amplitudasi);
- N** – obyektni tashkil etuvchi nuqtalar soni;
- p_j** – j-chi nuqtaning koordinatalari (x_j, y_j, z_j)(x_j, y_j, z_j)(x_j, y_j, z_j);
- x** – gologrammadagi hisoblanayotgan nuqta koordinatasi;
- ||p_j - x||** – obyekt nuqtasi bilan gologrammadagi nuqta orasidagi masofa;
- k = 2π/λ** – to‘lqin soni;

Bu yerda biz umumiyligini yo‘qotmasdan gologramma tekisligi bilan mos keladi deb taxmin qilamiz (xy) samolyot, shuning uchun x = (x_h; y_h; z_h = 0). Ushbu sferik to‘lqin jabhalari ko‘pincha parabolik to‘lqin jabhalari bilan aniq yaqinlashishi mumkin. Uning namuna shakli 2-rasmida keltirilgan



2-rasm Zich va ancha siyrak joylashgan nuqtali golografiya usuli.

(a) Nuqtaga asoslangan CGH usuli: Obyekt nuqtalar buluti sifatida ifodalanadi. Har bir nuqtaning faza va amplitudasi hisoblanib, gologramma tekisligiga proyeksiyalanadi. Bu usul hisoblashni soddalashtiradi va kam nuqtalar bilan ishlaydi.

(b) Nuqtaga asoslangan to‘liq CGH usuli: Obyekt yanada zichroq nuqtalar to‘plami bilan ifodalanadi. Har bir nuqta va ularning o‘zaro munosabatlari aniq hisoblanib, gologramma tekisligiga uzatiladi. Bu usul yanada murakkab, lekin realistik natija beradi.

1960-yillarda Kozma va Kelli kompyuter va fazoviy chastota domenini filtrlash texnologiyasini birlashtirib, mos keladigan fazoviy filtrlarni sun’iy ravishda loyihalashtirdilar, bu esa kompyuterda yaratilgan golografiyaga asos soldi. 1966 yilda Lohmann va Braun optik to‘lqin jabhalarini kompyuter orqali gologrammalarga kodlash uchun aylanma faza usulini ishlab chiqdilar. 1967 yilda Lohmann va Parij Fourier konvertatsiyasini CGH ni hisoblash uchun tez Furye transformatsiyasi (FFT) algoritmini qo‘lladilar, bu esa hisoblash vaqtini sezilarli darajada qisqartirdi. 1974 yilda Lesem va boshqalar. yuqori diffraktsiya samaradorligiga ega bo‘lgan va hozirgi CGH texnologiyasida juda muhim maqomga ega bo‘lgan taklif qilingan kinoform. 1980-yillardan boshlab turli xil CGH algoritmlari ketma-ket paydo bo‘ldi. Shu bilan birga, akusto-optik modulyatorlar, raqamli mikromirror qurilmalari va suyuq kristall displeylar kabi yangi modulyatsiya qurilmalari kompyuterda yaratilgan golografiyada qo‘llanildi. So‘nggi o‘n yil ichida kompyuter va materiallarning jadal rivojlanishi bilan kompyuterda yaratilgan golografiya katta muvaffaqiyatlarga erishdi va yaqin kelajakda tijoratlashtirilishi kutilmoqda. Hozirgi vaqtda kompyuterda yaratilgan golografiyada duch keladigan qiyinchiliklar, asosan, quyidagi jihatlarga e’tibor qaratilmoqda: Birinchidan, joriy hisoblash algoritmlari yetarlicha tez emas; ikkinchidan, mavjud algoritmlarda cheklangan rekonstruksiya sifati muammosi mavjud; uchinchidan, an’anaviy rangli gologramma display tizimi murakkab; nihoyat, SLM ning kiruvchi shartlari va modulyatsiya aniqligi golografik display effektiga to‘sinqinlik qiladi.

3D ob'ekt millionlab nuqtalar bilan ifodalangan nuqtaga asoslangan usul CGHlarni hisoblash uchun oddiy va keng qo'llaniladigan usuldir. Hisoblashda har bir ob'ekt nuqtasi o'z-o'zidan yorug'lik manbasi sifatida qaraladi va gologramma tekisligini nurlantiradigan sferik to'lqin chiqaradi. Gologramma tekisligida murakkab amplituda taqsimotini ob'ektning barcha nuqtalarining FP(Fresnel Pattern) larini superpozitsiya qilish orqali olish mumkin. Yuqorida ko'rinish turibdiki, nuqtaga asoslangan usulda asosiy hisob-kitob FPni yaratishdir. Demak, agar barcha mumkin bo'lgan ob'ekt nuqtalarining FPlarini oldindan hisoblash va kompyuterda saqlash mumkin bo'lsa, hisoblash yukini keskin kamaytirish mumkin. Ushbu g'oyadan ilhomlangan Lusente, oflayn hisoblash va onlayn hisoblashdan iborat usulni qidirish jadvalini (LUT) taklif qildi. Oflayn hisoblashda barcha mumkin bo'lgan ob'ekt nuqtalarining FPlari oldindan hisoblab chiqiladi va jadvalda saqlanadi. Onlayn hisoblashda CGHlar har bir ob'ekt nuqtasining oldindan saqlangan FP ni uning amplitudasiga ko'paytirilgandan keyin o'qish va superpozitsiya qilish orqali hosil qilinadi. LUT usuli nuqtaga asoslangan usul bilan solishtirganda gologramma yaratishni tezlashtiradi va hisoblash tezligi uchun savdo xotirasidan foydalanish nuqtai nazaridan eshikni ochadi. Biroq, LUT usulida oldindan hisoblangan FPni saqlash uchun zarur bo'lgan xotiradan foydalanish juda katta.

