

AOCLS 觀察導向閉環製造平台：多模態量測、不確定性數位雙生與可驗證逆向製造

v2.0 / 2025-11-01 / Neo.K（許筌歲） / 公開概念技術論文／可驗證系統架構提案

證據狀態：本文提出系統模型、資料契約、控制流程、驗證協議與分階段原型；尚未宣稱完成端到端 AOCLS 設備、跨材料通用複製、半導體製程替代或安全關鍵零件認證

<https://thisoneisneok.com/html/papers/ccp-11.html>

AOCLS: An Observation-Guided Closed-Loop Fabrication Platform with Multimodal Metrology, Uncertainty-Aware Digital Twins, and Verifiable Inverse Manufacturing

作者：Neo.K（許筌歲）

機構：一言諾科技有限公司（EveMissLab Technology Co., Ltd.）

文件編號：EML-AOCLS-2026-v2.0

原始版本：《AOCLS 觀察式錐形光刻系統：AI 驅動的「所見即所造」製造革命》，2025 年 11 月

修訂日期：2026 年 7 月 29 日

文件類型：公開概念技術論文／可驗證系統架構提案

系列定位：CPOP 錐形相位光學平台與 AOCLS 虛擬光刻模擬引擎的上位整合架構

證據狀態：本文提出系統模型、資料契約、控制流程、驗證協議與分階段原型；尚未宣稱完成端到端 AOCLS 設備、跨材料通用複製、半導體製程替代或安全關鍵零件認證

論文授權：CC BY-SA 4.0

程式碼、硬體與資料授權：應於實際釋出時分別聲明，不因本文授權而自動開源

SECTION

摘要

本文提出 AOCLS 第二版架構，將原始的 AI-driven Observation-based Conical Lithography System 重新定義為 AI-assisted Observation-guided Closed-Loop Synthesis，中文名稱為人工智慧輔助觀察導向閉環製造平台。此調整保留「觀察作為製造入口」與錐形相位光學的原始構想，但不再把 AOCLS 限縮為單一錐形透鏡，也不再宣稱只要觀察一個物體，系統即可無損、無歧義地理解其全部幾何、材料、功能與內部結構，並一次曝光生成完全相同的實體。

AOCLS v2.0 將觀察式製造表述為一個受限逆問題。系統從影像、深度、光譜、X 射線、超音波、熱像、力學量測、使用者意圖與既有設計資料中建立證據包，再推斷物體狀態的機率分布，而非只輸出單一確定模型。外部影像能提供表面外觀與部分幾何，但無法唯一決定被遮蔽區、內部空腔、材料配方、殘餘應力、製造歷史與功能目的；因此 AOCLS 必須保留多個假說、量化不確定性，並在資訊不足時主動要求補充掃描、非破壞檢測、材料測試或人工決策。

本文將 AOCLS 分為八層：任務與授權、主動感測規劃、多模態配準與證據圖、物體假說與可編輯數位雙生、可製造性編譯、虛擬製程與不確定性預測、可插拔製造後端，以及製程監測、非破壞檢測與閉環更新。系統維護四個相互區分的數位對象：觀察雙生、目標雙生、製程雙生與實造雙生，避免把「看到的形狀」「想要的功能」「設備能做的結構」與「最後做出的零件」混為一談。

AOCLS 的製造後端可以包含 CPOP 錐形相位光學、雙光子聚合、全像多焦點曝光、計算軸向光刻、DLP／SLA、微加工、沉積、蝕刻、模板自組裝與其他製程。錐形相位光學在此是延伸焦域、高深寬比能量沉積與結構光生成模組，而不是任意三維物體一次成形的充分條件。虛擬光刻引擎則提供高保真求解器與快速代理模型的混合預測，並在域外輸入或不確定性過高時自動回退至模擬、補量測或人工審核。

本文提出「所見即所造」的工程化替代表述：所見形成證據，證據形成假說，假說經人工與製程約束轉化為可製造目標，製造結果再反向修正模型。其核心價值不是取消 CAD、計量、材料科學與製程工程，而是讓參考物、自然語言、量測資料與設計意圖成為可追溯的製造入口，降低從實物參考到合格製程方案之間的轉譯成本。

關鍵詞：AOCLS、觀察導向製造、逆向工程、多模態量測、數位雙生、可製造性編譯、不確定性量化、閉環控制、虛擬光刻、CPOP、非破壞檢測、製程資格化

SECTION

第一章 重新界定「觀察即製造」

1.1 原始願景的價值

傳統數位製造通常從 CAD、網格、製程圖或參數化模型開始。對既有實物的複製、改良與局部重設計，則需要經過掃描、逆向工程、材料判斷、模型修補、可製造性修改與製程規劃。原始 AOCLS 提出的重要直覺是：

實體參考物本身也可以成為製造介面，而不必要求使用者先把所有意圖翻譯成專業 CAD 指令。

此構想對以下場景具有價值：

- 缺少原始 CAD 的舊零件重建；
- 依人體或自然物形態進行客製化設計；
- 從手工原型、雕塑或材料樣品生成可編輯模型；
- 量測既有微結構後進行尺度、材料或功能轉換；
- 讓非專業使用者以參考物與語言描述共同表達目標；
- 建立「觀察—模擬—製造—驗證」的資料閉環。

問題不在於這個入口是否合理，而在於原始版本把多個尚未解決的逆問題壓縮成了「AI 理解」。第二版必須把這些中間層重新展開。

1.2 觀察不是完整狀態

令真實物體的潛在狀態為：

$$\begin{aligned} &O \\ &= \\ &(\quad \\ &G, \\ &M, \\ &F, \\ &A, \\ &R, \\ &H \\ &), \end{aligned}$$

