

從逐點掃描到體積光場：超精密 3D 列印、體積式增材製造與 AOCLS 的真正分工

v2.0 / Neo.K

<https://thisoneisneok.com/html/papers/ccp-06.html>

英文題名：From Point Scanning to Volumetric Light Fields: The Real Division of Labor among
Ultraprecision 3D Printing, Volumetric Additive Manufacturing, and AOCLS

作者：Neo.K

機構：一言諾科技有限公司（EveMissLab）

版本：v2.0 公開修訂版

日期：2026 年 7 月

文件類型：技術評論／比較框架／研究定位文章

原稿：〈醒醒吧！為什麼「超精密 3D 列印」永遠幹不掉 AOCLS〉

證據等級：AOCLS 為 E0 架構提案；比較技術依公開文獻分級

SECTION

摘要

「超精密 3D 列印能否取代 AOCLS」並不是一個適當的技術問題。它把多種彼此差異極大的製程都壓縮成單一的「3D 列印」，又把仍屬架構提案的 AOCLS 當成已經完成的單一製造設備。更重要的是，近年的技術發展已經打破「3D 列印必然逐點或逐層」的二分法：雙光子聚合正在透過多焦點、投影與連續掃描提高並行度；計算軸向光刻、斷層體積式增材製造、全像體積式製造與 2026 年出現的亞秒級體積光場方法，則已能在整個感光體積中累積三維劑量。

本文將原始對立命題重寫為一個可驗證的製程比較框架。核心結論是：

- 解析度、體積吞吐量、材料範圍、幾何自由度、功能精度與批量經濟性之間存在耦合，不存在單一技術全面支配。
- 逐點掃描的序列成本確實存在，但不能用總體素數直接等同實際列印時間；稀疏填充、輪廓掃描、多焦點、投影曝光與自適應路徑都會改變複雜度。
- 體積式製造具有顯著速度優勢，但並行光場不是免費的：光學擴展量、總光功率、背景劑量、散射、材料透明度、化學閾值、熱與收縮會共同限制解析度與體積。
- AOCLS 的合理差異性不是「它使用光場，而其他技術不使用」，而是把多模態觀察、目標推斷、可製造性編譯、光場／製程選擇、數位雙生、實造量測與閉環修正整合成一個製造控制平台。
- 在缺乏實驗設備、材料資料、良率、成本與重現紀錄以前，AOCLS 不能宣稱固定的速度倍率、解析度、設備價格或量產區間。

因此，本文不再宣告某一技術「永遠幹不掉」另一技術，而是提出一個更強、也更能持續成立的命題：

未來微納製造的競爭，不是逐點、逐層與體積光場之間的零和戰爭，而是不同空間並行度、材料轉換機制、量測閉環與製程編排能力之間的多目標競爭。

關鍵詞：AOCLS、雙光子聚合、計算軸向光刻、體積式增材製造、全像光刻、製造吞吐量、解析度、閉環製造、可製造性編譯

SECTION

1.1 「3D 列印」不是一種物理原理

日常語言中的「3D 列印」至少包含以下不同製程族：

- 熔融材料擠出；
- 噴墨與材料噴射；
- 粉床熔融；
- 單光子光固化；
- DLP／SLA 面投影；
- 雙光子或多光子直接雷射寫入；

- 多焦點與投影式雙光子聚合；
- 計算軸向光刻；
- 斷層體積式增材製造；
- 全像與結構光體積製造；
- 光片、聲光界面與其他新型快速製程。

這些方法的光源、材料、非線性、自由度、速度與尺度完全不同。把它們全部描述為「一個點一個點，或一層一層」已經不符合 2026 年的技術現況。

體積式增材製造本身通常也被歸入 3D printing/additive manufacturing。因此：

AOCLS 使用體積式光製造

not⇒

AOCLS 不屬於廣義 3D 列印。

真正需要問的是：AOCLS 相較既有製程，在感知輸入、製程選擇、空間並行度、材料適配、閉環控制與證據輸出上，是否形成新的系統級能力。

SECTION

1.2 AOCLS 不是一台已完成的印表機

AOCLS v2.0 的合理定位是：

AI-assisted Observation-guided Closed-Loop Synthesis

人工智慧輔助觀察導向閉環製造平台。

它包含：

多模態觀察

→

不確定性物體假說

→

目標雙生

→

這表示 AOCLS 可以調度雙光子、DLP、計算軸向光刻、CPOP 結構光、沉積、蝕刻、材料轉換與後處理。它的潛在差異是系統整合層，不是只靠一片錐形透鏡完成任意物體的一次曝光。

