



## 中華民國力學學會第158期會訊

- 一、承本續行—由眾而成，路向前行  
國立清華大學動力機械工程學系 蔡宏營 清華講座教授
- 二、【專題報導】熵：從熱力學到藝術的跨領域視角  
逢甲大學航太與系統工程學系/通識教育中心  
宋齊有 終身特聘教授
- 三、力學學會 2025 年全國力學會議學生論文獎研究成果簡介與心得分享
  - (1) 獲獎學生：陳茂全  
指導教授：莊嘉揚 國立臺灣大學機械工程學系特聘教授
  - (2) 獲獎學生：洪簡揚  
指導教授：呂明璋 國立臺灣大學機械工程學系教授
  - (3) 獲獎學生：邱以信  
指導教授：黃育熙 國立臺灣大學機械工程學系教授

### 【近期訊息】

- ★「2026中華民國力學學會年會暨第50屆全國力學會議」  
徵求承辦單位

# 承本續行—由眾而成，路向前行

蔡宏營清華講座教授 國立清華大學動力機械工程學系



兩年理事長任期即將屆滿，回顧 2024 至 2025 年間的會務推動與學術工作，心中更多的是感謝與省思。理事長一職，於我而言，不僅是一項榮譽，更是一份對學會長期發展必須審慎承擔的責任。「君子務本，本立而道生。」任期之初，我與理監事們及秘書處團隊反覆思考的，正是力學學會在當前學術環境中，應如何立其本、定其向。

在此共識之下，本屆任期內最重要的工作之一，是持續且明確地推動學會走向國際。連續兩年，學會擴大舉辦年會暨全國力學會議，並結合國際力學會議辦理，逐步提升學術交流平台的國際能見度與整體層次。兩年間共組織 63 個技術論壇，發表近 550 篇論文，邀集歐美與亞洲多國學者，與國內研究社群共同參與。這樣的成果，不僅反映研究能量的穩定累積，更象徵學會已逐步建立一個具持續性、能與國際對話的學術平台。此一方向，為本屆任期中致力推動，並具長遠意義的重要成果之一。

我始終認為，真正的國際化，不在於活動規模的放大，而在於能否形成穩定而嚴謹的學術交流機制。透過連續兩年的實踐，學會不再僅是舉辦會議，而應開始扮演一個能夠匯聚不同學術體系、促進深度交流的學術節點，這是學會發展歷程中的一項重要轉折。

然而，在努力向外拓展的同時，我也深切體會到：任何學術共同體，若只顧前行而不回望來處，終將失其方向。「其功共成，其路續行。」於此，本屆任期內，學會向已故力學大師致敬，籌辦紀念特刊並舉行紀念論壇。

2024 年「馬劍清教授紀念特刊」與紀念論壇，以及 2025 年「陳文華教授紀念特刊」與紀念論壇，不僅回顧前輩的學術貢獻，更清楚傳達一項重要價值：今日學會所累積的一切成果，皆奠基於前人長期而靜默的耕耘。夙昔典範，足以示後；見賢思齊，方能承先啟後。能在任內同時推動國際化與學術傳承，使學會在向外開展之際，也能向內沉澱，這是一項深具意義、亦值得珍惜的工作。

在組織與制度層面，本屆任期內完成學會新版網站建置，逐步推動會籍資料數位化，為會務運作與長期管理奠定基礎；會員結構亦隨著學會活動的推進而持續調整與累積，顯示學會凝聚力的穩定成長。學術競賽、科普推廣及研發小組之支持，亦持續為力學研究拓展不同層次的影響力。

在期刊發展方面，《Journal of Mechanics》於本屆任期內持續深化其國際化與學術影響力。2023 年與 2024 年，國外投稿比例分別達 63% 與 59%，顯示期刊已穩定吸引國際研究社群之關注。根據 Journal Citation Reports (JCR)，期刊 Impact Factor 由早期的 0.314 穩定提升，近年已達 1.8，引用次數亦持續成長，反映期刊學術能見度與重要性之實質提升。上述成果，有賴歷任主編、執行編輯與全體編輯委員長期而專業的投入，學會在此致上由衷感謝。

回顧這兩年，我深刻體會到，學會的成長從來不是單一事件，而是制度、專業與人力長期累積的結果。「不積跬步，無以至千里。」每一項看似平實的推進，終將形塑學會的長遠樣貌。

最後，感謝所有在這兩年間與我共同承擔責任、推動會務的夥伴，各委員會主委及委員們，更要特別感謝李明蒼秘書長及秘書處團隊。卸任之後，我仍將持續關心並支持學會的發展，並衷心祝福力學學會會務昌隆、基業長青。



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

摘要 – 熵 (Entropy) 最初為熱力學之核心概念，用以描述能量轉換過程中的無序程度與不可逆性，自19世紀以來從熱力熵的定義，逐步拓展至統計力學、資訊科學、生物學、經濟學等多領域的歷史發展。訊息熵的定義使得熵的意涵從能量分布延伸至訊息的不確定性與系統複雜性。近年來，資訊熵的概念被引用於藝術研究，成為量化視覺結構與風格演化的重要方法。透過對繪畫影像中色彩、紋理與構圖分布的量化，研究者得以在熵-複雜性平面上比較不同藝術風格在秩序與混沌、簡約與繁複之間的結構差異，並探討其隨時間演變的趨勢。本文為一綜論 (非原創研究)，旨在回顧熵的理論演進，系統性檢視熵在不同學科中的定義、意涵與轉化脈絡，並進一步聚焦於資訊熵在藝術繪畫分析中的應用潛力。文章後段藉由引介 Sigaki et al. (2018) 以熵與複雜性為核心視覺量化特徵而建構的科學-美學跨領域研析視角，並展望熵於藝術領域中之創作策略、審美偏好、風格變遷等諸面向，未來進一步建立新詮釋框架之可能性。

### 一、前言

科學發展史中，人類對熱現象的探索，歷經數千年演進。從古希臘哲學家的抽象思辨，到近代科學家建立嚴謹的熱力學定律與熵概念，再到今日應用於能源轉換、冷凍技術、氣候模擬與奈米熱工學等多元領域的熱工程技術，熱學的發展是一條融合自然哲學、實驗科學與應用工程的知識長河。熱力學第二定律與熵的概念為近代自然科學中最深刻且影響廣泛的理論之一，其理論並非於十九世紀憑空而生，而是可以嵌入整個西方科學思想與工業技術演進的歷史進程中之重要環節。

在自然哲學萌芽的古典時代，希臘哲學家如赫拉克里特 (Heraclitus, c. 540–480BC) 與德莫克利特 (Democritus, c. 460–370 BC) 已開始思索自然運動與物質的基本結構。赫拉克利特主張「萬物流變」，認為火與變化是自然的本質；亞里斯多德則認為熱是源於四元素 (地、水、風、火) 中的火，此類古代觀點未具備數理依據，尚未形成熱物理理論，但已初步意識到熱與自然運行的關聯 (Russell, 1946)。德莫克里特的「原子論」提出「所有物質都由不可分割的微小原子組成」，此論點關乎「變化」、「對立」與「秩序」。雖在當時缺乏實驗證據支持，但為後來的統計力學奠定了哲學基礎，也成為理解熱現象微觀機制的重要先導。

中世紀歐洲在神學主導的思想氛圍下，科學的發現以及衍生的論點常與宗教的主張相左，因而被視為對信仰的挑戰。由是，自然哲學的發展受到教會的壓抑與控制，因而對熱現象的科學探索也幾乎停滯不前。伊斯蘭世界在8至10世紀，掀起大規模的翻譯運動，將大量的

希臘典籍，包括亞里斯多德、柏拉圖等人的著作，譯成阿拉伯文。這些譯著除使經典流傳於伊斯蘭世界；同時也使得亞里斯多德等人的西方哲學思想得以延續，為日後歐洲的科學復興保留火種 (Lindberg, 1992)。

15至17世紀的文藝復興與隨後之科學革命，人類重啟對自然世界的理性探索。伽利略、笛卡兒、牛頓等人奠定了近代物理學的基礎。牛頓力學使自然世界被視為可預測的機械系統，惟當時對能量耗散 (Energy Dissipation) 與不可逆性 (Irreversibility) 等問題未能處理；在熱學方面，牛頓區分溫度與熱量的概念，並透過實驗觀察熱傳導與冷卻速率 (Cohen, 1985)。

18世紀末的工業革命促進對能量轉換效率的重視，尤其在蒸汽機的設計與改良中。瓦特 (James Watt) 改良蒸汽機，使其廣泛應用於礦業與交通。這也促成卡諾 (Sadi Carnot) 提出理想熱機理論，認為熱只能從高溫流向低溫 (Carnot, 1824)。闡述「能量守恆」的熱力學第一定律歷經邁爾 (J. R. Mayer)、焦耳 (J. P. Joule) 等多位物理學家的理論推導與實驗觀察、驗證，才於19世紀中期確立其科學定律的形式；而熱力學第二定律則由克勞修斯 (Rudolf Clausius) 於1850年左右提出，描述了自然界中「自發過程的不可逆性」和「熵增」現象；之後，克勞修斯創造「熵」概念，解釋熱流中能量損失與不可逆過程，「宇宙的能量總量不變，熵總是增加」 (Clausius, 1865)。自此，熵逐漸成為理解自然界規律的重要工具。