其中：

- G：外部與內部幾何；
- M：材料組成、微結構與空間分布；

- F：功能、邊界條件與允許的失效模式；
- A：零件、界面、接合與裝配關係；
- R：殘餘應力、缺陷、磨耗與當前狀態；
- H：製造、使用、維修與環境歷史。

感測系統只能取得：

$$D = \text{cal-S}(o, \eta),$$

其中 cal-S 是感測算子， η 包含噪聲、校準偏差、遮蔽、解析度與模型誤差。一般而言，cal-S 不可逆；不同物體狀態可能產生相似觀測。因此 AOCLS 不應直接求唯一解：

$$\widehat{o} = \text{cal-S}^{-1}(D),$$

而應估計後驗分布：

$$p(o | D, C),$$

其中 C 是先驗知識、物件類別、使用者說明、材料庫與製程背景。

這表示系統的合法輸出可以是：

- 一個高信心模型；
- 多個互斥假說；
- 某些已知區域與未知區域；
- 需要補量測的問題清單；
- 拒絕自動製造的判定。

1.3 從口號到閉環命題

原始口號「所見即所造」可以保留為傳播語言，但工程定義應改為：

觀察

→

證據與不確定性

→

可編輯目標

→

可製造性轉換

→

模擬與製程規劃

→

製造

→

量測與更新。

因此：

AOCLS 不是把現實直接複製到現實，而是把參考物轉化為具證據血統、可人工修訂、可受製程約束並可被驗證的製造任務。

1.4 本文不主張的事項

本文不主張：

- 單張影像足以確定任意物體的內部結構與材料配方；
- 多模態 AI 可無條件理解物體的真實功能與設計意圖；
- 錐形透鏡可一次曝光任意三維結構；
- AOCLS 已能取代 EUV、先進半導體晶圓廠或成熟量產製程；
- 虛擬模型與實體結果在沒有校準和不確定性評估時等價；
- 每次製造都會使模型精度指數成長；
- 開源本身即可保證品質、安全、可重現性或公平取得；

- 系統可以在沒有授權、智慧財產與安全審查的情況下複製任何物件。

SECTION

第二章 AOCLS v2.0 的四種數位對象

2.1 觀察雙生

觀察雙生 $\text{cal-T}_{\text{(obs)}}$ 保存感測器實際支持的資訊：

$\text{cal-T}_{\text{(obs)}}$

=

(

D,

Π ,

U,

cal-H

),

其中：

- D：原始與校正後資料；
- Π ：感測器、座標、時間與校準參數；
- U：量測與推斷不確定性；
- cal-H ：多個可能物體假說。

觀察雙生不得把模型補全的區域偽裝成已量測區域。每個面、體素、材料標籤與功能標籤都應標示來源：直接量測、跨模態推斷、資料庫先驗、生成式補全或人工指定。

2.2 目標雙生

目標雙生 $\text{cal-T}_{\text{(tar)}}$ 表示使用者真正想製造的東西，而不是被掃描物的被動複製：

$\text{cal-T}_{\text{(tar)}}$

=

(

其中：

- G^* ：目標幾何；
- M^* ：目標或替代材料；
- F^* ：功能需求；
- τ ：尺寸、表面、性能與缺陷容差；
- cal-K：不可修改約束；
- cal-P：可調整偏好與優先順序。

例如，參考物可能是金屬齒輪，但原型只需驗證咬合幾何，可以用聚合物製造；又或者外形可修改，但孔位與接口不可改。這些選擇必須由目標雙生明確記錄。

2.3 製程雙生

製程雙生 cal-T(proc) 表示特定設備與材料下的製造方案：

```
cal-T_(proc)
=
(
cal-M,
 $\theta$ ,
widehat{Y},
U_Y,
cal-Q
),
```

其中：

- cal-M：設備、材料與製程圖；
- θ ：光場、路徑、劑量、溫度與時間等控制參數；
- $\widehat{Y}$ ：預測結果；
- U_Y ：製程預測不確定性；

- cal-Q：監測、檢查、停止與返工計畫。

製程雙生不是目標雙生的複本。它包含補償後幾何、支撐、曝光分區、加工餘量、收縮補償、檢查特徵與設備限制。

2.4 實造雙生

實造雙生 cal-T_(asbuilt) 保存實際過程與成品證據：

```
cal-T_(asbuilt)
=
(
Y,
Z_(proc),
Z_(post),
C_(part)
),
```

其中：

- Y：實際幾何、材料與性能量測；
- Z_(proc)：製程內監測資料；
- Z_(post)：製後檢查與非破壞檢測；
- C_(part)：零件證書、偏差、限制與處置結果。

四種雙生之間的差異本身就是重要資料：

```
Δ_(ot)
=
cal-T_(tar)-
cal-T_(obs),
```

```
Δ_(tp)
=
cal-T_(proc)-
cal-T_(tar),
```

$\Delta_{(pa)}$
=
cal-T_(asbuilt)-
cal-T_(proc).