SECTION

2.1 原稿的體素計算何時成立

若以各向同性解析度 Δ 離散一個體積 V ，完整網格的體素數約為：

$$\begin{aligned} N_{\text{(grid)}} \\ &= \\ &(V)/(\Delta^3). \end{aligned}$$

對 1 mm^3 與 $\Delta=100 \text{ nm}$ ：

$$\begin{aligned} N_{\text{(grid)}} \\ &= \\ &((10^3)/((10^{-7}))^3) \\ &= \\ &10^{12}. \end{aligned}$$

這個數學本身沒有錯，但它只代表完整三維網格的離散數量，不等於所有製程都必須逐一處理 10^{12} 個獨立體素。

實際加工量取決於：

- 結構是實心、薄殼、晶格還是稀疏支架；
- 是否只掃描輪廓；
- hatch spacing 與 layer spacing；
- 光聚合體素的真實尺寸與重疊；
- 是否多焦點並行；
- 是否採用投影或體積劑量累積；
- 掃描器、材料與光功率是否允許標稱速度；

- 拼接、換區、對焦、顯影與後處理時間。

因此更合理的逐點／逐線模型是：

$$\begin{aligned} T_{\text{serial}} &\approx \\ & (N_{\text{active}}) / (M f_{\text{eff}} \eta_{\text{duty}}) \\ & + \\ & T_{\text{stitch}} \\ & + \\ & T_{\text{motion}} \\ & + \\ & T_{\text{post}}, \end{aligned}$$

其中：

- N_{active} 是真正需要曝光的有效體素或軌跡單元；
- M 是同時工作的焦點數；
- f_{eff} 是有效聚合速率；
- η_{duty} 是包含加減速、能量限制與資料處理後的工作週期。

SECTION

2.2 多焦點雙光子已改變「純序列」假設

2024 年的高吞吐雙光子研究已展示超過 400 個同步焦點，最高報告速率約為：

$$1.49 \times 10^4 \text{ voxels/s.}$$

即使以理想化的 10^{12} 體素除以該速率，理論下界也會從原稿估計的數日或數月降至數小時量級，而不是固定的 116 天。這仍不代表實際列印一個完全實心、100 nm 等向解析的 1 mm^3 物件只需數小時，因為能量共享、焦點均勻性、材料閾值、掃描路徑、拼接與後處理仍可能顯著增加時間。

這個例子說明：

序列成本是真問題，但任何固定倍率都必須綁定具體設備、材料、幾何與品質要求。

SECTION

2.3 層式投影也不是「每層固定十五秒」

對層式製程，可用：

```
T_(layer)
=
N_L
(
T_(exposure)
+
T_(recoat)
+
T_(settle)
+
T_(motion)
)
+
T_(post).
```

但 N_L 與每層時間不是常數。連續液面製程、高速剝離、滑動界面、灰階投影與自適應層厚均可降低時間；反之，高黏度材料、熱累積、剝離力、氧抑制與尺寸精度要求會增加時間。

所以 DLP／SLA 的真正限制不是「必然需要一萬層，每層十五秒」，而是：

- 光學像素、視場與數值孔徑的解析度—面積權衡；
- z 向層厚與曝光深度；
- 層間力學、收縮與各向異性；
- 大面積均勻照明與設備標定；
- 材料補液、剝離和熱化學速度。