波茲曼 (Ludwig Boltzmann) 則賦予熵以微觀粒子狀態機率分布的意義，奠定了統計力學的基礎 (Boltzmann, 1872; 1877)。至20世紀中葉，一種量化訊息不確定性的量 – 「資訊熵」 (Information Entropy) 橫空出世 (Shannon, 1948)，可作為理解資訊傳遞、壓縮與編碼的重要基石。資訊熵有極廣泛的跨領域影響力，自此，熵的概念不再侷限於熱力學領域，而是被廣泛擴展至微觀系統、量子力學、資訊理論、生物學等理工科學領域。

近年來，越來越多的研究開始探索熵在人文領域的潛在意義及應用，例如人生哲學、經濟學、社會科學，以及跨度極大的藝術領域。藝術品所呈現的視覺秩序、對稱性與複雜度，皆可透過資訊熵與相關量化指標進行分析。尤其是利用資訊熵與圖像複雜度，對大量畫作進行風格量化分析的研究 (Sigaki et al., 2018)，引發了藝術史與計算科學交會的關注。藝術風格演化的探索外，資訊熵的應用亦可延伸至藝術市場的資訊架構建模，評估藝術品的獨特性與投資風險，甚至進一步影響創作本身：在生成式藝術與AI藝術領域中，熵可用來控制作品生成的多樣性與風格穩定性。



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

### 二、熵與熱力學第二定律

熱力學第一定律 (能量守恆定律) 由焦耳等人於19世紀中期提出，闡述了能量守恆的概念：「能量既不會被創造，也不會被消滅，它只會從一種形式轉換為另一種形式。在一個封閉系統中，總能量保持不變。」；而熱力學第二定律 (熵增定律) 則由克勞修斯提出，描述了自然界中自發過程的不可逆性和熵增的現象，亦即在一個孤立系統中，自發發生的所有過程都是不可逆的，且此系統的總體趨勢是朝著混亂程度 (熵) 增加的方向發展，亦即孤立系統中的混亂程度 (熵) 總是增加的。

熵是物理學中最深刻且多面的概念之一。它的發展歷程橫跨熱力學、統計力學、量子力學和資訊理論，並在不同領域衍生出多種形式。以下將從卡諾熱機定理 (Carnot Heat Engine Theorem) 出發，梳理熵觀念的起源與演變，探討各種熵的定義，並分析這些概念之間的傳承與影響關係。

#### 2.1. 卡諾定理 (Carnot Theorem, 1824)

熵的起源可以追溯到法國物理學家、工程師卡諾在1824年提出的卡諾熱機理論。卡諾研究理想熱機的效率時，發現熱自高溫熱源流向低溫熱源的過程的方向性，並建立了卡諾循環。同時，發現熱機的效率僅取決於兩個熱源的溫度  $T_H$  (高溫) 與  $T_C$  (低溫) 之間，與工作物質無關；而最大效率為

$$\eta_{max} = 1 - T_C / T_H$$

雖然卡諾當時並未提出「熵」的概念，但他的工作隱喻了熱力學過程的「不可逆性」，為後來的熵理論奠定了基礎。

#### 2.2. 凱爾文-普朗克表述 (Kelvin-Planck Statement, 1850s)

英國物理學家凱爾文勳爵 (Lord Kelvin) 進一步發展了熱力學第二定律，提出：能量雖然守恆，但在轉化過程中會「降級」(Degrade)，即部分能量無法做功。結合普朗克觀點而成的凱爾文-普朗克表述 (Kelvin-Planck Statement)：「任何循環運作的設備都不可能從單一熱源接收熱量並僅產生淨功 (*It is impossible for any device that operates on a cycle to receive heat from a single reservoir and produce only a net amount of work*)」這意味著不可能建造一個發動機，將高溫儲熱器的熱量完全轉化為等量的功。

#### 2.3. 克勞修斯熵 (Clausius Entropy, 1865)：熱力學熵

1850年代，德國物理學家克勞修斯研究熱量與功的可逆與不可逆轉換，後於1865年，在卡諾熱機理論的基礎上，發現在可逆過程中，系統吸收的熱量  $Q$  與溫度  $T$  的比值  $Q/T$  總和為零：

$$S = \int dS = \delta Q_{rev} / T = 0$$

此  $S$  為一狀態函數，滿足： $dS = \delta Q_{rev} / T$ ，此即克勞修斯熵，描述熱力學系統的不可逆性。

克勞修斯熵確立了熱力學第二定律的數學形式： $\Delta S \geq 0$ ，亦即孤立系統的熵增現象。此一熵增原理呼應了凱爾文-普朗克表述所強調的「能量品質下降」。此處，熵成為衡量「能量不可用程度」的量化指標。以上數學式的物理意義可為克勞修斯表述 (Clausius statement)：「不可能構造一個循環運作的裝置，除了將熱從低溫物體傳遞到高溫物體之外，不產生其他效應 (*It is impossible to construct a device that operates in a cycle and produces no effect other than the transfer of heat from a lower-temperature body to a higher-temperature body.*)」(摘自 Yan, 2022)

克勞修斯強化了熵與能量可用性的聯繫，為工程熱力學 (如熱機效率) 提供了理論基礎。

#### 2.4. 波茲曼熵 (Boltzmann Entropy, 1872; 1877)：統計力學熵

奧地利物理學家波茲曼 (Ludwig Boltzmann) 從微觀角度解釋熵，提出：熵是系統微觀狀態數  $\Omega$  的對數函數：

$$S = k_B \ln \Omega$$

其中  $k_B$  是波茲曼常數。

熵衡量系統的「無序度」或「混亂程度」，微觀狀態越多，不確定性越高，則熵越大。將熵從巨觀熱力學拓展至統計力學，連結了微觀粒子行為與巨觀現象。解釋了熵的物理本質：熵增對應於系統趨向更可能的微觀狀態。

#### 2.5. 吉布斯熵 (Gibbs Entropy, 1902)：統計系綜的熵

美國物理學家吉布斯 (Josiah Willard Gibbs) 進一步完善統計力學，提出吉布斯熵，適用於任何統計系綜：

$$S = -k_B \sum p_i \ln p_i$$



# 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

## Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

其中  $p_i$  是系統於第  $i$  個微觀狀態的概率。當所有微觀狀態為等概率時 ( $p_i = 1/\Omega$ ) 吉布斯熵即退化為波茲曼熵；然而，吉布斯熵更通用，成為現代統計力學的基礎，尤其適用於非平衡態和複雜系統，為後來量子熵和資訊熵提供了數學架構。

### 2.6. 馮諾伊曼熵 (von Neumann Entropy, 1927)：量子熵

在量子力學發展後，匈牙利數學家馮諾伊曼 (John von Neumann) 將吉布斯熵的概念從經典統計力學擴展到量子統計力學，而成量子系統描述中統計不確定性的量度。對於以密度矩陣  $\rho$  描述的量子力學系統，馮諾伊曼熵定義為：

$$S = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$$

其中  $\rho$  是密度矩陣，描述量子態的統計混合程度。成為量子資訊理論的基礎，用於量化量子糾纏與資訊丟失。後來衍生出「量子資訊熵」，影響量子計算與通訊。

### 2.7. 夏農熵 (Shannon Entropy, 1948)：資訊熵

美國數學家夏農 (Claude Shannon) 在資訊理論中提出「資訊熵」(Information Entropy)，定義：

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i$$

衡量隨機變量  $X$  的不確定性，將熵的概念從物理學拓展至資訊科學，成為數據壓縮、編碼理論的基石。

### 2.8. 熵概念的傳承與影響

表一中前三項為熱力學「熵」的發展歷程，其中卡諾熱機效率啟發了克勞修斯提出熵的熱力學定義。熵作為衡量系統「不確定性」或「無序程度」的量，在不同領域中衍生出數種形式，在數學形式、物理意義、應用範圍上有共通性與差異性，相互之間也有些傳承關係。

波茲曼熵、吉布斯熵、馮諾伊曼熵與夏農熵四者皆可視為對「系統不確定性」的量化；在數學結構上—除 Boltzmann 熵外—餘皆包含機率分布對數的加權和；皆服從某種「熵增原則」，即封閉系統的熵傾向於增加，可為推導系統行為、演化趨勢或資訊效率的重要指標。

波茲曼熵、吉布斯熵為微觀系統具有統計力學意義的熵；而馮諾伊曼熵與夏農熵則與量子系統、資訊理論相關。波茲曼狀態數熵被吉布斯推廣至概率分佈形式；

表一、不同形式的熵概念 (此表內之人名以原文呈現)

熵概念的形式	核心觀念	相關領域
Carnot 理論	熱機理論、 $\eta_{max} = 1 - T_C / T_H$	熱力學第二定律的萌芽
Clausius 表述	熱力學第二定律、 $dS = \delta Q_{rev} / T$	巨觀熱力學、不可逆性
Kelvin – Planck 表述	能量降級	經典熱力學、熱機效率
Boltzmann 熵	系統巨觀狀態對應的微觀排列總數 $S = k_B \ln \Omega$	熱力學起源模型、理想氣體推導
Gibbs 熵	統計系統中微觀狀態分布的無序度 $S = -k_B \sum p_i \ln p_i$	統計力學、熱力學分子模擬
von Neumann 熵	量子系統中純態與混態的測度 $S = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$	量子資訊理論、量子統計力學
Shannon 熵	訊息的不確定性或平均資訊量 $H = -\sum p_i \log_2 p_i$	資訊論、通訊、機器學習、數據科學