它們分別對應設計修改、可製造性轉換與實際製程偏差。

SECTION

第三章 多模態觀察與主動感測

3.1 感測階梯

AOCLS 不應假設存在一套可以無損取得全部資訊的萬能掃描器。較合理的做法是建立分層感測階梯。

層級 典型手段 可觀察資訊 主要限制

S0 外觀 RGB、多角度攝影、偏振攝影 顏色、紋理、可見表面 光照與材質耦合；無內部資訊

S1 表面幾何 結構光、雷射掃描、攝影測量、共焦、OCT 表面與部分透明結構 遮蔽、反光、透明與解析度限制

S2 表面材料 高光譜、拉曼、FTIR、XRF、橢偏 化學與光學成分代理 穿透深度有限；光譜混合與校準需求

S3 內部結構 X-ray CT／micro-CT、超音波、太赫茲、MRI 空腔、密度差、部分缺陷 成本、劑量、材料對比、解析度與尺寸限制

S4 性能與微結構 硬度、拉伸、熱分析、切片、SEM／EDS 力學、熱學、微結構與局部組成 可能破壞樣品；只代表抽樣位置

S5 歷史與功能 文件、維修紀錄、操作測試、使用者說明 設計意圖、載荷與失效條件 資料可能缺失、偏誤或互相衝突

不同任務需要不同感測組合。只複製外觀的藝術模型，可能停在 S0–S1；需要內部通道的流體元件，通常至少需要 S3；安全關鍵結構則可能必須加入 S4–S5 與獨立工程審核。

3.2 主動感測而非固定掃描清單

若每個樣品都使用全部儀器，成本、時間與資料量會不可接受。AOCLS 應根據當前不確定性選擇下一個量測動作。

令候選感測動作為 $a \in \text{cal-A}$ ，其成本為 $c(a)$ ，預期資訊增益為：

$$\begin{aligned} & \text{EIG}(a) \\ &= \\ & \text{bb-E}_{\text{d}_a} \\ & [\\ & \text{Hbigl}(p(\text{omid } D)\text{bigr}) \\ & - \\ & \text{Hbigl}(p(\text{omid } D, \text{d}_a)\text{bigr}) \\ &], \end{aligned}$$

則下一個感測動作可選為：

$$\begin{aligned} & a^{(*)} \\ &= \\ & \text{argmax}_{a \in \text{cal-A}} \\ & (\text{EIG}(a) \\ & + \\ & \lambda V_{\text{(decision)}}(a)) / (c(a) + \epsilon), \end{aligned}$$

其中 $V_{\text{(decision)}}$ 衡量該量測是否會改變材料選擇、製程路徑或安全決策。

例子包括：

- 透明區域深度不確定時，要求 OCT 或改變照明角度；
- 內部孔道會影響功能時，要求 micro-CT；
- 外觀相似但材料可能不同時，要求拉曼、FTIR 或 XRF；
- 模型對底面幾何不確定時，提示翻面重掃；
- 若補量測成本高於重新設計成本，建議改採功能等效件。

3.3 多模態配準與證據圖

所有資料必須映射到共同座標系與時間基準。對第 j 個感測器：

$$\begin{aligned} x_{-}(w) \\ = \\ T_{-}(wj) \\ x_{-}(j), \end{aligned}$$

其中 $T_{-}(wj)$ 不是固定真值，而具有標定不確定性。AOCLS 應保存：

- 內參、外參與時間同步；
- 校準標準件與校準日期；
- 原始資料與處理版本；
- 配準殘差與局部失配；
- 量測單位、解析度與適用範圍；
- 軟體、模型與人工修訂紀錄。

可將證據表示為圖：

$$\begin{aligned} \text{cal-G}_{-}(E) \\ = \\ (V_{-}E, E_{-}E), \end{aligned}$$

節點包括原始量測、校正結果、特徵、幾何片段、材料假說與功能要求；邊則表示推導、對齊、支持、衝突或人工確認。如此可以追查一個材料標籤究竟來自光譜、影像先驗、資料庫或使用者輸入。

3.4 幾何、材料與功能必須分開推斷

幾何重建、材料估計與功能推理是不同問題：

$$\begin{aligned} p(G, M, F \mid D) \\ \neq \\ p(G \mid D) p(M \mid D) p(F \mid D). \end{aligned}$$

它們相互依賴，但不能用單一「理解分數」取代。

- 幾何可由多視角影像、深度、點雲與斷層資料估計；
- 材料需要光譜、物性量測與材料先驗；
- 功能往往需要裝配關係、載荷、操作紀錄與人的說明；
- 外觀相同的零件可能具有不同熱處理與疲勞壽命；
- 形狀不同的零件也可能實現同一功能。

因此 AOCLS 的預設模式應是功能待確認，而不是由大型模型自動宣告已理解設計意圖。

SECTION

第四章 物體假說與不確定性數位雙生

4.1 從單一網格改為假說集合

系統可維護 K 個候選假說：

$$\begin{aligned} \text{cal-H} \\ = \\ \{ \\ (o_k, w_k) \\ \}_{k=1}^K, \\ \sum_{k=1}^K w_k = 1. \end{aligned}$$

候選差異可能包括：

- 被遮蔽區的形狀；
- 內部通道是否連通；
- 表面塗層與基材的分界；
- 某個亮面是金屬、鍍膜或塑膠；

- 某個孔是功能孔、裝配孔或磨耗缺口；
- 參考物是否已變形或損壞。

使用者介面不應只顯示一個看似完整的彩色 3D 模型，而應用不同視覺符號標示：

- 已直接量測；
- 高信心推斷；
- 低信心補全；
- 人工指定；
- 未知或不可觀察。

4.2 局部不確定性場

對幾何表面或體素可定義局部不確定性：

$$U_G(x) = \text{Var} [\phi_G(x) \mid D],$$

材料分布則可用熵：

$$U_M(x) = - \sum_{c=1}^C p_c(x) \log p_c(x).$$

功能需求的不確定性不宜被假裝成連續數值；可以保存為未決問題、衝突約束與所需責任人。例如：

-
- 「此結構是否承受循環載荷？」
 - 「孔徑可否放大 50 μm ？」
 - 「材料必須生物相容，還是只需幾何展示？」
 - 「是否允許拆解參考物？」

4.3 生成式補全的合法位置

生成模型可用於：

- 提出被遮蔽區的候選形狀；
- 修補網格與孔洞；
- 從類似零件檢索先驗；
- 產生功能等效的可製造設計；
- 提議額外感測位置。

但生成結果必須標為假說，不能覆蓋原始證據。對安全關鍵任務，生成式補全不得作為唯一幾何或材料依據。

4.4 人在迴路不是暫時缺陷

AOCLS 應把人工決策設計成正式狀態，而不是把它視為 AI 尚未進化的過渡。至少以下情況需要人工確認：

- 功能與安全分類；
- 是否允許材料替代；
- 不確定區域是否可接受；
- 智慧財產與製造授權；
- 生物、醫療、化學與其他受管制用途；
- 製程偏差是否可以讓步接受；
- 失敗後應返工、報廢或降級使用。

