

全息影像/混合式雙向光跡追蹤演算法 (Hologram/Hybrid bi-directional Ray Tracing)

指導教授：翁世光 組別成員：施皓程、劉軒宏

摘要

• 動機

傳統光線追蹤多僅模擬單向光線傳遞，難以真實呈現間接光照與焦散等效果；同時，對體積材質的支援也有限。另一方面，全息影像雖可重現立體深度與干涉現象，但其模擬仍具技術門檻。本專題分為兩個獨立方向：「混合式雙向光跡追蹤」與「全息影像」兩項技術，兩部分分別聚焦於幾何光學與波動光學，目的在於提升對光學渲染與立體影像重建的理解。

• 摘要

1. 混合式雙向光跡追蹤部分

本系統以 C 語言實作，結合 OpenGL、GLAD、FreeGLUT 與 CUDA 進行平行加速。為克服 GPU 遲迴效能瓶頸，採用「Ray Tree」結構 [1] 記錄光線的反射與折射關係，能同時模擬反射、折射、焦散與間接光照等光學現象，最終在 512×512 圖像中實現約 21 倍加速。

2. 全息影像部分

使用波動光學模型計算干涉與相位分布，以生成包含深度資訊的數位全息圖，並透過波前重建方法產生立體全息影像，展示全像重建的可行性。

模型架構

1. 混合式雙向光跡追蹤部分

本模型以 C 語言為核心，結合 OpenGL、GLAD、FreeGLUT 與 CUDA 建構混合式雙向光跡追蹤架構。整體流程可分為三大部分：光線生成、Ray Tree 結構建構、與影像合成渲染。其中，光線生成階段自相機與光源雙向發射光線，以提升間接光照與焦散模擬的準確度；Ray Tree 結構取代傳統遞迴追蹤，記錄光線的反射與折射關係，避免 GPU 遲迴；最終在影像合成階段整合各次結果，生成具真實光照的影像。

2. 全息影像部分

本模型採用波動光學建立全息影像流程。先以振幅與相位描述物光形成複數光場，再與參考光干涉生成數位全息圖；最後透過菲涅耳或傅立葉方法重建光場，呈現具深度的全息影像。

傳統的CGH比如點雲方法，需要對整個場景的點在記錄平面上做計算，速度相對較慢，因此參考了論文[2]的方法，從自己的ray tracer基礎上修改，實作了計算場景光場的模型，流程如下：