馮諾伊曼將吉布斯熵的數學架構延伸至量子系統；夏農借鑒了吉布斯熵的形式，應用於資訊不確定性，建立了現代資訊理論；而資訊熵成為人工智慧、數據壓縮、密碼學的重要基石。

## 三、資訊熵及其多領域應用

### 3.1 資訊熵的實操意義

如前所述，「資訊熵」之出現標誌著資訊理論的誕生，其核心概念之一便是借用熱力學中熵演化出的概念，量化資訊的不確定性或資訊量的平均值。夏農資訊熵的定義如下：

$$H(X) = -\sum p(x_i) \log_2 p(x_i); i = 1, 2, \dots, n$$

其中  $X$  是一個離散隨機變數，其可能狀態為  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，每個  $x_i$  的機率為  $p(x_i)$ 。熵值  $H(X)$  描述了接收到一個隨機變數  $x_i$  所包含的平均資訊量。資訊熵單位為位元



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

(bits) · 熵值越高，表示系統的不確定性越高，即資訊越分散；若某事件的機率分布越集中，其資訊熵則越低。因此，資訊熵的高低可用於測度一事件的不確定性或藉以評估一訊息或情報的價值。不確定性為  $H(X)$  的事件在有額外訊息或條件  $Y$  情況下， $X$  事件的不確定性表為  $H(X|Y)$ ，而表徵  $Y$  訊息價值的「資訊增益」(Information Gain)  $IG(X; Y)$  為：

$$IG(X; Y) = H(X) - H(X|Y)$$

資訊熵表徵事件「不確定性」量度的實操意義以下例說明之：李生到劇院觀劇，全院座位有25排，每排20座，以中央走道分東西兩區，但不知他坐在哪兒：(1) 李生座位之「不確定性」為何？(2) 若得額外訊息  $Y$ ：「李生坐在東區前兩排」，則李生位置不確定性為何？並評估  $Y$  訊息的價值。

劇院總座位數為500，李生落座任一座位  $x_i$  之概率為  $p(x_i) = 1/500$ ，代入  $H(X)$  公式計算資訊熵為  $H(X) = 8.966$  bits，此即李生位置之「不確定性」，亦即要確定其座位，需要9次二元(是/否)詢答。訊息  $Y$ ：「李生坐在東區前兩排」—劇場每排20座，分東西兩區，各區每排10座。李生是東區前兩排  $10 \times 2 = 20$  座位之一，此20座每座概率為  $p(x_i) = 1/20$ ，其他480座概率均為0，由資訊熵計算得  $H(X|Y) = 4.322$  bits。代入資訊增益公式  $IG(X; Y) = 8.966 - 4.322 = 4.644$  bits，亦即  $Y$  訊息的情報價值為使得此事之不確定性降低了4.644 bits。

### 3.2 資訊熵之多領域應用

自從資訊熵概念面世，迅速超越了電訊與通訊工程的原始範疇，成為衡量「不確定性」與「資訊含量」的普遍工具。在當代科學與技術領域中，資訊熵不僅能解析訊號的傳遞效率，更提供理解複雜系統內部結構與動態演化的重要視角，其關鍵突破在於：將「資訊」視為一種可被量化、可被操作、可被優化的抽象資源。正是這一抽象化，使資訊熵成為一個高度可轉移(Transferable)的概念工具，得以跨越學科疆界，在多領域中展現其能量。以下將簡要提示資訊熵於跨領域的代表性應用，例如：密碼學與通訊、機器學習與特徵選擇、生物資訊學與基因體分析、社會網絡與經濟系統，以及藝術與視覺分析等(僅列舉數例，但不限於此)。

#### (1) 通信與密碼學

夏農的原始構想中，資訊熵的核心目的是量化一段訊息中的平均資訊量，熵愈高，表示訊息的不確定性愈高，也即是包含愈多「新」資訊(Shannon, 1948)。

這一性質在密碼學中極為重要。理想的加密訊息應具有接近最大熵的隨機性，使任何未持有密鑰者無法從統計模式中推斷明文內容。夏農亦提出「完美加密」(Perfect Secrecy)的概念：在觀察密文後，明文的條件機率分布與事前分布完全一致；亦即密文與明文之間的互資訊(Mutual Information)為零，任何解密嘗試在資訊理論意義下皆無法降低對原始訊息的不確定性。完美加密的本質，不在於「產生高熵密文」，而在於「讓密文對明文沒有任何資訊增益」(Shannon, 1949)。

#### (2) 機器學習與特徵選擇

在機器學習的預測法中，特別是決策樹(Decision Tree)算法，資訊熵用以量化每個屬性對分類的貢獻。Quinlan(1986)的研究首次系統性的闡述了基於資訊增益，選出最具鑑別力的特徵，是ID3決策樹算法的奠基之作，影響了後續的C4.5、CART等所有主流決策樹算法。Battiti(1994)探討以互資訊作為特徵選擇準則在分類上的應用。在監督式學習中，從大量候選變數中挑出「對預測目標最有資訊量」的特徵。採用互資訊能發現非線性、非單調的特徵—目標關係，捕捉任意型態的統計依賴性，適用於複雜分類問題。

#### (3) 生物資訊學與基因體分析

在基因體學與蛋白質分析中，生物序列本質上是一種符號鏈，熵為其序列多樣性與選擇壓力提供了量化工具(Schneider et al., 1986)。在序列分析中(如DNA/RNA)，資訊熵用於量度不同位置的保守性：若某個鹼基位置變異很少，則熵低；反之則熵高，代表該位置對生物功能較不敏感(Schneider, 1990)。

對一段基因序列進行區塊分割後，可針對每個位置計算機率分布與對應熵值，以偵測序列保守區：熵低，顯示該位置高度保守，可能具結構或功能意義；變異區或調控區：熵高，代表存在多種可能的鹼基取代，可能為進化選擇或突變熱點。資訊熵廣泛應用於建立位置權重矩陣(PWM)以及序列偏好模式識別工具(Bailey and Elkan, 1994)，並支援蛋白質功能區域的結構預測與胺基酸演化分析(pei and Grishin, 2001)。

#### (4) 社會網絡與經濟系統：秩序、動態與分布的指標

在行為經濟學中，資訊熵可以描述市場或決策環境中的資訊分散程度；亦可應用於模型選擇(如最大熵法則)以推估在資訊有限條件下的最合理分布(Jaynes, 1957)。在社會與經濟科學中，熵被用來描述整體系統的秩序狀態與資訊分布，尤其適用於高度連結與動態互動的網絡環境(Latora et al., 2017)。



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

經濟系統方面，熵可衡量市場分布的集中與多樣程度 (Martinez et al., 2018)。例如，高度壟斷市場對應低熵，而多元競爭市場則對應高熵。在金融領域中，交易量與價格波動的時間序列熵分析 (如多尺度熵法) 被用於監測市場不穩定性與預測金融危機 (Zunino et al., 2010)。

### (5) 藝術繪畫之視覺特徵與風格分析

近年有研究將資訊熵應用於圖像處理與藝術風格分析，例如將作品畫面分割若干區帶、甚至細分為若干像素，透過圖像各區塊/像素中視覺特徵如色彩、紋理、線條、構圖元素等的空間分布，計算圖像熵值與結構複雜性，藉以了解並區分不同時期或不同藝術運動/藝術派別的創作風格。晚近，甚至藉以剖析藝術風格演化的路徑 (Sigaki et al., 2018)。下一專章將以此為題詳細探討。

總之，夏農所提出的資訊熵原本用於描述通信系統中的資訊效率，卻因其對不確定性與資訊量的精確描述能力，逐漸成為一個跨學科的基本工具。無論在物理、生物、經濟或美學領域，「資訊熵」皆被用以衡量系統的複雜度與秩序。這種跨領域的應用能力，正是資訊理論的核心價值所在。

### 四、資訊熵 – 藝術繪畫分析的關鍵特徵

視覺藝術 (繪畫即為其一) 的研究主要在於藝術風格識別、創作時期判定，作者歸屬辨識及真偽鑑定等幾個面向。在1960年代前，藝術品相關的研究、分析主要倚賴專家學者的主觀判斷；然而隨著電腦軟硬體與科學儀器與檢測技術之蓬勃發展，數位科技與儀器檢測已成為藝術品研析的兩大利器 [關於歷史上各時期視覺藝術品之科學分析，更廣泛的回顧請參閱拙作 (宋齊有，2019 <https://www.stam.org.tw/files/newsletter/Files/20200205050456.pdf>)。]

廿世紀下半葉，隨著資訊科技、影像處理/影像識別以及計算美學 (Computational Aesthetics) 的發展，視覺藝術之研究出現一條嘗試以畫作表面特徵量化方法輔助，甚至重新檢視傳統詮釋的新路徑。在此脈絡中，資訊熵作為衡量不確定性與資訊含量的核心指標，逐漸成為藝術分析中一項重要的理論與工具。

資訊熵最初係用於描述訊息的不確定度，而當藝術作品被轉換為可計算的數位圖像後，其像素分布、色彩結構、紋理與邊緣特徵皆可以機率分布表示，進而納入熵的分析框架之內。這使得藝術作品不再只是審美對象也成為可被量化、比較與建模的視覺資料。特別是在藝術風格研究上，熵提供了一種跨越媒材、時期與文化的