第五章 可製造性編譯：從參考物到可做的目標

5.1 直接複製通常不是最佳解

任何製造後端都有可達集合：

```
cal-Y_(cal-M)
=
{
Y:∃θ,
Y=cal-F_(cal-M)(θ)
}.
```

若目標 T 不在 $\text{cal-Y}(\text{cal-M})$ 內，系統必須修改設計、材料、尺度、分件方式或製程，而不是輸出一個不可能的參數組。

可製造性編譯器記為：

```
Π_(cal-M):
cal-T_(tar)
|->
cal-T_(proc).
```

它可以執行：

- 最小線寬與間隙修正；
- 懸垂、支撐與排液設計；
- 分件、拼接與裝配接口生成；
- 材料替代與多材料分區；
- 收縮、翹曲與光學像差預補償；

- 加入量測特徵與校準標記；
- 把不可見內部改為可檢查結構；
- 將形狀複製改成功能等效設計。

5.2 多目標最佳化

設計轉換可寫為：

$$\begin{aligned} & \theta^*, T^* \\ &= \\ & \operatorname{argmin}_{\theta, T'} [\\ & \lambda_G d_G(T', T) \\ & + \\ & \lambda_F d_F(T', T) \\ & + \\ & \lambda_M d_M(T', T) \\ & + \\ & \lambda_C C(\theta) \\ & + \\ & \lambda_R R(\theta) \\ & + \\ & \lambda_U U(\theta) \\ &], \end{aligned}$$

並滿足：

$$T' \in \text{cal-}\mathcal{Y}(\text{cal-M}),$$

$$\text{cal-K}(T') = \text{true}.$$

這裡：

- d_G ：幾何偏差；

- d_F ：功能偏差；
- d_M ：材料或物性偏差；
- C ：時間、成本與資源；
- R ：安全、缺陷與製程風險；
- U ：模型與量測不確定性。

權重不能由 AI 任意決定，必須來自任務規格與人工批准。

5.3 以功能等效取代材料神話

觀察到的材料不一定能以同一製程重製。AOCLS 應區分：

- 外觀等效：顏色、紋理與反射接近；
- 幾何等效：尺寸與拓撲接近；
- 功能等效：載荷、流量、光學或熱性能接近；
- 材料等效：成分與微結構接近；
- 歷史等效：製程與老化狀態接近。

多數原型只能達成其中一部分。零件證書必須明確寫出達成哪一種等效，而不能籠統標記為「完全複製」。

5.4 製程圖而非單機魔法

完整製造往往是有向圖：

$$\text{cal-P} = (V_P, E_P),$$

節點可以包含：

- 清洗與表面準備；
- 光敏材料配置；

-
- CPOP 結構光曝光；
 - 掃描或多角度投影；
 - 顯影與後固化；
 - 沉積、蝕刻與材料轉換；
 - 去模板、清洗與熱處理；
 - 量測、返工與報廢。

AOCLS 的可擴展性來自製程圖與共用資料介面，而不是要求所有材料和結構都由同一台光刻設備完成。

SECTION

第六章 製造後端與 CPOP 的正確角色

6.1 可插拔製造後端

AOCLS v2.0 可以調度多種後端：

- DLP／SLA 與一般光聚合；
- 雙光子聚合與多光子微製造；
- 計算軸向光刻與其他體積光聚合；
- CPOP 延伸焦域與 Bessel-Gauss 類結構光；
- SLM／DMD 全像多焦點曝光；
- 雷射燒蝕、切割與改質；
- 微加工、沉積、蝕刻與電鍍；
- 模板輔助自組裝與材料轉換；
- 傳統 CNC、噴射、擠出與混合製程。

對每個後端，系統需要一份能力描述：

cal-C_(m)

=

(

cal-R_(m),

cal-M_(m),

cal-E_(m),

cal-U_(m),

cal-S_(m)

),

分別表示可達解析度與尺寸、材料、幾何能力、不確定性及安全限制。

6.2 CPOP 不是任意三維投影器

CPOP 可以提供：

- 延伸焦線；
- 高深寬比曝光或改質；
- 環形、空心與渦旋光束；
- 軸向多焦點；
- 離軸與多通道結構光；
- 對樣品高度偏差較有容忍度的曝光；
- 光片成像與製程內觀察。

標準 axicon 通常形成有限焦域，不會自然產生任意三維強度分布。任意或近似任意體積曝光仍需要：

- 相位與振幅調制；
- 多角度或時間序列；
- 材料非線性與閾值；
- 旁瓣抑制；

- 像差和折射率失配補償；
- 劑量與反應模型；
- 顯影與後處理模型。

6.3 體積製造已存在，但不是無條件一次成形

計算軸向光刻等體積製造方法已證明，可以由多角度投影在光敏體積中累積劑量並形成三維結構。這表明「不逐層成形」具有實驗基礎；但它仍受材料閾值、散射、吸收、投影數、解析度、黏度、氧抑制、熱效應與重建演算法影響。

AOCLS 可以把 CPOP 與體積投影視為互補工具：

- CPOP 擅長延伸焦域、軸向能量分配與高深寬比結構；
- 斷層式投影擅長全體積劑量合成；
- 雙光子聚合擅長高解析局部寫入；
- 後處理決定最終材料與幾何是否成立。