3.1 從幾何掃描轉向劑量合成

斷層體積式增材製造的基本思想不是逐點寫入，而是在不同角度投影二維圖樣，使三維空間中累積的光劑量超過材料聚合閾值：

$$D(x) = \sum_{k=1}^K \text{cal-P}_\theta(I_k)(x),$$

並期望：

$$\begin{aligned} D(x) &\geq D_c, \quad x \in \Omega_-(\text{target}); \\ D(x) &< D_c, \quad x \notin \Omega_-(\text{target}). \end{aligned}$$

其時間更接近：

$$\begin{aligned} T_{\text{vol}} &= \\ &T_{\text{projection}} \\ &+ \\ &T_{\text{rotation}} \\ &+ \\ &T_{\text{threshold}} \\ &+ \\ &T_{\text{wash}} \\ &+ \\ &T_{\text{post}}, \end{aligned}$$

而不是與總體素數線性相乘。

SECTION

3.2 已公開的速度與解析度範圍

公開研究已展示多個重要節點：

- 2020 年，高解析斷層體積式製造可在不到 30 秒內製造公分級物件，正特徵約 80 μm ；
- 2022 年，micro-CAL 將二氧化矽奈米複合材料進行體積曝光與燒結，展示約 50 μm 最小特徵、微流道與微光學結構；
- 2025 年，全像斷層體積製造在不到一分鐘內製造毫米物件，負特徵約 31 μm ；
- 2026 年，DISH 以高速旋轉潛望鏡與全像光場最佳化，在約 1 cm 深度範圍維持約 19 μm 解析，並在約 0.6 s 內製造毫米級物件。

這些結果證明：

體積光場不是未來想像，而是快速發展中的現實製程族。

同時，它們也直接否定了「AOCLS 只要宣稱光場並行，就天然領先所有 3D 列印數千倍」的寫法。AOCLS 必須與這些技術比較，而不能把它們排除在 3D 列印之外。

SECTION

3.3 體積並行不是免費的

將更多位置同時曝光，會遇到不同於逐點掃描的限制：

光學自由度

投影器、SLM 或 DMD 只有有限的空間頻率、灰階、更新率與光功率。更大的體積、更高的解析度與更強的背景抑制，會競爭同一組自由度。

能量守恆

若把固定總功率分到更大的體積或更多焦點，單位位置可用能量會下降。多焦點數量增加不等於總聚合功率無限增加。

背景劑量

所有非目標區域通常也會接收非零光劑量。若曝光窗過窄，稍微過曝就可能出現錯誤固化：

$$\begin{aligned} D_{bg}(x) \\ \uparrow \\ \Rightarrow \\ \Pr(\text{false cure}) \uparrow. \end{aligned}$$

材料透明度與散射

體積式方法通常要求光能穿過整個材料體積。吸收、折射率不匹配、散射粒子、既有物件與容器幾何都會扭曲投影。

化學與傳質

聚合閾值、氧抑制、擴散、黏度、熱、自由基壽命和收縮，會使「計算出的光場」與「實際形成的材料」不同。

清洗與後處理

即使曝光只需一秒，未固化材料排出、清洗、二次固化、燒結、熱解、金屬化和量測仍可能主導總週期。

因此：

$$\begin{aligned} T_{\text{(total)}} \\ \neq \\ T_{\text{(exposure)}}. \end{aligned}$$

SECTION

4.1 不應用單一解析度比較所有製程

「解析度」至少可指：

- 最小正特徵；
- 最小負特徵；
- 兩特徵可分辨間距；
- 表面粗糙度；
- 尺寸準確度；
- 體素尺寸；
- 功能解析度；
- 跨整個工作體積維持的解析度。

某方法能製造 100 nm 細線，不代表它能在 1 cm³ 全視場中，以 100 nm 各向同性精度製造任意實心物件。

SECTION

4.2 通用比較向量

對任一製程 p ，應建立：

```
M_p
=
(
  Δ_p,
  V_p,
  R_p,
  Γ_p,
  cal-M_p,
  Y_p,
  C_p,
  U_p
),
```