通用量尺，使研究者得以在保留作品整體結構特徵的同時，對其視覺複雜性與秩序程度進行客觀描述。近十餘年來，隨著大型藝術圖像資料庫 (如WikiArt) 與運算能力的提升，以熵為基的方法逐步從概念性應用發展為可實證操作的分析工具，為藝術史、藝術理論與計算科學之間搭建起新的交會點。

在前述章節中，已回顧資訊熵自熱力學與資訊論中的理論起源，並說明其作為不確定性與平均資訊量之量化指標，如何跨越物理系統而逐漸被引入至複雜系統與人文研究領域。相較於自然科學中可明確界定狀態與機率的對象，藝術作品作為高度文化與感知導向的產物，其分析對象並非「意義」本身，而是承載意義的形式結構。因此，資訊熵介入藝術領域並非用以取代詮釋，而是提供一種可比較、可重複、可與視覺經驗對話的分析語言。

本章旨在說明資訊熵如何實際應用於藝術分析，特別聚焦於視覺特徵量化及其在藝術風格研究中的角色。首先，4.1節將從美學量度的角度，說明資訊熵如何被引入作為描述視覺刺激、秩序與變異程度的形式指標，並與傳統美學概念建立對應關係；4.2節進一步將討論熵在視覺特徵量化中具體的操作方式，包括色彩、紋理、邊緣與多尺度結構等特徵如何轉化為機率分布並進行熵分析。在此基礎上；4.3節說明單一熵值不足以捕捉藝術作品的結構特性，因而引入統計複雜性概念，並透過熵與複雜性的聯合分析，建立對藝術風格差異與演化的更細緻描述。最後，4.4節則透過熵與複雜性的數理意義在畫作構圖、用色、筆觸與意涵等美術實踐層面，結合H-C平面的研究成果，系統性說明不同視覺特徵組合對應的藝術風格，解讀藝術風格之演化。

透過上述層層推進，本章試圖展示資訊熵如何從抽象的統計概念，轉化為理解藝術形式與風格演化的分析工具，並為後續探討藝術創造力與跨學科美學研究奠定方法論基礎。

### 4.1 資訊熵與美學量度

藝術審美中對「秩序」與「變化」的張力並非新議題。早在二十世紀初，Birkhoff (1933) 提出了用「秩序 (Order)」與「複雜度 (Complexity)」的比值去衡量藝術品的美感： $M = O/C$ 。此一嘗試雖仍顯簡略，卻已預示美學結構可被形式化描述的可能性。其後，心理學與藝術理論家如 Rudolf Arnheim 明確指出：藝術作品並非追求最大秩序或最大混亂，而是在兩者之間建立張力與平衡，並將「熵」視為理解藝術形式動態的隱喻性概念 (Arnheim, 1971)。



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

在藝術與美學研究中，資訊熵並非用作價值評判的工具，而是提供一種新的分析視角，使「美感」、「秩序」、「複雜性」等長期被視為主觀或難以量化的概念得以在可比較、可討論的結構層次上重新被理解。資訊熵因此被視為一種潛在的「美學量度」，用以描述圖像中資訊分布的均勻性與不確定程度。這種量度並非直接等同於「美」，而是反映視覺刺激的結構性條件，提供美感形成的必要但非充分條件。之後，研究者嘗試用資訊理論與熵重新詮釋此一美感量度概念，使其更具量化與計算意義 (Bense, 1969; Moles, 1968)。資訊熵可用於分析圖像中像素灰階值、顏色頻率、邊緣強度等分布特性。例如，使用資訊熵可量化色彩空間分布的均勻程度，複雜紋理與高對比的畫面通常對應較高的熵值 (Machado et al., 2015)。此外，圖像區域局部熵 (Local Entropy) 可捕捉畫面中的細節變化與裝飾性，有助於區別抽象表現主義 (Abstract Expressionism) 與極簡主義等風格 (Minimalism) 間的差異 (Li et al., 2012)。

Rosso et al. (2007) 研究如何在有限長度、可能受噪聲污染的時間序列中，可靠地區分「隨機噪聲 (Random Noise)」與「決定論混沌 (Deterministic Chaos)」。他們認為僅用「熵」不足以解決此問題，因為高熵既可能來自純隨機，也可能來自高度混沌系統。因此，必須引入第二個互補量來刻畫「結構性」。該研究採用了統計複雜性 (Statistical Complexity)，結合資訊熵，首次以熵-複雜性平面 (Entropy-Complexity Plane) 的形式，將「無序程度」與「結構性」分離並同時量化，從而提供一個能夠區分隨機噪聲與決定論混沌的通用框架。

幾乎同時，Rigau et al. (2008) 提出了「資訊美學量度 (Informational Aesthetics Measures)」，以柯莫葛洛夫複雜性 (Kolmogorov Complexity) 結合資訊熵，系統化成為可計算的美感指標。[註：說是「幾乎同時」是因為 Rigau et al. 的論文中並未引用 Rosso et al. (2007) 的著作]。在柯莫葛洛夫複雜性的定義下，影像的複雜性等同於其最短生成描述的長度，故越具結構、越可由簡潔規則生成的影像，其可壓縮性越高，演算法複雜性反而越低；這也說明了為何隨機雜訊在資訊論意義上具有最高複雜性，卻在美學上毫無結構與價值。

所以，美感分析中，資訊熵並非單一指標，需與其他量度，如複雜性、對稱性或冗餘度 (Redundancy)，結合以共同解讀。為何僅靠資訊熵單一指標不足以描述美感體驗？「熵」測量的是不確定性或驚喜度，在美術中，它可以部分地解釋作品的「豐富性」或「不可預測性」，但若作為單一指標，資訊熵存在以下幾個根本性的弱點：(1) 無法區分「有意義的複雜」與「無意義的雜

雜訊」— 高熵不代表美，低熵不代表單調，熵只計算了符號出現的機率分布，卻完全忽略了美學體驗高度依賴的符號間的空間關係、語法結構和語義關聯等；(2) 缺乏對「模式」與「結構」的感知— 人類審美不僅感知「有多少驚喜」，更感知「驚喜是如何組織起來的」。規律重複的紋理若有細微變化，美學體驗 (從機械到生動) 便可大不相同，但對應之熵值卻變化不大；(3) 整體熵值會平滑掉尺度的層級結構— 熵基於統計分布，對形式美感的物體輪廓與整體形狀等「幾何拓撲屬性」不敏感；(4) 忽視「認知處理」的難易度與愉悅感— 審美體驗與大腦的認知處理效率相關，熵無法衡量「可理解性」。美學是關於訊息成分如何形成有意義、可感知、可激發情感的整體結構。一幅高熵的抽象畫，如果其元素之間存在某種隱含的邏輯或視覺路徑，會隨著觀看時間的延長而變得「可理解」，從而帶來愉悅。單純的高熵值無法預測這種動態的認知互動。

Rigau et al. (2008) 的研究以資訊熵衡量藝術作品的基礎資訊分布，如色彩熵 (Color / Palette Entropy) — 使用影像的色彩直方圖 (Color Histogram) 計算夏農熵再用壓縮後的尺寸近似柯莫葛洛夫複雜度。將上述熵和壓縮資訊組合在一起，形成一種「熵-複雜度」混合量度，用以捕捉藝術作品的視覺秩序。此法的核心優點是不依賴人類主觀判斷，而是依靠統計特徵與計算特徵，符合可重現性要求。

近年來，隨著數位影像分析與計算能力的普及，研究者可直接對藝術作品的影像進行熵分析，量化顏色分布、亮度變化、紋理結構等視覺特徵。藉由熵與複雜性組成的複合指標去揭示作品中顏色配置、構圖規律及視覺信息的分布情況分析不同藝術風格的繪畫作品，例如 Rigau et al. (2008) 文中對蒙德里安 (Piet Mondrian) 的荷蘭風格運動 (De Stijl) 抽象作品 (幾何元素、秩序強)、瑟哈 (Georges Seurat；一般常譯為「秀拉」) 的新印象派 (Neo-impressionism) 畫作 (點描、結構化，但較隨機)，以及梵谷 (Vincent van Gogh) 的後印象派 (Post-Impressionism) 作品 (筆觸活潑、色彩多與自由形式) 等典型範例所做的分析。結果顯示：不同藝術風格在資訊熵與複雜性指標呈現明顯的差異；這些量化指標與藝術風格之間具有相當程度的一致性，支持其能夠作為比較不同風格的客觀工具。

### 4.2 熵與視覺特徵量化

資訊熵在藝術分析中的實際應用，關鍵在於視覺特徵選擇與量化方式。當藝術作品被轉換為數位影像後，畫面中的亮度、色彩、紋理與線條等視覺元素，皆可



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

視為由大量像素所構成的資料集合。每一類視覺特徵皆可被映射為一組機率分布，進而透過夏農熵衡量其資訊不確定性與分布結構。

最基本的作法是以灰階或色彩直方圖熵作為全局描述指標，將像素強度或色彩通道的出現頻率視為隨機變數。此類全局熵能快速反映畫面整體的資訊密度，例如單色或大面積留白作品通常呈現較低熵值，而色彩豐富細節繁複的作品則具有較高熵。然而，單一全局熵往往無法充分反映藝術作品在空間結構與視覺語言上的複雜差異，亦難以對應具體的風格特徵。