6.4 虛擬光刻引擎

AOCLS 虛擬光刻引擎接收：

$$\Theta = (G, M, S, B, P),$$

並輸出光場、熱、反應、聚合、位移、應力與最終幾何的預測分布。其運作原則為：

- 高保真 FDTD、FEM 或其他求解器提供基準；
- 神經算子與代理模型提供快速預覽；
- 拓撲、幾何與物理殘差分開評估；
- 模型輸出必須附帶適用域與不確定性；

- 域外情境自動回退至高保真模擬、補資料或人工審核。

AOCLS 不應把代理模型的單次高精度結果寫成普遍製程能力。

SECTION

第七章 製程監測、非破壞檢測與閉環控制

7.1 監測不等於零件合格

製程內影像、溫度、聲學與光學訊號可以識別異常或穩定性偏離，但「訊號異常」與「成品缺陷」之間的因果對應常需額外研究和地面真值。AOCLS 應分開：

- 製程監測：觀察設備與反應狀態；
- 製程內 NDE：嘗試檢測正在形成的實體缺陷；
- 製後 NDE：檢查成品內外部；
- 功能測試：驗證零件在目標載荷下是否工作；
- 資格化：證明製程在規定範圍內可持續產出合格零件。

即時相機看到正常光斑，不代表材料內部不存在空腔、未反應區、殘餘應力或局部組成偏差。

7.2 狀態估計與控制

令製程狀態為 x_k ，控制為 u_k ，量測為 y_k ：

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \\ f(x_k, u_k, w_k), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_k &= \\ h(x_k, v_k), \end{aligned}$$

其中 $w_{\square}$ 與 $v_{\square}$ 分別是製程與量測噪聲。控制器可用模型預測控制、貝葉斯濾波、規則控制或其他方法，在安全集合內調整：

- 雷射功率與脈衝；
- SLM/DMD 圖樣；
- 掃描速度與路徑；
- 曝光次序與角度；
- 樣品位置與焦域；
- 溫度、氣氛與等待時間。

安全約束寫為：

$$x_{\square} \in \text{cal-X}_{\text{safe}},$$

$$u_{\square} \in \text{cal-U}_{\text{safe}}.$$

AI 不得繞過硬體互鎖、功率限制、艙門、雷射安全與材料處置規則。

7.3 閉環學習不是必然單調提升

每次製造後，後驗模型可更新為：

$$\begin{aligned} & p(\psi \mid \text{cal-D}_{(1:n)}) \\ & \propto \\ & p(\text{cal-D}_{\square} \mid \psi) \\ & p(\psi \mid \text{cal-D}_{(1:n-1)}), \end{aligned}$$

其中 ψ 是材料、設備或模型參數。但更多資料不保證精度必然增加：

- 感測器可能漂移；
- 材料批次可能改變；
- 標籤與量測可能錯誤；

-
- 新資料可能來自域外；
 - 線上微調可能造成災難性遺忘；
 - 控制策略改變後，資料分布也會改變。

因此每次模型更新必須通過：

- 凍結驗證集；
- 回歸測試；
- 校準度檢查；
- 版本簽章；
- 可回滾部署；
- 高風險模型人工批准。

7.4 預測與零件證書

每次製造至少產生兩種證書。

預測證書包括：

- 輸入資料與版本；
- 感測覆蓋與未知區域；
- 幾何、材料與功能不確定性；
- 使用的模型、求解器與校準狀態；
- 適用域判定；
- 預測缺陷與風險；
- 必須執行的量測項目。

零件證書包括：

- 設備、材料批次與環境；

- 實際控制軌跡；
- 製程異常與人工介入；
- 製後幾何、材料與功能測試；
- 與目標和製程雙生的偏差；
- 接受、返工、降級或報廢結論；
- 適用用途與禁止用途。

SECTION

第八章 AOCLS 八層系統架構

8.1 L0：任務、權限與風險分類

輸入包括：

- 參考物與其所有權；
- 使用者想保留與修改的特徵；
- 預期用途與載荷；
- 材料、成本與時間限制；
- 是否允許拆解或破壞性測試；
- 智慧財產、出口管制、生物安全與其他限制。

任何感測與製造前，先建立任務契約：

$$\text{cal-J} = (I, A, R, C),$$

其中 I 是意圖，A 是授權，R 是風險，C 是約束。

8.2 L1：主動感測規劃

依任務需求選擇儀器、視角、解析度與校準標準件，並根據資訊增益迭代補量測。

8.3 L2：資料配準與證據血統

保留原始資料，建立共同座標系、單位、時間軸、校準與證據圖。任何後續模型都不得破壞原始資料的可追溯性。

8.4 L3：物體假說與可編輯雙生

分別建立幾何、材料、裝配與功能假說，顯示不確定區域，讓使用者確認、修正或要求補量測。

8.5 L4：可製造性編譯與後端選擇

根據設備能力、材料、容差、成本與風險選擇一個或多個製程圖，並產生幾何補償、支撐、分件與檢查策略。

8.6 L5：虛擬製程與風險分析

由高保真求解器與快速代理模型預測光場、反應、熱、變形和缺陷，執行不確定性傳播與穩健最佳化。

8.7 L6：製造執行與安全控制

調度 CPOP、SLM、DMD、位移台、材料系統、顯影與後處理設備。低延遲安全控制由確定性控制器與硬體互鎖承擔；AI 主要負責規劃、估計與受限調整。

8.8 L7：量測、資格化與持續學習

比較目標、製程與實造雙生，執行 NDE 與功能測試，生成證書，更新材料與設備模型。若新資料與舊模型矛盾，優先標記漂移而不是自動覆蓋歷史。

SECTION

第九章 資料、介面與開源策略

9.1 共用資料包

一個 AOCLS 任務包可包含：

```
job/  
├── manifest.yaml  
├── authorization/  
├── raw_sensors/  
├── calibration/  
├── evidence_graph/  
├── observed_twin/  
├── target_twin/  
├── process_twin/  
├── simulation/  
├── machine_logs/  
├── as_built_twin/  
├── certificates/  
└── provenance/
```

manifest.yaml 應記錄：

- 任務 ID 與內容指紋；
- 單位與座標系；
- 感測器和設備版本；
- 材料批次；
- 模型與程式碼版本；
- 授權與用途限制；
- 人工決策與批准者；
- 相關標準與驗收規格。