1. 從 Hologram plane 的每一pixel發出光線，取得場景資訊，紀錄相位變化

2. 在每個像素對所有Ray sample累加，之後用Kinoform相位編碼產生數位全息影像圖，再用傅立葉變換模擬光場傳播。

最後用OpenGL輸出結果，生成記錄場景光場資訊的全息影像圖。

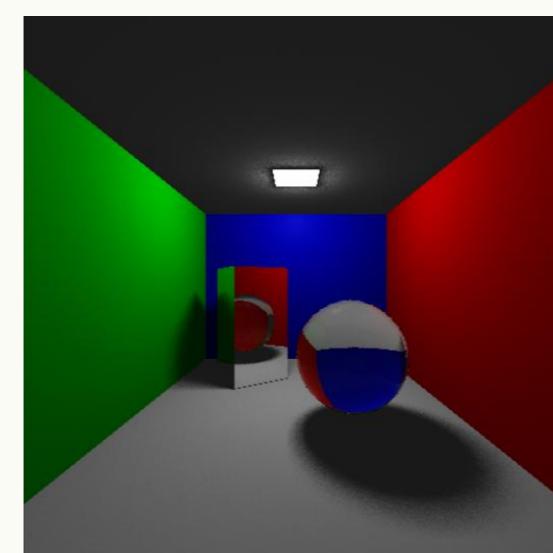
實驗結果

1. 混合式雙向光跡追蹤部分

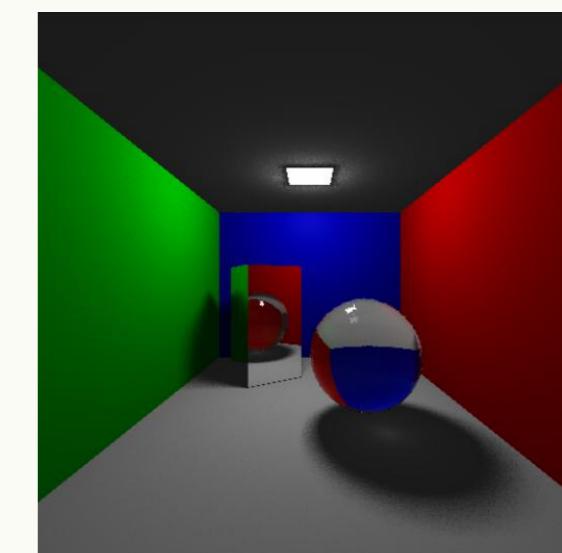
• 實驗環境

CPU	RAM	GPU
Intel i5-13500	80GB	RTX 1060

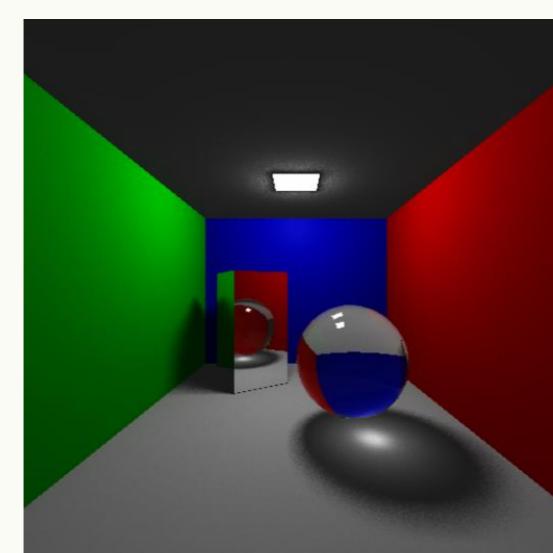
• 所有圖片皆以 50 張圖片做平均而得



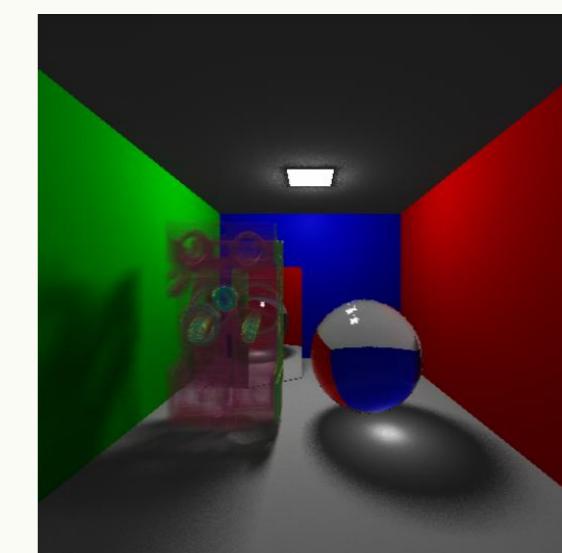
▲ 0條間接光源結果
(平均一張4秒)



▲ 100條間接光源結果
(平均一張2分鐘10秒)



▲ 1000條間接光源結果
(平均一張21分鐘)