因此，研究者逐步引入特徵導向的熵量化方法。在紋理分析中，常透過小波轉換 (Wavelet Transform) 或 Gabor 濾波器 (Gabor Filter)，將影像分解為不同頻率與方向的子帶，再分別計算各子帶的熵值 (Unser, 1995; Jain and Farrokhnia, 1991)。此類方法能有效捕捉畫面中筆觸密度、重複節奏與尺度層次的變化，特別適用於比較印象派、表現主義與抽象繪畫等以筆觸與肌理為核心的風格。相對地，邊緣導向熵則以邊緣方向或梯度分布作為機率來源，強調線條秩序與方向性，對於素描、水墨、版畫或強調輪廓結構的作品尤具分析價值 (Baddeley, 1997; Gonzalez and Woods, 2018)。

在此基礎上，局部熵 (Local Entropy) 與多尺度熵 (Multiscale Entropy) 的引入，進一步突破了「單一平均值」的限制，使熵分析得以呈現藝術作品在空間與層次上的結構差異。此處所謂之局部熵，係指在影像中以滑動視窗 (Sliding Window) 的方式，於每一局部區域內計算熵值，形成一張熵分布地圖 (Entropy Map) (Haralick et al., 1973; Gonzalez and Woods, 2018)。此一方法不再關注整體平均資訊量，而是揭示畫面中哪些區域呈現高度不確定性，哪些區域則結構穩定。實際應用上，局部熵可用來分析構圖重心、視覺張力分布，或前景與背景在資訊密度上的差異，對理解構圖策略與觀看動線尤為重要。

多尺度熵關注視覺結構隨尺度之變化，其基本概念是將影像逐步進行尺度粗化，例如透過降解析度、平滑或金字塔分解，並在每一尺度上計算相應的熵值 (Costa et al., 2002)。若作品在不同尺度下仍維持高度結構性，其熵隨尺度變化將呈現穩定或緩慢變化；反之，若作品主要由細碎、局部化元素構成，其熵值可能在尺度放大後迅速下降。此分析方式特別適合用來比較裝飾性風格與結構性構圖、微觀筆觸導向與巨觀構圖導向的差異。

在實證研究中，局部熵與多尺度熵常被用作特徵向量的一部分，結合聚類分析或機器學習分類器，如支援向量機 (Support Vector Machine, SVM)、隨機森林

(Random Forest) 或深度網絡 (Deep Network)，用於藝術風格分類、時期分群或作者歸屬判斷。這類熵特徵的優勢在於：同時保留了視覺資訊的統計結構與空間層次，能在一定程度上對應藝術史中關於構圖、技法與風格的描述語言。

值得強調的是，視覺特徵的選擇本身即隱含理論立場。不同熵量化策略對應不同層次的視覺處理與藝術語言：色彩熵較貼近感知與情緒層面，紋理與多尺度熵則關聯於技法與筆觸結構，而邊緣熵則呼應構圖與形式秩序。因此，熵分析並非價值中立之計算，而是一種需結合理論理解、藝術史知識與研究目的的量化詮釋工具。

### 4.3 熵 – 複雜性平面及藝術風格演化分析

藝術風格的演化歷來為美術史與藝術評論的核心議題。過往學者多倚賴主觀判斷與符號學視角來分析藝術風格，然而隨著視覺分析與機器學習之技術發展，以深度學習之特徵提取為工具成為藝術繪畫風格辨識與分析的一大利器 (Saleh and Elgammal, 2016; Elgammal et al., 2018)。

單一資訊熵指標雖能有效描述視覺特徵分佈的變異程度，然而在藝術分析中，僅以熵值高低來判斷作品的視覺特性，往往不足以反映其內在結構與組織形式。特別是在藝術作品中，高度隨機的視覺雜訊與高度組織的複雜構圖，可能同時呈現出相近的高熵值，卻在美學經驗與風格意義上具有本質的差異。此一限制促使研究者引入可與熵互補的「複雜性」量度。

統計複雜性並非單純衡量變異程度，而是關注系統在「完全秩序」與「完全隨機」間呈現的結構性資訊。以 Rosso et al. (2007) 提出的複雜性定義為例，其核心概念在於：複雜系統往往同時具備一定程度的不確定性 (熵) 與可辨識的內在結構，而複雜性正是用以量化此種結構化不確定性的指標。在藝術分析中，這一觀點特別適合用來描述風格、構圖與筆觸所形成的多層次組織。

基於前述熵與視覺特徵量化方法，Sigaki et al. (2018) 率先提出將藝術史中的畫作作為時間序列，利用圖像特徵 (如邊緣密度、構圖比例、顏色分布) 計算其熵與複雜度。其主要貢獻係為藝術風格分析開創一條新途徑。該研究使用的數據樣本集為 WikiArt 中約14萬幅畫作，跨越約千年，涵蓋百餘種藝術風格，逾2000位藝術家。分析所需之熵 – 複雜度架構，並非可任意選熵與複雜性量度各一配對組合，而是基於兩者須在同一機率分布下所構成的互補資訊描述。該研究所採用的排序熵 (Permutation Entropy) 是基於「時序排列模式概率分



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

布」的夏農熵，保留了資訊熵的基本理念，但從時間序列 (Time Series) 的動態模式角度出發；其基本算法源自 Bandt and Pompe (2002)；而複雜性量度則透過像素局部排列機率 (Ordinal Pattern Distribution) 所得出的統計複雜性 (Statistical Complexity)，此為資訊論中與熵同體系內的量，能有效區分隨機性與有組織結構，其理論與算法係採用 Lopez-Ruiz, Mancini 與 Calbet 三人所提出的 LMC 複雜性指標 (López-Ruiz et al., 1995)，依此構築熵-複雜性平面。

在此「熵-複雜性平面」上兩個座標軸為主要特徵量，其中熵本質是用來衡量「資訊的不確定性」或「內容的不可預測性」，在畫作分析中可以將其統計數值轉化成定性描述如下：

**熵值高** – 代表畫面中像素分布更為多樣與不規則，例如：顏色變化豐富，沒有重複的圖樣；紋理與筆觸混亂或極具變化；觀者難以預測下一部分畫面會是什麼樣貌。如抽象表現主義、後現代拼貼風格 (Postmodern Collage)、某些野獸派 (Fauvism) 與現代抽象 (Modern Abstract Art) 作品都是可能的高熵風格。視覺感受為混亂、能量充沛、刺激但也可能難以解讀。

**熵值低** – 代表畫面中的像素變化趨於一致、可預測性高，例如：大面積相同顏色區域；線條或構圖有明顯重複、對稱、規律；顏色與形式高度一致性。可能風格對應：極簡主義、現實主義 (Realism) 等。視覺感受是秩序感強、安定、內斂，有時或略顯單調。

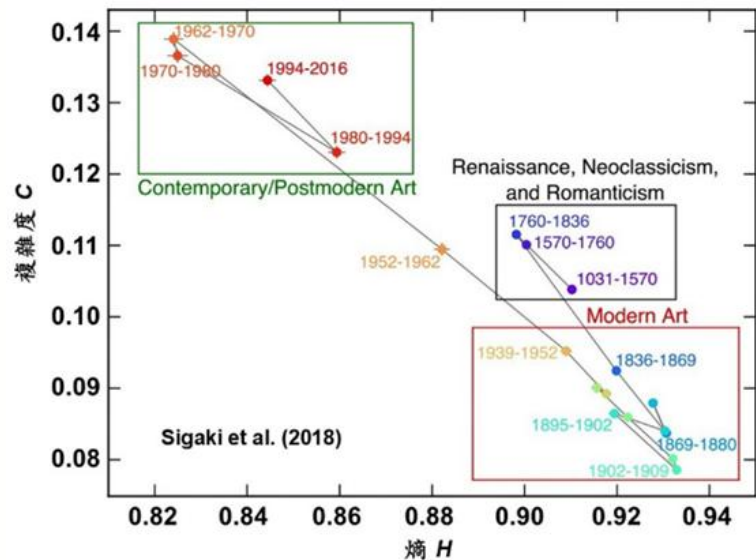
複雜性則通常是熵與結構之間的一種「非線性平衡」。它不僅衡量畫面的混亂程度，還考慮其中是否存在有意義的結構、重複模式或層次感。換句話說，它不只是雜亂無章的「亂」，也不是死板單調的「簡」。

**複雜性高** – 熵值在中高之間，且圖像中存在有機的結構與變化，如顏色或圖形雖變化大，但彼此有關聯、節奏或層次；存在精密細節與大尺度結構共存；像自然界的碎形 (Fractal) 圖樣 (如樹木、雲層、皮膚紋理)；可能對應之流派風格有印象派 (Impressionism)、巴洛克 (Baroque)、部分的抽象表現主義、某些動態數位藝術 (Dynamic Digital Art)。視覺感受是：豐富、深邃、層層引導觀察者目光，具美感與認知刺激。

**複雜性低** – 可能代表畫面過於單一或過於隨機、單調的平塗 (如單色畫)、無明顯模式、純亂碼似的隨機雜訊，可能對應之風格為極簡主義、草率作畫或隨機塗鴉 (Doodle) 等。視覺感受可能為極簡潔或令人困惑，難以理解。

有了這些基本認識，我們再來檢視 Sigaki et al. (2018) 的「熵-複雜性」分析。

以下圖一展示了熵 ( $H$ ) 和複雜度 ( $C$ ) 的平均值隨年代 (不同歷史時期) 的變化。黑框區代表中世紀 (Middle Ages)、文藝復興 (Renaissance)、新古典主義 (Neoclassicism) 和浪漫主義 (Romanticism) 的古典美畫風；紅框區屬現代藝術 (Modern Art)；綠框區：當代 / 後現代藝術 (Contemporary / Postmodern Art)。在此熵 - 複雜度平面上能夠準確地辨識不同的藝術時期及其間之過渡。