9.2 開源分層

合理的開源分層包括：

- 規格與資料格式：優先公開，促進互操作；

-
- 參考模擬器與評測工具：可使用寬鬆軟體授權；
 - 硬體參考設計：可使用開放硬體授權；
 - 材料配方與危險製程：依安全、專利與合作條件管理；
 - 真實掃描資料：需處理智慧財產、隱私與使用權；
 - 設備校準與商業參數：可以公開、延遲公開或保留。

本文採 CC BY-SA 4.0，不代表未來程式碼、硬體、模型權重、材料資料與商標必須使用同一授權。

9.3 不應預先虛構成熟認證體系

在缺少標準件、跨實驗室重現、測量不確定性與治理結構時，不應直接宣告成立「AOCLS Foundation」並簽發產業認證。較合理順序為：

- 公開詞彙、資料格式與測試工件；
- 建立單機重複性與量測不確定性；
- 執行多設備、多批次比較；
- 進行跨實驗室互評；
- 與既有標準組織、計量機構與產業合作；
- 最後才考慮符合性標章或認證計畫。

9.4 資安與供應鏈安全

AOCLS 連接掃描、設計、模型與製造，會形成新的攻擊面：

- 竄改幾何或材料標籤；
- 在模型中加入隱藏缺陷；
- 偽造校準或零件證書；
- 竊取受保護物件的掃描資料；
- 讓模型在特定圖樣上輸出危險參數；

-
- 透過供應鏈替換模型、韌體或材料資料。

因此需要：

- 資料與模型簽章；
- 最小權限與職責分離；
- 不可變更稽核紀錄；
- 離線與安全模式；
- 受信任設備身分；
- 安全更新與回滾；
- 高風險製造雙人批准。

SECTION

第十章 應用邊界與成熟度分層

10.1 A 類：外觀與幾何參考製造

適用於：

- 藝術、教育與展示模型；
- 舊零件外形重建；
- 包裝、握把與人體工學外殼；
- 不承載或低風險原型。

此類最適合驗證「觀察作為介面」，但不能用其成功推論材料與功能複製已成立。

10.2 B 類：微光學與聚合物微結構

適用於：

- 微透鏡、光導與光柵；

-
- 微流道與多孔支架；
 - 校準工件；
 - 高深寬比聚合物結構；
 - 雙光子與體積光聚合研究。

這是 CPOP、虛擬光刻與閉環量測最自然的近期交集。

10.3 C 類：功能等效與多製程零件

適用於：

- 允許材料替代的機械功能件；
- 光、熱、流體或彈性功能結構；
- 需要沉積、蝕刻或裝配的混合製程原型。

此類需要明確區分幾何等效、材料等效與功能等效。

10.4 D 類：半導體與高可靠電子元件

AOCLS 可作為：

- 特殊三維光子與微機電結構研究平台；
- 小批量微結構原型工具；
- 製程模擬與缺陷觀察平台；
- 既有晶片上的微光學或聚合物後製程。

但本文不宣稱它能以桌面設備替代先進邏輯製程、EUV 對準、離子佈植、原子層沉積、蝕刻、金屬互連、污染控制與晶圓級良率工程。

10.5 E 類：生醫與安全關鍵用途

個人化醫療植入物、組織支架、航空、核能與其他安全關鍵零件需要：

- 生物相容性或材料資格；

-
- 滅菌、老化與毒理驗證；
 - 完整功能與疲勞測試；
 - 受監管品質系統；
 - 獨立認證與責任界定。

觀察到人體形狀，不等於已具備安全醫療製造能力。

SECTION

第十一章 最小可行原型

11.1 MVP-A：公分／毫米尺度觀察到製造

目的：先驗證資料流、雙生分離、主動補掃描與閉環修正，不等待新型奈米設備。

參考工件：

- 具有外部曲面、底部遮蔽、內部通道與已知 CAD 的聚合物校準件；
- 表面包含霧面、亮面與不同顏色區；
- 內部結構可由 micro-CT 提供地面真值。

流程：

- RGB 與結構光掃描；
- 建立第一版觀察雙生；
- 顯示遮蔽與內部未知區；
- 主動感測模組建議翻面與 micro-CT；
- 建立目標雙生，允許修改孔徑或材料；
- 由 DLP／SLA 或其他成熟後端製造；
- 再掃描並比較；

-
- 修正幾何補償與不確定性校準。

比較組：

- 只用單次表面掃描直接列印；
- 固定全套感測；
- 主動感測 AOCLS；
- 有無可製造性編譯；
- 有無不確定性拒絕。

11.2 MVP-B：微尺度 CPOP／雙光子後端

目的：驗證 AOCLS 與 CPOP、虛擬光刻引擎的真正介面。

參考工件：

- 已知 CAD 的聚合物微光學或微流道校準件；
- 尺寸和材料先限制於單一已校準範圍；
- 包含直線、曲面、孔洞與高深寬比特徵。

流程：

- 共焦、OCT 或顯微影像重建；
- 建立目標與容差；
- 比較高斯焦點、標準 axicon、數位多焦點三種光場；
- 由虛擬光刻預測劑量與幾何；
- 製造後以顯微、輪廓、SEM 或 micro-CT 量測；
- 檢查旁瓣串擾、軸向均勻度、收縮與拓撲錯誤。