其中：

- Δ_p ：功能解析度；
- V_p ：有效工作體積；
- R_p ：體積生成率；
- Γ_p ：可製造幾何集合；
- $cal-M_p$ ：材料集合；
- Y_p ：良率；
- C_p ：成本；
- U_p ：不確定性與重現性。

不存在只看 Δ_p 或 R_p 就能判定「全面取代」的合理比較。

SECTION

4.3 技術族的條件優勢

雙光子／多光子直接寫入

優勢：

- 亞微米甚至更細的局部特徵；
- 真三維自由曲面；
- 微光學、光子晶體、細胞支架與微機械；
- 可在特定基材上直接寫入。

限制：

- 體積吞吐量與資料路徑；
- 光功率與多焦點均勻性；

-
- 工作距離和拼接；
 - 材料、收縮與後處理；
 - 大體積高填充率結構的時間。

DLP／SLA

優勢：

- 成熟、成本相對低；
- 面投影速度；
- 從桌面到工業設備已有生態；
- 適合毫米至公分級結構。

限制：

- 層式各向異性與 stair-stepping；
- 像素—視場權衡；
- 剝離、補液與曝光深度；
- 封閉內部結構的排液與清洗。

斷層／全像體積式製造

優勢：

- 秒級或亞秒級曝光；
- 無層製造；
- 懸浮、空腔與柔軟材料；
- 高黏度材料、細胞材料或既有物件周圍加印的潛力。

限制：

-
- 解析度通常仍低於最佳雙光子直接寫入；
 - 透明度、散射與容器幾何；
 - 背景劑量與曝光窗；
 - 投影反演、材料校準與閉環量測；
 - 對非光敏功能材料通常仍需前驅體和後處理。

AOCLS

預期優勢：

- 從觀察物體到目標規格的編譯；
- 多製程選擇，不鎖定單一設備；
- CPOP／DMD／SLM／CAL 等光場後端的統一控制；
- 數位雙生、模擬、量測與回饋；
- 客製化任務與小批量工作流；
- 產出可追溯的製造證書。

尚未證明：

- 解析度；
- 吞吐量；
- 良率；
- 材料範圍；
- 設備成本；
- 批量經濟性；
- 相較成熟製程的端到端優勢。

SECTION

5.1 光場已經不是獨佔特徵

雙光子投影、全像多焦點、計算軸向光刻、TVAM、DISH 與其他體積製程都使用某種形式的光場設計。因此：

使用三維光場

not⇒

構成 AOCLS 的獨佔性。

AOCLS 真正需要建立的是：

Observation Compiler

+

Manufacturability Compiler

+

Process Orchestrator

+

Closed-Loop Metrology.

SECTION

5.2 從物體觀察到製造任務

AOCLS 不應直接把相機看到的外觀當成製造真值，而應建立多個帶有來源標記的模型：

- 觀察雙生；
- 目標雙生；
- 製程雙生；
- 實造雙生。

其轉換是：

$\Pi_{\text{(cal-M)}}$:
cal-T_(target)
→
cal-T_(process).

編譯器可以判斷：

- 哪些幾何必須修改；
- 哪些材料只能功能替代；
- 哪些區域需要雙光子；
- 哪些區域可以 DLP 或體積曝光；
- 哪些功能需要沉積、蝕刻或組裝；
- 哪些未知資訊必須追加 CT、光譜或人工輸入；
- 哪些任務無法安全完成。

SECTION

5.3 製程組合比單一製程更重要

一個真實 AOCLS 任務可能是：

體積光固化骨架
→
雙光子局部精修
→
ALD 保形沉積
→
去模板
→
功能鍍層
→
三維量測.