圖一、量化藝術作品風格在藝術史中的演變 (Sigaki et al., 2018)

觀察不同時期風格的聚集與變遷，研究結果顯示，藝術風格並非沿著單一的「熵增加」路徑演化，而是在熵與複雜性所構成的二維空間中呈現出非線性的群聚與轉移。特定歷史時期或風格流派往往在此平面中形成相對穩定的區域，而風格轉換則表現為作品群在平面中的位移。

此種方法可視覺化畫風從文藝復興的相對有序穩定 (中高熵 - 中複雜) 演化至現代主義的高熵與多樣性。此研究不僅顯示藝術風格的歷史軌跡，亦可辨識風格突變點與創新時期。從視覺特徵的角度來看，熵主要反映的是色彩、紋理或邊緣等特徵的多樣性與不可預測性；而複雜性則與多尺度結構、區域關聯性與構圖層級密切相關。例如，一幅色彩豐富卻缺乏組織的作品，可能呈現高熵但低複雜性；相對地，一幅形式受控但結構嚴謹的作品，則可能表現為低熵但高複雜性。透過兩者的聯合分析，藝術作品的視覺特質得以被更精細地區分。

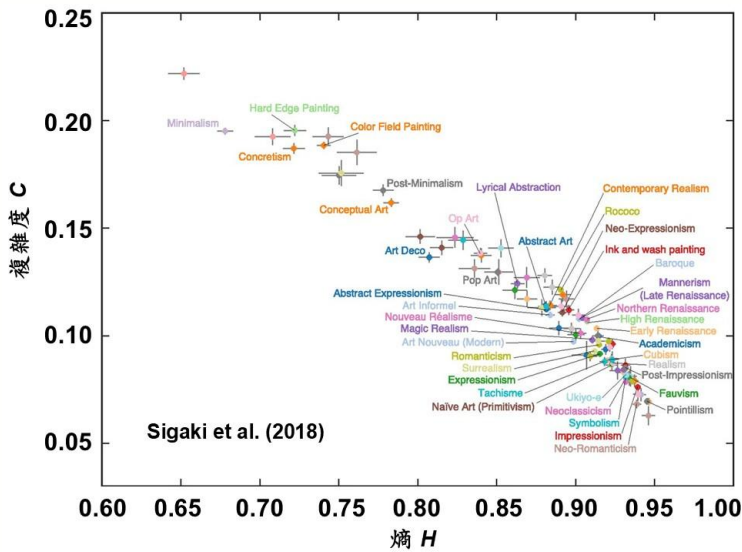


# 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

圖二中，彩色圓點以資料集中92種風格的  $H$  和  $C$  平均值標定。為便於展示，圖中僅標註了41種藝術風格 (每種風格的  $H$  與  $C$  為包含超過500張圖像的平均值)。歷史上不同藝術風格之熵與複雜性的量化值均顯示於  $H-C$  平面上。就定性而言，不同藝術風格之熵與複雜性於此可以一見高低。



圖二、利用熵-複雜性平面區分不同的藝術風格 (Sigaki et al., 2018)

熵-複雜性分析為藝術風格比較提供一種跨媒材、跨時代的共同描述框架，不同繪畫流派即便在題材、象徵與文化語境上差異甚大，其視覺結構仍可透過此一平面進行量化比較。作為藝術分析領域開創性的研究，Sigaki et al. (2018) 的此一成果，貢獻卓著。後續有不少相關研究，例如近年有 Papia et al. (2023) 以之比較 AI 生成 (GAN / Diffusion) 與人類創作的畫作在夏農熵與基於多尺度熵的複雜性等指標上的差異，探討以熵-複雜性特徵區分 AI 與人類作品的可能性；Wang et al. (2024) 系統性分析自然界紋理與型態中的熵與複雜性關係，指出多種自然圖樣皆落於高熵與高結構性並存的區域，反映生成機制的自組織特性，為理解自然型態的統一量化框架提供理論基礎，並對計算美學、藝術分析與生成模型具有重要啟發意義。Kim et al. (2025) 以熵-複雜性平面分析 2010-2020 年間大約 15 萬件當代使用者所生成之數位視覺藝術，量化其多樣性與風格化程度，並辨識不同創作類型在統計結構上的分布差異。研究證實熵與複雜性可作為比較數位藝術風格的有效指標，為計算美學、網路藝術研究與生成藝術評估提供具實證基礎的分析框架。

總之，熵與複雜性的結合，使藝術風格分析不再僅停留於「變化多寡」的層次，而能進一步探討視覺結構如何在秩序與不確定性之間形成穩定樣式。這一分析視角不僅補足單一熵指標的不足，也為後續從美術實踐層面解讀不同熵-複雜性組合所對應的視覺語言奠定理論基礎。下節將在此框架下，透過熵-複雜性數值高低之定性意涵，說明不同藝術風格於視覺特徵的典型表現。

## 4.4 熵-複雜性平面上風格演化之解讀

定性而言，在熵-複雜性平面上可由熵與複雜性值的高低，分為低熵-低複雜性、低熵-高複雜性、高熵-低複雜性以及高熵-高複雜性等四種組合。以下就此四種類別作品之視覺特徵大致歸類如下：

高熵-高複雜性的區域，被多項實證研究視為藝術風格分析中最具理論與美學意義的象限。此類作品同時展現高度視覺多樣性與清楚的多尺度結構，使其既避免完全隨機，又不陷於形式僵化。Sigaki et al. (2018) 的西洋藝術風格演化分析與 Kim et al. (2025) 分析網路使用者產出之視覺作品二者皆指出，創造性與風格演化往往發生於此區域，顯示秩序與不確定性之間的動態平衡。

在低熵-高複雜性的情況下，作品整體視覺分布仍維持高度秩序，顯示其形式語彙受到明確規則或傳統構圖法則所約束。然而，透過局部區域分析或多尺度視覺特徵萃取，仍可觀察到豐富的層級結構與內在差異，從而推升統計複雜性指標。此象限反映出「有序中的複雜性」，為理解古典與結構化藝術風格提供量化基礎。

低熵-低複雜性的作品，呈現出高度集中且可預測的視覺分布特徵。其色彩、灰階或筆觸變化極有限，視覺元素多以重複或近似形式出現，使整體資訊熵維持在低值。同時，由於缺乏顯著的多尺度結構或區域差異，其統計複雜性亦偏低。此類作品在感知層面上往往給人以穩定、靜止與去情緒化的印象。

高熵-低複雜性的作品，通常呈現高度分散且近似隨機的視覺特徵分布。其像素值、色彩或紋理變化頻繁，使資訊熵顯著上升；然而，由於缺乏穩定的局部結構與跨尺度關聯，統計複雜性反而維持在較低水準。此類作品強調刺激而非結構。

Sigaki et al. (2018) 的研究是一個重新理解藝術風格演化的新視角：從「結構的秩序與無序」以及「複雜性變化」的動態歷程切入。熵-複雜性平面上風格分布明顯有以下三類群：(1) 中世紀 (Middle Ages)、文藝復興、新古典主義和浪漫主義繪畫：中高熵 - 中複雜性；(2) 19世紀至20世紀上半葉現代繪畫各種風格：高熵-

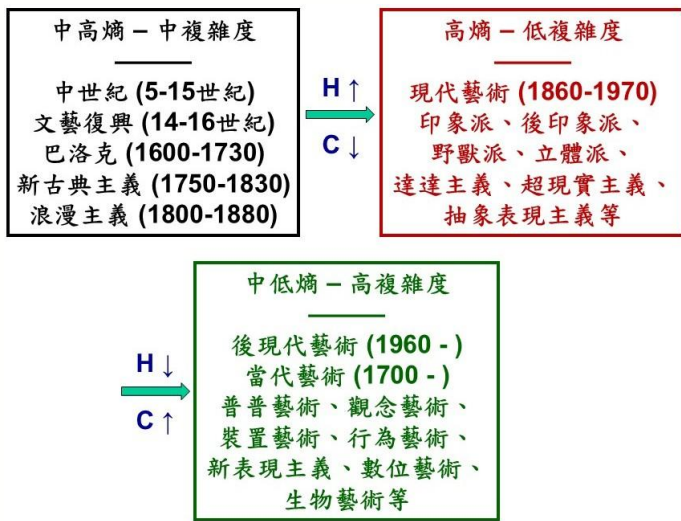


## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

低複雜性；(3) 20世紀中葉迄今的後現代與當代繪畫：中低熵-高複雜性。圖二中顯示三類群在 $H-C$ 平面上藝術風格演化的路徑，以下圖三則以量化特徵 $H$ 與 $C$ 之升降表其轉變機制。



圖三、熵 ( $H$ ) 與複雜性 ( $C$ ) 在三類群藝術風格演化中的角色

根據前述熵與複雜性兩視覺特徵，以下解析圖一中 $H-C$ 平面上三類群的藝術風格的潛在意涵：

- (1) 中世紀、文藝復興、新古典主義、浪漫主義：  
中高熵 - 中複雜性

這些時期的畫作普遍具有高度細節、複雜場景 (如建築、人物群像、背景故事)；但其結構明確，例如透視法、構圖中心、比例規律，畫面內部存在「結構性秩序」。代表作如文藝復興時期的拉斐爾《雅典學院》、達文奇《最後的晚餐》等古典繪畫。這一類別的作品普遍被認為具有古典審美情趣。