11.3 MVP 評估指標

幾何指標：

$$\begin{aligned} E_G &= \\ & (1)/(|\Omega|) \\ & \int_{\Omega} \\ & | \\ & \phi_{\text{asbuilt}}(x) \\ & - \\ & \phi_{\text{target}}(x) \\ & |dx. \end{aligned}$$

拓撲指標：

$$\begin{aligned} E_T &= \\ & \sum_{i=0}^2 \\ & \omega_{\boxtimes} \\ & | \\ & \beta_{\boxtimes}^{\text{asbuilt}} \\ & - \\ & \beta_{\boxtimes}^{\text{target}} \\ & |. \end{aligned}$$

不確定性校準可用覆蓋率：

$$\begin{aligned} \text{Coverage}_{(1-\alpha)} &= \\ & (1)/(N) \\ & \sum_{n=1}^N \\ & 1 \\ & [\\ & Y_{\boxtimes} \in \text{cal-}I_{(1-\alpha)}(X_{\boxtimes}) \\ &]. \end{aligned}$$

其他指標包括：

- 感測時間與成本；
- 每單位資訊增益；
- 未知區域比例；
- 製造成功率；
- p95、p99 局部尺寸誤差；
- 材料識別混淆矩陣；
- 域外偵測率；
- 不必要拒絕率；
- 閉環後的批次變異；
- 人工介入時間；
- 證據追溯完整度。

SECTION

第十二章 證據分級與驗證路線

12.1 證據等級

等級 定義

E0 概念、數學模型與架構提案

E1 軟體原型、合成資料與單元測試

E2 校準標準件、單一設備與單一材料實驗

E3 多幾何、多批次、域外測試與閉環製造

E4 跨設備或跨實驗室重現、參考件互評

E5 針對特定用途完成品質系統、資格化或監管認可

本文整體屬 E0；CPOP、體積光聚合、雙光子微製造、逆向渲染與閉環增材製造等子技術已有不同程度的外部實驗基礎，但不能自動合併成 AOCLS 端到端證據。

12.2 驗證階段

V0：詞彙、資料契約與威脅模型

定義四種雙生、感測來源標記、未知區域、授權與證書格式。

V1：觀察與不確定性基準

以具有 CAD 與 CT 地面真值的工件測試幾何重建、材料分類和未知區域校準。

V2：可製造性編譯

比較直接複製與受製程約束轉換的成功率、偏差和成本。

V3：成熟後端閉環

先以 DLP／SLA 或其他成熟設備完成觀察—製造—再量測閉環。

V4：CPOP 與微尺度製程

加入 axicon、數位相位、雙光子材料與虛擬光刻。

V5：多後端與多材料

驗證製程圖、材料替代、沉積／蝕刻／後處理與資料互操作。

V6：跨實驗室與特定用途資格化

使用共同標準件、盲測、獨立量測與既有標準程序。

12.3 五項可證偽命題

命題 H1：主動感測具有淨效益。

在相同成本預算下，主動感測相較固定掃描策略，應降低關鍵幾何或材料後驗不確定性；若不能，感測規劃器無效。

命題 H2：可製造性編譯優於直接複製。

對超出後端能力的目標，經編譯的設計應提高合格率或降低總偏差；若只增加複雜度而無改善，編譯器應被否證或限制適用域。

命題 H3：不確定性拒絕能降低高代價失敗。

在相近產出率下，具域外偵測和拒絕機制的系統應降低嚴重缺陷率；若校準不佳導致同時高漏報與高拒絕，證書不可採信。

命題 H4：閉環控制降低批次變異。

在固定材料與設備範圍內，閉環控制應相較開環基線降低關鍵品質指標的變異；若只有平均值改善而尾部風險惡化，不能宣稱整體提升。

命題 H5：CPOP 的優勢是條件式而非普遍式。

在預先定義的高深寬比或延伸焦域任務中，CPOP 應在幾何誤差、加工時間或高度容差至少一項優於匹配能量的高斯基線，且旁瓣缺陷不超過門檻；若無法成立，該任務不應使用 CPOP。