LUT xotirasidan foydalanishni kamaytirish uchun yangi LUT (N-LUT) usuli taklif qilindi. N-LUT usulida 3D ob'ekt eksenel yo'naliш bo'y lab bir nechta 2D tilimlangan tekisliklarga bo'linadi va faqat asosiy chekka naqsh (PFP) deb ataladigan har bir kesilgan tekislikdagi markaziy ob'ekt nuqtasining FP si oldindan hisoblab chiqiladi va jadvalda saqlanadi. Boshqa ob'ekt nuqtalarining FPlarini fazo koordinatalaridagi nisbiy pozitsiya munosabatiga ko'ra PFPni bir xil kesilgan tekislikda siljitch yo'li bilan hisoblash mumkin va CGHlar mos keladigan amplitudaga ko'paytirilgandan so'ng barcha ob'ekt nuqtalarining siljigan PFPlarini yig'ish yo'li bilan olinadi. N-LUT usulining xotira talabi LUT usuli bilan solishtirganda keskin kamaygan bo'lsa-da, u hali ham katta va ma'lumotlarni yig'ish tezligiga jiddiy ta'sir qiladi. Ba'zi kerakli 3D ob'ektlar uchun qo'shni ob'ekt nuqtalari bir xil intensivlik va chuqurlik qiymatiga ega. Ushbu hodisaga asoslanib, N-nuqtali PFPlar on-layn hisoblash o'rniga qo'shni ob'ekt nuqtalarining FPlarini off-line hisoblashda to'plash orqali hosil bo'ladi. Shu tarzda, N-LUT usuli bilan solishtirganda on-layn hisoblash miqdori kamayadi. Ushbu usul CGH hisobini tezlashtirish uchun samarali bo'lsa-da, u barcha kerakli 3D ob'ektlar uchun umumiyl usul emas. Shu sababli, olimlar hisoblash tezligi, xotiradan foydalanish va aniqlik o'rtasida yaxshiroq muvozanatga erishish uchun keyingi tadqiqotlarni amalga oshirdilar. Bir xil bo'lмаган namuna olish qo'shimcha onlayn hisob-kitoblarsiz saqlash hajmini kamaytirishning samarali usuli hisoblanadi. Shunga qaramay, bitta chuqurlik tekisligi uchun saqlangan ma'lumotlar hali ham 2D matritsadir. (Meng, J., Zhang, H., & Zhang, Y) [6]

Tez hisoblash usuli

Nuqtaga asoslangan usulda hisoblashni tezlashtirishning yana bir usuli - har bir ob'ekt nuqtasining hisoblash mintaqasini qisqartirish. Hisoblashni tezlashtirish uchun virtual tekislik bo'lgan va 3D ob'ekt va gologramma o'rtasida joylashgan to'lqinli frontni yozish tekisligi WRP (Wavefront Recording Plane) ishlab chiqilgan. Bu usul ikki bosqichdan iborat. Birinchi bosqichda WRPda 3D ob'ektning murakkab amplituda taqsimoti nuqtaga asoslangan usul bilan qayd etiladi. Ikkinci bosqichda, CGH bo'yicha kompleks amplituda taqsimoti WRP va CGH o'rtasidagi konvolyutsiya shaklining Fresnel diffraktsiyasini bajarish orqali hisoblanadi. (Lee, B., & Jeong, Y. (2020))[4] WRP 3D ob'ektning amplitudasi va fazasi haqida ma'lumotga ega bo'lganligi sababli, WRP dan CGH ga diffraktsiyani hisoblash 3D ob'ektidan CGH bo'yicha kompleks amplituda taqsimotini hisoblash uchun tengdir. Agar WRP 3D ob'ektga yaqindan joylashtirilgan bo'lsa va 3D ob'ektning qalinligi kichik bo'lsa, har bir ob'ekt nuqtasi maksimal diffraktsiya burchagi cheklovi tufayli WRPda faqat kichik hududni qamrab olgan to'lqin jabhasini chiqaradi. Shu tarzda, hisoblash yoki keskin kamayishi mumkin, chunki WRPdagi FP hajmi CGH ga qaraganda ancha kichikdir. (Goodman, J. W. (2017)) [3] Keyinchalik tezlashtirishni olish uchun LUT usuli birinchi bosqichda qo'llanilishi mumkin. Yuqorida ko'rinish turibdiki, WRP usuli kichik chuqurlikdagi 3D ob'ektlar bilan ishlashda juda samarali, chunki WRPdagi FP o'lchamlari ob'ekt nuqtasi va WRP o'rtasidagi masofaga proporsionaldir. Boshqacha qilib aytganda, agar 3D ob'ektning chuqurlik diapazoni katta bo'lsa, hisoblash samaradorligi keskin kamayadi. Ushbu muammoni hal qilish uchun ikkita WRP va bir nechta WRP usullari taklif qilindi. Ushbu usullarda 3D ob'ekt eksenel yo'nalish bo'ylab kichik chuqurlik diapazoni bo'lgan ikki yoki undan ortiq mintaqalarga bo'linadi. Keyin tegishli mintaqaning to'lqin jabhasini yozish uchun har bir mintqa yaqinida WRPlar joylashtiriladi va CGHlar nihoyat barcha WRPlarning hissalarini yig'ish orqali hosil bo'ladi. Bundan tashqari, WRP usuli, shuningdek, chuqur struktura ob'ektning sahnasining CGHlarini yaratish uchun taklif qilingan. WRP usuli hisoblash miqdorini kamaytirish uchun to'lqinli konvertatsiya ham qo'llanilgan. (Ozaktas, H. M., & Mendlovic, D. (1995)) [7]