因此 AOCLS 的研究價值可以存在於：

不發明所有底層製程，而是建立能理解任務、選擇製程、預測結果、驗證成品並修正下一輪的製造控制系統。

SECTION

6.1 批次容量的真正限制

若一個曝光體積能容納 n 個零件，批次時間不一定與 n 線性增加，但也不會完全不變。容量受到：

- 視場與工作體積；
- 投影像素與空間頻寬；
- 總光功率；
- 物件間背景劑量；
- 熱與化學相互作用；
- 樹脂交換與清洗；
- 後處理治具；
- 量測時間；
- 良率與報廢率。

更合理的良品吞吐量是：

$$Q_{\text{(good)}} = \frac{nY}{T_{\text{(setup)}} + T_{\text{(exposure)}} + T_{\text{(post)}} + T_{\text{(inspect)}}},$$

其中 Y 為整批良率。

若一次放入更多零件使光場串擾與良率下降，批次化未必提高良品產出。

SECTION

6.2 「同批不同物件」與「同批相同物件」

體積式光場理論上可以在同一工作體積內製造不同幾何，但不同物件會增加光場最佳化、動態範圍和背景抑制負擔。

因此必須區分：

- 複製批次：同一幾何重複；
- 異質批次：不同幾何同時製造；
- 客製批次：每件不同但共享材料與後處理；
- 多材料批次：涉及材料交換或空間分區。

AOCLS 的潛在強項是「客製批次」，但這必須透過實驗證明，而不是從 AI 能生成不同圖案直接推出。

SECTION

7.1 不是 AOCLS 天然材料更多

只要製程依賴光固化，就受到：

- 光吸收光譜；
- 光引發劑；
- 閾值與曝光窗；
- 黏度；
- 散射；
- 聚合收縮；
- 氧抑制；
- 毒性；

- 透明度；
- 後處理收縮與開裂。

因此，不能因 AOCLS 使用光場就宣稱它天然支援樹脂、玻璃、陶瓷、金屬與半導體。

SECTION

7.2 功能材料通常經過轉換

許多玻璃、陶瓷與金屬微結構的光製造，實際流程是：

光敏複合前驅體

→

綠體

→

脫脂／熱解／燒結

→

最終材料。

最終尺寸與性能受到：

- 線性與非線性收縮；
- 孔隙率；
- 裂紋；
- 組成均勻性；
- 高溫變形；
- 功能層連續性；
- 內部殘留物；
- 製程窗口。

AOCLS 的材料優勢必須來自材料資料庫、製程雙生與後處理編排，而不是一個未限定的「半導體前驅體」名詞。

SECTION

8.1 原稿成本數字不具證據基礎

原稿為 TPP、AOCLS 與傳統光刻分別指定固定設備價格、材料成本、人工與市場規模，但未附設備規格、折舊、產能、報價或良率資料。

新版不保留這些數字。

SECTION

8.2 通用單位良品成本

對製程 p ：

$$\begin{aligned} C_{\text{good},p} &= \frac{C_{\text{cap},p}}{H_{\text{life},p}} \\ &+ C_{\text{labor},p} \\ &+ C_{\text{material},p} \\ &+ C_{\text{energy},p} \\ &+ C_{\text{post},p} \\ &+ C_{\text{metrology},p} \\ &+ C_{\text{maintenance},p} \\ &Q_{\text{good},p}. \end{aligned}$$

其中還應加入：

- 非重複工程成本；
- 光場／路徑計算成本；
- 設備校準；
- 材料切換；
- 失敗批次；
- 法規驗證；
- 產品追溯；
- 設計修改速度。

SECTION

8.3 批量區間不是固定的

不同技術的交叉點：

$$\begin{aligned}
 &N^{(*)}_{(p,q)} \\
 &: \\
 &C_{(good,p)}(N) \\
 &= \\
 &C_{(good,q)}(N)
 \end{aligned}$$