中高熵在此指較豐富的視覺與細節，帶來高度的局部變化，使得灰階訊號序列中出現許多不同排列模式 (Permutation Patterns)；雖視覺豐富，但變化是在可預期的視覺語法之下 (如對稱、古典比例、構圖法則)，其與完全隨機序列仍有距離，因此複雜性不至於太高，僅屬中等。此種特性符合引發愉悅感之最適刺激 / 喚醒理論 (Optimal Stimulation/Arousal Theory) (Berlyne, 1960; 1971)，認為人們會尋求一適當的激發水準，不過高也不過低，以維持心理和生理的平衡。即人類審美偏好在此刺激強度、複雜性與不確定性達中等水準時最為顯著。

- (2) 現代繪畫 (19至20世紀上半葉)：高熵-低複雜性

現代繪畫派別林立，包括印象派 / 印象主義 (Impressionism)、後印象派 / 後印象主義 (Post-impressionism)、表現主義、立體派 / 立體主義 (Cubism)、野獸派 (Fauvism) 等，各具風格但共同點是更關注表現與形式的自由，打破古典構圖限制。此群藝術風格之例如莫內的印象派畫作《印象·日出》、梵谷的後印象派作品《星夜》、畢卡索的立體派畫作《亞維農的少女》、康丁斯基的卓絕主義 (Suprematism) 畫作《構圖 VIII》、波洛克的抽象表現主義之作《秋韻 (Autumn Rhythm)》等。

現代畫作多運用自由筆觸、色塊斷裂、形體重構，導致視覺上的區塊差異極大，灰階訊號呈現高度變化與不穩定性，故為高熵。這類作品表面豐富，但畫面間無明確層級與重複模式，缺乏內部可預測的規則結構，許多是主觀即興式創作或形式實驗 (如立體主義的幾何解構)，接近「視覺雜訊」，故與隨機訊號相似，複雜性反而下降，故歸類為低複雜性。然最大熵  $\neq$  最大複雜性：完全亂數之序列熵高，但複雜性低，因為缺乏階層結構與自組織特徵。

- (3) 後現代與當代藝術 (1960 - / 1970 -)：中低熵 - 高複雜性

後現代與當代藝術多刻意簡化畫面、去除明顯之視覺變化，如普普藝術 (Pop Art)、極簡主義、觀念藝術 (Conceptual Art)、數位藝術 (Digital Art) 等；但在符號性、構成語法上高度隱晦甚至悖論，典型作品如安迪·沃荷 (Andy Warhol)《瑪麗蓮·夢露》系列、賈德 (Donald Judd) 的極簡幾何排列、珍妮·霍澤 (Jenny Holzer) 的觀念藝術等。

這些作品表層視覺單調，畫面整體看來平靜、簡化 (如純色面、幾何圖形重複)，像素值變化小，排列樣式有限，導致較低排列熵。這些作品形式與概念背後往往蘊藏複雜邏輯 (如結構重組、語義對抗、文化反諷等)，在簡約背後蘊含深層規則與多層意義；畫作在秩序與意圖之間建立非線性的結構，這種組織離完全隨機與完全秩序都很遠，因此複雜性最大。

補充說明：Sigaki et al. (2018) 所給出三類風格之熵與複雜性為區域平均值，個別畫作之數值與同類作品之平均值高低或有不同。圖四選列分屬(1)(2)兩群之文藝復興、印象派、後印象派、卓絕主義、荷蘭風格運動、抽象表現主義等七幅畫供讀者欣賞、對照其視覺特徵。

第(3)群類之當代/後現代畫作年代距今不遠，受版權保護，未取得授權無法呈現於此 (請自行網路搜尋)。



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)



(a)



(b)



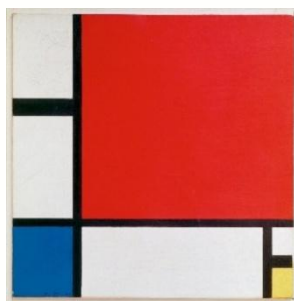
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

- (a) 文藝復興 – 達文奇《最後的晚餐》：Leonardo da Vinci (1452-1519), *The Last Supper* (1503-06), tempera on gesso, pitch, and mastic · 460 x 880cm. Santa Maria delle Grazie, Milan, Italy.
- (b) 文藝復興 – 拉斐爾《雅典學院》：Raphael (1483-1520), *The School of Athens* (1509-11). Fresco, 500x770cm. Apostolic Palace, Vatican City.
- (c) 印象派 – 莫內《印象·日出》：Claude Monet (1868-1899), *Impression, Sunrise* (1872), oil on canvas, 48x63cm, Musée Marmottan Monet, Paris.
- (d) 後印象派 – 梵谷《星夜》：Vincent van Gogh, *The Starry Night* (1889), oil on canvas, 74×93cm, MoMA.
- (e) 卓絕主義 – 康丁斯基《構圖 VIII》：Vasily Kandinsky, *Composition 8* (1923), 140x 201cm, oil on canvas, Solomon R. Guggenheim Foundation artwork.
- (f) 荷蘭風格運動 – 蒙德里安《紅藍黃的構圖》：Piet Mondrian, *Composition with Red, Blue and Yellow* (1929/30), Oil and paper on canvas. 59.5x59.5cm. National Museum of Serbia.
- (g) 抽象表現主義 – 波洛克《秋韻 (30號)》：Jackson Pollock, *Autumn Rhythm (Number 30)* (1950), Enamel paint on canvas, 266.7 × 525.8 cm, Metropolitan Museum of Art, NY.

以上 (a)-(g) 七圖像均摘自公有領域 - 維基百科，此處用作非營利目的之學術研究與報導，屬合理使用。

**The above seven images (a)-(g) are all taken from the public domain, Wikipedia.com. They are used here for non-profit purposes such as academic research and reporting, which is considered fair use.**

整體而言，Sigaki et al. (2018) 的研究結果，圖一的  $H-C$  平面地圖以及圖三的綜整揭示繪畫風格演化的非線性軌跡。圖上標示之三區塊，從古典藝術美學走向高熵、結構走失；現代主義高峰之後，再轉向降低表層熵、提升隱含結構 (後現代的深思與再建構)。

這一點也與生命系統的訊號特徵相呼應：最具生命力的系統往往既非完全規律，也非完全隨機，而是在兩者間形成「有機的自組織複雜性」。由此三大區塊與具體畫作間之對應，從圖像角度可「看出」這些熵與複雜性的視覺表現。

圖四、不同風格之畫作欣賞。以上 (a) – (g) 畫作資料詳列如右。

## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

### 五、結語與展望

#### 5.1 結語

「熵」作為一個關鍵概念，起源於卡諾對熱機效率的理論思考，並由克勞修斯正式命名，用以表徵能量轉換過程中的不可逆性與系統演化方向。隨後，波茲曼與吉布斯透過統計力學，為熵建立了以微觀狀態機率為基礎的理論架構，使其成為連結巨觀熱現象與微觀動力學的重要橋樑。

進入二十世紀，夏農在資訊理論中重新詮釋熵，將其定義為衡量訊息不確定性與平均資訊量的核心量，從而使熵脫離物理系統的專屬語境，成為描述複雜結構與動態過程的通用語言。

在此理論轉向之下，資訊熵被廣泛應用於通信工程、密碼學、生物系統、社會與經濟模型、機器學習等多個領域，並逐步進入藝術研析的視野。本文特別聚焦於資訊熵在視覺藝術中的跨界應用，回顧並整理前人研究如何透過量化繪畫影像中色彩、紋理與構圖的分布特性，以關鍵量化特徵－熵與複雜度－為指標分析不同時代與流派之藝術作品，從中揭示視覺結構在秩序與混沌、簡約與繁複之間的動態平衡。

這類以熵為基礎的分析，不僅為藝術史研究提供了一種可重複、可比較的輔助視角，也提出了一項值得深思的假設：人類對美感的感知，或許與認知系統對資訊不確定性與結構複雜性的處理與偏好存在深層關聯。由此觀之，藝術風格不僅是歷史敘事或主觀感受的產物，也可被理解為視覺資訊組織方式隨文化與時代條件變化的具體呈現。

然而，熵與複雜性分析並非意圖取代傳統藝術史、美學或詮釋學方法，而是作為一種補充性的量化工具，以揭示視覺結構中不易直觀察覺的組織特徵。其價值不在於建立單一的美學評價尺度，而在於為跨時代、跨風格的比較研究提供新的描述語言與分析框架。

在藝術欣賞與美學教育層面，資訊熵亦提供了一種新的視角。理解一件作品如何分配視覺資訊、如何在可預測與不可預測之間取得平衡，有助於觀者從結構層次深化審美經驗。

總體而言，資訊熵作為理解複雜系統的核心概念，正逐步成為連結科學方法與藝術研究的重要橋樑，其跨領域潛力仍有待持續而審慎的探索。在藝術領域，資訊熵的應用可更進一步深化藝術理解，建立更適當的美學量度，促進創作、收藏與觀賞的智慧化，促進科學思維與人文感受之間更深刻的對話。以下試提出資訊熵在未來藝術領域中極具意義的研究方向。