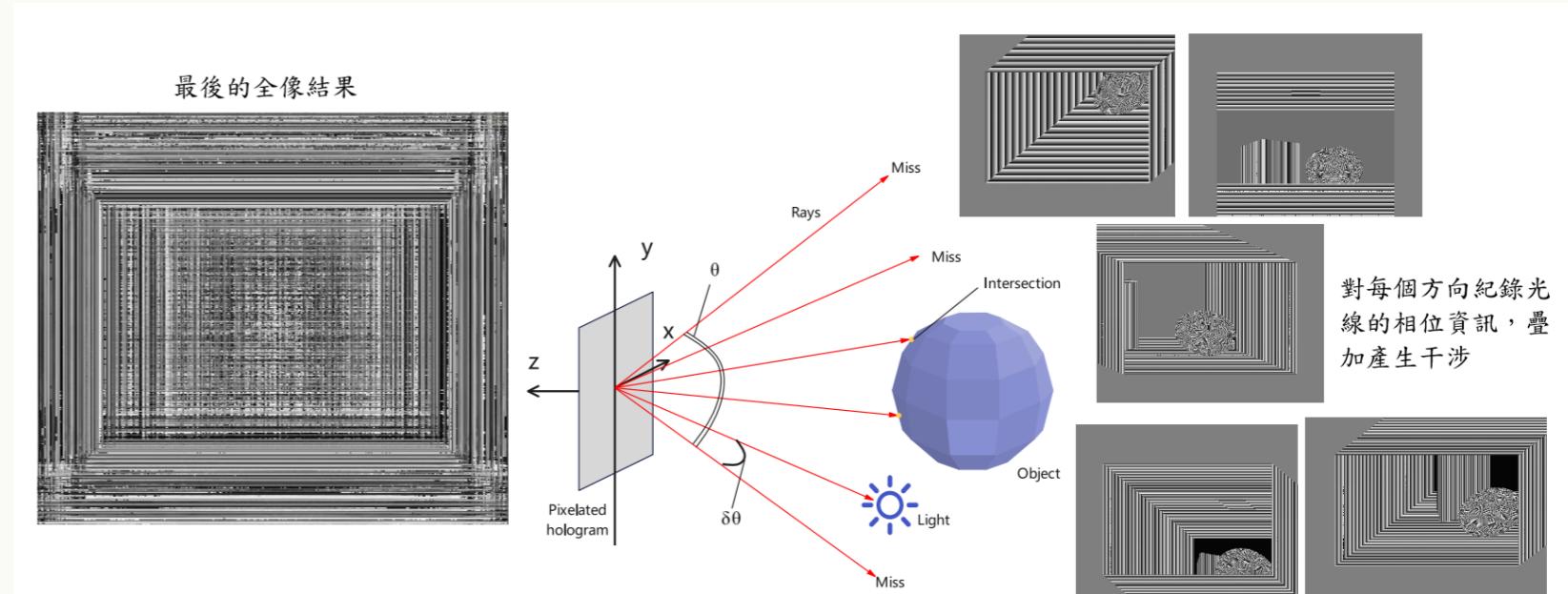


▲ 1000條間接光源結果
(含體積模型，平均一張53分鐘45秒)

2. 全息影像部分

• 實驗環境

CPU	RAM	GPU
Intel i5-13500	16GB	RTX 3060



結論

在本專題中實作了混合式雙向光跡追蹤與全息影像生成兩項光線追蹤的應用。

在光跡追蹤部分，採用Ray Tree結構取代傳統遞迴，使GPU能有效處理多次反射與折射；且能處理體素和三角片混合場景中的光線效果，並生成具真實感的渲染結果。

在全息影像部分，將光跡追蹤所得光線資訊延伸至相位與干涉計算實作結合Ray Tracing與干涉模型的電腦全息圖生成流程。系統以CUDA平行化實作光線追蹤，並在全像平面累積複振幅，最後經相位編碼產生Kinoform CGH。

參考資料

[1]葉之霆，改良式實體成像光跡追蹤，An Improved Ray Tracing Method for Volume Rendering，國立台灣海洋大學碩士論文 2025 年 8 月

[2] Xindi Chen, et al., Photorealistic Rapid Computer-Generated Holography Employing an Enhanced Path Tracing Technique With Sequence Generated Trial, IEEE Photonics Journal, vol. 15, no. 5, Oct., 2023

Youtube