SECTION

第十三章 研發路線與產品邊界

13.1 第一階段：Observation Compiler

先建立與製造設備相對獨立的軟體核心：

- 多模態資料匯入；
- 共同座標與證據血統；
- 幾何假說與未知區域；
- 目標雙生編輯器；
- 後端能力描述；
- 可製造性檢查；
- 任務證書與版本管理。

此階段可直接服務逆向工程與既有 3D 列印，不必等待完整光刻硬體。

13.2 第二階段：AOCLS Virtual Lab

整合：

- CPOP 光場模擬；
- AOCLS 虛擬光刻引擎；
- 材料資料庫；
- 參數掃描與逆向設計；
- 不確定性證書；
- 硬體在迴路測試。

此階段的產品可以是軟體與開放資料格式，而非宣稱已完成桌面奈米工廠。

13.3 第三階段：Closed-Loop Fabrication Cell

建立單一材料、單一尺度、有限幾何族的閉環設備。例如：

- 聚合物微光學；
- 微流道；
- 高深寬比孔；
- 校準與研究用微結構。

先證明特定用途的重複性，再擴展材料和尺度。

13.4 第四階段：多製程研究平台

加入沉積、蝕刻、材料轉換、去模板、組裝與多設備排程，使 AOCLS 成為研究型製程編排平台。

13.5 商業化原則

早期商業價值更可能來自：

- 觀察資料到可編輯數位雙生；

- 逆向工程與可製造性轉換；
- 虛擬製程與參數推薦；
- 封閉設備的量測與資料整合；
- 高價值小批量微結構服務；
- 材料與設備模型管理。

不應以「桌面設備取代晶圓廠」作為近期收入或投資承諾。

SECTION

第十四章 討論：AOCLS 真正改變的是介面，而不是物理定律

AOCLS 最有力量的地方，不是宣稱所有製造困難都能被 AI、錐形光學或一次曝光消除，而是重新安排製造系統的入口與回饋：

- 參考物可以和 CAD 一樣成為設計來源；
- 自然語言可以表達保留、修改與禁止條件；
- 感測規劃可以由不確定性驅動；
- 生成模型可以提出假說，但必須保留證據邊界；
- 可製造性編譯可以把「像」與「能做」分開；
- 多種製程可以共用數位雙生與證書；
- 模擬、製造與檢查可以形成可追溯閉環。

這種轉變不會取消專業知識，反而要求專業知識以更清楚的介面進入系統：材料模型需要適用域，感測器需要校準，AI 需要不確定性，設備需要能力描述，成品需要用途限定，人工需要正式決策點。

因此，AOCLS 的成熟形態不是「對著任何物體看一眼，機器就製造出完全相同的東西」，而是：

對一個具體任務，系統知道自己看到了什麼、沒有看到什麼、推斷了什麼、誰批准了什麼、設備能做到什麼、最後實際做出了什麼，以及這個結果可以被用在哪裡。

SECTION

結論

本文完成 AOCLS 從概念宣言到可驗證系統架構的第二版重構。新版保留「觀察作為製造入口」「AI 輔助跨模態理解」「虛擬製程」「錐形相位光學」「閉環自我校正」五項原始精神，但做出六項根本修正：

- 將觀察視為不完整、帶噪聲且通常不可逆的證據，而非物體真值；
- 以物體後驗分布、假說集合與未知區域取代單一確定數位雙生；
- 區分觀察雙生、目標雙生、製程雙生與實造雙生；
- 加入可製造性編譯，允許功能等效、材料替代與製程補償；
- 將 CPOP 定位為可插拔結構光後端，而非任意三維一次曝光器；
- 將閉環資料、NDE、模型更新與零件證書納入同一證據制度。

AOCLS 因此不再是一台承諾「複製萬物」的單機，而是一套將實物參考、量測科學、逆向設計、多物理模擬、製程控制與資格化連接起來的開放式製造作業框架。

其最小可行版本不必從奈米半導體開始。先以已知標準件、成熟掃描設備與 DLP／SLA 完成可追溯的觀察—製造閉環，再進入微光學、CPPOP、雙光子與體積製造，將比直接承諾桌面晶圓廠更容易產生可重現、可否證與可累積的技術成果。

SECTION

參考文獻

- McLeod, J. H. “The Axicon: A New Type of Optical Element.” *Journal of the Optical Society of America*, 44(8), 592–597, 1954. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000592>
- Durnin, J., Miceli, J. J., and Eberly, J. H. “Diffraction-Free Beams.” *Physical Review Letters*, 58, 1499–1501, 1987. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1499>
- Kelly, B. E. et al. “Volumetric Additive Manufacturing via Tomographic Reconstruction.” *Science*, 363(6431), 1075–1079, 2019. <https://doi.org/10.1126/science.aau7114>

-
- Toombs, J. T. et al. “Volumetric Additive Manufacturing of Silica Glass with Microscale Computed Axial Lithography.” *Science*, 376(6590), 308–312, 2022. <https://doi.org/10.1126/science.abm6459>
 - Saha, S. K. et al. “Scalable Submicrometer Additive Manufacturing.” *Science*, 366(6461), 105–109, 2019. <https://doi.org/10.1126/science.aax8760>
 - Brion, D. A. J. et al. “Generalisable 3D Printing Error Detection and Correction via Multi-Head Neural Networks.” *Nature Communications*, 13, 4654, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31985-y>
 - Mieszczanek, P. et al. “Towards Industry-Ready Additive Manufacturing: AI-Enabled Closed-Loop Control for 3D Melt Electrowriting.” *Communications Engineering*, 3, 2024. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00302-4>
 - Lu, Y. et al. “An Overarching Quality Evaluation Framework for Additive Manufacturing Digital Twin.” *National Institute of Standards and Technology*, 2024. <https://doi.org/10.1109/CASE59546.2024.10711607>
 - Donmez, M. A. et al. In-Process Monitoring and Non-Destructive Evaluation for Metal Additive Manufacturing Processes. NIST IR 8538, 2024. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8538>
 - Mildenhall, B. et al. “NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis.” *ECCV*, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_24
 - Wang, H. et al. “MAGE: Single Image to Material-Aware 3D via the Multi-View G-Buffer Estimation.” *CVPR*, 2025.
 - Lin, C.-H. et al. “IRIS: Inverse Rendering of Indoor Scenes from Low Dynamic Range Images.” *CVPR*, 2025.
 - NIST. “Digital Twins for Advanced Manufacturing.” *Measurement Science and Standards Program*, 2024.
 - Neo.K. “AOCLS 虛擬光刻模擬引擎：物理約束神經算子、格點收斂與拓撲驗證框架。” EveMissLab, v2.0, 2026.
 - Neo.K. “錐形相位光學平台：從軸錐透鏡、Bessel–Gauss 光束到可程式化延伸焦域。” EveMissLab, v2.0, 2026.

版本狀態：v2.0 公開修訂版

當前證據等級：E0——架構、數學與驗證路線提案

下一個自然工程節點：AOCLS Observation Compiler MVP，先完成多模態資料包、四種雙生、主動補掃描與成熟 3D 列印後端閉環