會隨零件尺寸、材料、解析度、良率、設備利用率與後處理而變。不能預先宣布 AOCLS 必然最適合 100–10,000 件。

更合理的研究問題是：

對哪些零件族與品質要求，觀察導向編譯與體積／混合製程能把設計變更成本、設定成本和每件製造成本的總和降到最低？

SECTION

9.1 不再比較虛構的「1 mm³ 完全實心方塊」

單一實心方塊不能代表微光學、微流道、晶格、支架與器件。新版提出四類標準件：

B1 薄殼曲面

測試：表面粗糙度、曲率、輪廓誤差與速度。

B2 高填充實心結構

測試：真正的體積吞吐量、熱與收縮。

B3 開放晶格

測試：最小桿徑、拓撲保持、支撐需求與清洗。

B4 封閉／半封閉微流道

測試：負特徵、排液、堵塞、內部粗糙度與壓降。

SECTION

9.2 公平比較條件

每個方法必須使用相同：

- 目標 CAD 與允許的幾何修正；
- 材料或明確的功能等效材料；
- 最小特徵與容差；
- 生產數量；
- 後處理完成定義；
- 量測方法；
- 良品判定；
- 操作人員熟練度和設備狀態。

9.3 指標

```
K  
=  
(  
  T_(cycle),  
  Q_(good),  
  Δ_(+),  
  Δ_(-),  
  ε_(geom),  
  R_a,  
  Y,  
  E,  
  C_(good),  
  T_(changeover)  
).
```

分別代表：

- 完整週期；
- 良品吞吐；
- 正／負最小特徵；
- 幾何誤差；
- 表面粗糙度；
- 良率；
- 能耗；
- 單位良品成本；

-
- 設計切換時間。

AOCLS 若要超越評論與概念提案，至少需要完成下列階段。

SECTION

V0：軟體比較器

輸入 CAD、材料、設備與容差，輸出：

- TPP 路徑；
- DLP 層式路徑；
- TVAM 投影；
- 混合製程路徑；
- 預估時間、風險與證據缺口。

SECTION

V1：公開基線資料集

建立 B1-B4 標準件，收集既有商業或研究設備的：

- 路徑；
- 曝光；
- 週期；
- 顯影；
- 收縮；
- 量測；
- 失敗案例。

SECTION

V2：AOCLS Observation Compiler

由影像、3D 掃描與 CT 建立目標雙生，記錄所有未知區域和人工決策。

SECTION

V3：混合後端

至少整合兩種不同製程，例如：

- TVAM／DLP 做主體；
- TPP 做局部細節。

SECTION

V4：閉環修正

實造後掃描，估計：

$$\begin{aligned} \Delta \text{cal-T} \\ = \\ \text{cal-T}_{\text{(measured)}} \\ - \\ \text{cal-T}_{\text{(target)}}, \end{aligned}$$

再更新製程模型與補償量。

SECTION

V5：客製批次

同一批製造多個不同但同材料、同後處理的零件，驗證 AOCLS 是否真的降低設計切換成本。

SECTION

V6：第三方重現

公開：

- 原始資料；
- 程式版本；
- 材料批號；
- 設備配置；
- 量測方法；
- 失敗批次；
- 統計置信區間。

只有到這一步，才能合理討論 AOCLS 是否在特定市場區間優於既有製程。

SECTION

命題一：客製批次優勢

在相同材料與後處理下，AOCLS 對 n 個幾何不同的零件，能否顯著降低：

$T_{\text{(changeover)}} + T_{\text{(planning)}}$?