CGH hisoblashda FP, LUT, WRP metodlarining afzallik va kamchiliklari jadvali

1-jadval

Algoritm nomi	Ish tezligi	Afzalliklari	Kamchiliklari
FP (Fourier Transform-based method)	O'rta	- Hisoblash aniqligi yuqori - Katta hajmli 3D sahnalarni to'liq	- Hisoblash resurslari ko'p talab etiladi - Real vaqt (real-time)

		modellashtira oladi	tizimlarda sekin ishlaydi
LUT (Look-Up Table method)	Eng tez	- Hisoblash tezligi juda yuqori - Oldindan hisoblangan natijalarni tezda chaqiradi - Real-time tizimlar uchun qulay	- Xotira (memory) sarfi katta - Oldindan tayyorlangan ma'lumotlar aniqligini cheklaydi
WRP (Wavefront Recording Plane method)	O'rtacha–Tez	- 3D sahnalarni bosqichma-bosqich qayta ishslash imkonini beradi - Aniqlik va tezlik o'rtaida muvozanatni ta'minlaydi	- Murakkab implementatsiya - Ayrim optik buzilishlar paydo bo'lishi mumkin

Xulosa

Xulosa qilib aytganda Kompyuterda yaratilgan gologrammalar golografiyada keng qo'llaniladi va tez hisoblash usullariga ega. Bu texnologiya yordamida haqiqiy ob'ektlarsiz ham fazoviy tasvirlarni yaratish mumkin bo'lib, bu virtual reallik, tibbiyot, mikroskopiya, 3D displeylar va kvant hisoblash kabi sohalarda keng qo'llanilmoqda. CGH ning nuqtali, maydonli, lazerli va ko'pburchakli modellari orasida nuqtali model eng asosiy hisoblanadi. Nuqtali CGH hisolash modeli bo'yicha tez hisoblash va natija olish usullari ko'rsatib o'tilgan xususan, hisoblash murakkabligi tufayli **Fresnel**, **Fourier**, **WRP** kabi algoritmik yondashuvlar samaradorlikni oshirishda muhim ahamiyatga ega. Kelajakda bu texnologiyadan keng foydalangan holda to'liq 3D golografiyaga o'tish kutilmoqda. Yuqorida takitlanganidek jamiyatning turli jabhalarida golografiyadan foydalanish ish samradorligini, aniqligini oshirishda juda foydali bo'la oladi, xususan televediniyada ham filmlarni hech qanday vositalarsiz 3D shaklda oddiy ko'z bilan ko'ra olishimiz mumkin, bu esa juda kata yutuq beradi.

Foydalilanigan adabiyotlar:

- Alonso, M. A., & Wolf, E. (2019).** Modern Optical Holography: Principles and Applications. Cambridge University Press DOI: 10.1017/9781108482156
- Chellappan, K. V., Erdenebat, M., & Tsang, P. W. M. (2021).** Recent advances in computer-generated holography for 3D display applications light: Advanced Manufacturing, 3(5), 035. <https://www.light-am.com/en/article/doi/10.37188/lam.2022.035>

3. **Goodman, J. W. (2017).** Introduction to Fourier Optics (4th ed.). W. H. Freeman and Company.
4. **Lee, B., & Jeong, Y. (2020).** Holographic display technologies for augmented and virtual reality. Sensors, 25(20), 6492. <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/20/6492>
5. **Lohmann, A. W., & Paris, D. W. (1967).** Binary Fraunhofer holograms, generated by computer. Applied Optics, 6(10), 1739–1748.DOI: 10.1364/AO.6.001739
6. **Meng, J., Zhang, H., & Zhang, Y. (2022).** Holographic displays: Principles and techniques for three-dimensional imaging. Frontiers in Photonics, 3, 9314381
7. **Ozaktas, H. M., & Mendlovic, D. (1995).** Fourier optics and computer-generated holography: A comparative study. Journal of the Optical Society of America A, 12(4), 743–751.DOI: 10.1364/JOSAA.12.000743