SECTION

命題二：混合解析度優勢

相較單獨使用 TPP 或 TVAM，AOCLS 的粗—細混合製程能否在相同品質下降低：

$T_{\text{(total)}}$

並維持局部最小特徵？

SECTION

命題三：觀察編譯優勢

從實體參考物出發，AOCLS 是否能以較少人工 CAD 時間得到合格的功能等效件？

SECTION

命題四：閉環良率優勢

經過 k 輪閉環後：

$$Y_{(k+1)} > Y_{\square}$$

是否能跨幾何與材料重現，而不是只對單一樣品過擬合？

SECTION

命題五：證據成本

AOCLS 產生的製造證書是否能降低第三方量測、故障診斷或法規文件的成本？

若上述命題不成立，AOCLS 就不能靠名稱或架構宣言聲稱形成新製造範式。

製程族 主要空間並行度 典型優勢 主要限制 AOCLS 中的角色

單焦點 TPP 點／線 最高局部解析與三維自由度 大體積吞吐低 局部精修後端

多焦點／投影 TPP 多點／面 提高微納吞吐 功率分配、均勻性、光場計算 高解析並行後端

DLP／SLA 面／層 成熟、快速、設備普及 層式限制與視場解析度權衡 毫米級主體後端

CAL／TVAM 體積劑量 秒級、無層、空腔與柔性材料 背景劑量、透明度、解析度 體積主體後端

DISH／全像 VAM 高速三維光場 亞秒級、較高解析、大深度 新方法、光場與材料複雜度 遠期高吞吐後端

傳統微影／蝕刻 面／晶圓批次 超大規模、精度與產業成熟 高 NRE、三維自由度有限 功能層與大批量外部製程

真正的圖像不是：

3D 列印

VS

AOCLS.

而是：

任務需求

→

選擇或組合最合適的製程

→

量測與回饋。

原稿的警告仍有一部分值得保留：

不能把「能做到微觀」直接等同於「能以合理成本量產」。

但同樣需要補上另一半：

也不能把「能在整個體積中並行曝光」直接等同於「能以任意解析度、任意材料、零後處理地量產任意物件」。

雙光子、DLP、體積式增材製造、傳統微影與 AOCLS 並不是馬車與汽車的單向替代關係。它們更像：

- 顯微手術刀；
- 面投影工具；
- 三維劑量合成器；
- 高良率晶圓產線；
- 以及把觀察、設計、製程與驗證連接起來的製造作業系統。

AOCLS 若能成立，它的價值不在於「3D 列印還在掃第十七個點時，AOCLS 已經啪一下做完一百個」。這句話在技術快速演化後已經過度簡化。

更能長期成立的版本是：

當不同製程各自擁有無法被簡化的優勢與限制時，AOCLS 嘗試建立一個能觀察任務、保留不確定性、編譯可製造目標、選擇或組合製程、量測成品並持續校正的閉環平台。
這不是保證它會成功。

但這是一個可以被實作、比較、失敗、修正與逐步證明的研究方向。

- Kelly, B. E. et al. Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction. *Science* 363, 1075–1079 (2019). DOI: 10.1126/science.aau7114.
- Loterie, D., Delrot, P. & Moser, C. High-resolution tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature Communications* 11, 852 (2020). DOI: 10.1038/s41467-020-14630-4.
- Toombs, J. T. et al. Volumetric additive manufacturing of silica glass with microscale computed axial lithography. *Science* 376, 308–312 (2022). DOI: 10.1126/science.abm6459.
- Zhang, L. et al. High-Throughput Two-Photon 3D Printing Enabled by Holographic Multi-Foci High-Speed Scanning. *Nano Letters* 24, 2671–2679 (2024). DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c00505.
- Álvarez-Castaño, M. I. et al. Holographic tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature Communications* 16, 1551 (2025). DOI: 10.1038/s41467-025-56852-4.
- Wang, X. et al. Sub-second volumetric 3D printing by synthesis of holographic light fields. *Nature* (2026). DOI: 10.1038/s41586-026-10114-5.
- Wechsler, F. et al. Overprinting with tomographic volumetric additive manufacturing. *Nature Communications* 17, 7312 (2026). DOI: 10.1038/s41467-026-73477-3.
- Madrid-Wolff, J. et al. A review of materials used in tomographic volumetric additive manufacturing. *MRS Communications* 13, 764–785 (2023).
- Orth, A. et al. Deconvolution volumetric additive manufacturing. *Nature Communications* 14, 4412 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-39886-4.
- Wechsler, F. et al. Wave optical model for tomographic volumetric additive manufacturing. *Optics Express* 32, 14705–14712 (2024).

版本聲明

本文件為技術評論與研究定位文章，不構成 AOCLS 已完成設備、已驗證性能、商業報價、醫療用途適用性或量產承諾。所有 AOCLS 性能必須由公開原型、材料與設備條件、第三方量測及可重現實驗另行建立。