#### 5.2 未來研究方向

展望未來，熵作為一種橫跨自然科學與人文藝術的概念，具有廣闊的延伸空間。首先，在藝術創作層面，熵可作為藝術家思考創作策略的理論參照。創作過程本身可被視為對視覺秩序與不確定性的動態調控：過度秩序可能導致形式僵化；過度隨機則可能削弱結構張力。將熵視為一種結構性的隱喻或輔助指標，有助於藝術家更自覺地探索風格邊界與創作自由度。

其次，在人工智慧與生成式藝術的快速發展中，資訊熵與複雜度有潛力成為更高層次的生成控制參數。相較於現有生成模型多以模仿既有風格為導向，未來研究或可結合深度學習特徵與熵－複雜性量度，直接調控生成影像的結構不確定性與視覺密度，使 AI 不僅能再現風格，亦能系統性地探索新的視覺組合空間。

未來透過深度學習與多尺度視覺建模技術的進展，資訊熵有望與語義特徵、符號分析及藝術史知識更緊密的整合，進一步拓展其在藝術創作分析、風格研究、收藏鑑定與觀賞體驗中應用的可能性。

在藝術史與藝術市場研究中，大規模的熵分析有助於觀察長時間尺度下的風格變遷與群體審美偏好。透過統計不同時期作品的視覺複雜度分布，研究者或可進一步探討藝術風格變化是否與社會結構、科技媒介或經濟環境之轉變存在關聯。

#### 參考文獻

- 宋齊有 (2019). 〈視覺藝術品的科學分析—從定年與材料分析到畫家心靈之數理解讀〉，中華民國力學學會會訊邀稿，150期，1-59。  
<https://www.stam.org.tw/files/newsletter/Files/20200205050456.pdf>
- Arnheim, R. (1971). *Entropy and Art: An Essay on Disorder and Order*. Berkeley: University of California Press.
- Baddeley, R. J. (1997). "The Correlational Structure of Natural Images and the Response Properties of Cortical Cells," *Journal of the Optical Society of America A*, 14(4), 894–900.
- Bailey, T. L. and Elkan, C. (1994). "Fitting a Mixture Model by Expectation Maximization to Discover Motifs in Biopolymers," *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology*, 28–36.



## 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角 Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

- Bandt, C. and Pompe, B. (2002). "Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series" *Physical Review Letters*, 88(17), 174102.
- Battiti, R., (1994). "Using Mutual Information for Selecting Features in Supervised Neural Net Learning," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 4, July 1994, pp. 537–550.
- Bense, M. (1969). *Einführung in die informationstheoretische Ästhetik*. (2nd ed.). Rowohlt.
- Berlyne, D.E., (1960). *Conflict, Arousal, and Curiosity*. New York: McGraw-Hill.
- Berlyne, D.E., (1971). *Aesthetics and Psychobiology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Birkhoff, G. D. (1933). *Aesthetic Measure*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Boltzmann, L. (1872). "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen," *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe*, 66, 275–370.
- Boltzmann, L. (1877). "über die Beziehung zwischen dem Zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung resp. den Sätzen über das Wärmegleichgewicht," *Sitzungsber Kais Akad Wiss Wien Math Naturwiss Classe*, 76, 373-435.
- Carnot, S., 1824, "Réflexions sur la puissance motrice du feu," Paris: Bachelier.
- Clausius, R. (1865). "Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie," *Annalen der Physik*, 201(7), 353-400.
- Cohen, I. B., 1985. *Revolution in Science*. Harvard University Press.
- Coslor, E. and Spaenjers, C. (2016). "Organizational and Epistemic Change in Valuation: An Historical Perspective on Pricing and Art Auctions," *Accounting, Organizations and Society*, 50, 1–14.
- Costa, M., Goldberger, A. L. and Peng, C.-K. (2002). "Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series" *Physical Review Letters*, 89(6), Article 068102.
- Cover, T. M. and Thomas, J. A. (2006). *Elements of Information Theory* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Elgammal, A., Mazzone, M., Liu, B., Kim, D. and Mazzone, M. (2018). "The Shape of Art History in the Eyes of the Machine," *Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
- Freedberg, D. and Gallese, V. (2007). "Motion, Emotion and Empathy in Aesthetic Experience," *Trends in Cognitive Sciences*, 11(5), 197–203.
- Gibbs, J. W. (1902). *Elementary Principles in Statistical Mechanics, Developed with Especial Reference to the Rational Foundations of Thermodynamics*, Yale Bicentennial Publications. New York, Scribner and Sons; London.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. (1973). "Textural Features for Image Classification." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610–621.
- Jain, A. K. and Farrokhnia, F. (1991). "Unsupervised Texture Segmentation Using Gabor Filters," *Pattern Recognition*, 24(12), 1167–1186.
- Jaynes, E. T. (1957). "Information Theory and Statistical Mechanics," *Physical Review*, 106(4): 620–630.
- Kim, S., Lee, B., and Lee, W., (2025). "Investigating the Diversity and Stylization of Contemporary User Generated Visual Arts in the Complexity and Entropy Plane," *Scientific Reports*, 15, 22075.



# 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

## Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

- Latora, V., Nicosia, V. and Russo, G. (2017). *Complex Networks: Principles, Methods and Applications*. Cambridge University Press.
- Li, X., Zhao, Z. and Zhu, Q. (2012). "Measuring Visual Complexity of Images Using Fuzzy Entropy," *Entropy*, 14(6), 978–992.
- Lindberg, D. C., (1992). *The Beginnings of Western Science*. University of Chicago Press.
- López-Ruiz, R., Mancini, H. L. and Calbet, X. (1995). "A Statistical Measure of Complexity," *Physics Letters A*, 209, 321–326.
- Machado, B. B., Oliveira, A. L. I. and Costa, A. H. R. (2015). "Visual Complexity and Aesthetic Preference: A Study Based on Reaction Time," *Proceedings of the International Conference on Aesthetics and the Sciences of Art*.
- Martinez, J. F. and Wakeling, J. R. (2018). "Entropy and complexity in economics." *Entropy*, 20(10), 776.
- Moles, A. A. (1968). *Information Theory and Esthetic Perception*. University of Illinois Press.
- Papia, E.-M., Kondi, A., and Constantoudis, V. (2023) "Entropy and Complexity Analysis of AI-Generated and Human-Made Paintings," *Chaos, Solitons and Fractals*, 170, 113385.
- Pei, J. and Grishin, N. V. (2001). "AL2CO: Calculation of Positional Conservation in a protein sequence alignment," *Bioinformatics*, 17(8), 700–712.
- Quinlan, J.R., (1986). "Induction of Decision Trees," *Machine Learning* 1(1), 81-106
- Rigau, J., Feixas, M. and Sbert, M. (2008). "Informational Aesthetics Measures," *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(2), 24-34.
- Rosso, O. A., Larrondo, H. A., Martín, M. T., Plastino, A. and Fuentes, M. A. (2007). "Distinguishing Noise from Chaos," *Physical Review Letters*, 99(15), 154102.
- Russell, B., (1946). *History of Western Philosophy*. George Allen & Unwin.
- Saleh, B. and Elgammal, A., 2016, "Large-Scale Classification of Fine-Art Paintings: Learning the Right Metric on the Right Feature," *Int'l Journal for Digital Art History*, No. 2. <https://doi.org/10.11588/dah.2016.2.23376>.
- Schneider, T. D., Stormo, G. D., Gold, L. and Ehrenfeucht, A. (1986). "Information Content of Binding Sites on Nucleotide Sequences," *Journal of Molecular Biology*, 188(3), 415–431.
- Schneider, T. D., Stephens, R. M. (1990). "Sequence Logos: A New Way to Display Consensus Sequences," *Nucleic Acids Research*, 18(20), 6097–6100.
- Shannon, C. E., (1948). "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- Shannon, C. E. (1949). "Communication Theory of Secrecy Systems," *Bell System Technical Journal*, 28(4), 656–715.
- Sigaki, H. Y. D., Perc, M. and Ribeiro, H. V., (2018). "History of Art Paintings through the Lens of Entropy and Complexity," *PNAS*, 115(37), E8585–E8594.
- Unser, M. (1995). "Texture Classification and Segmentation Using Wavelet Frames," *IEEE Transactions on Image Processing*, 4(11), 1549–1560.
- von Neumann, J. (1927). "Wahrscheinlichkeitstheoretischer Aufbau der Quanten-mechanik," *Göttinger Nachrichten-Mathematisch-Physikalische Klasse*, 245-272.



# 熵：從熱力學到藝術的跨領域視角

Entropy: From Thermodynamics to Art—An Interdisciplinary Perspective

宋齊有 逢甲大學終身特聘教授 (航太與系統工程系 / 通識教育中心 退休)

Wang, H., Song, C. and Gao, P. (2024) "Complexity and Entropy of Natural Patterns," *PNAS Nexus*, 3(10), pgae417.

Yan, C.Y. (2022), "Chapter 6.3 The Second Law of Thermodynamics: Kelvin-Planck and Clausius Statements" in the Book: *Introduction to Engineering Thermodynamics*, <https://pressbooks.bccampus.ca/thermo1/chapter/6-3-the-second-law-kevin-planck-and-clausius-statements/>

Zunino, L., Tabak, B. M., Pérez, D. G., Garavaglia, M. and Rosso, O. A. (2010). "Inefficiency in Latin-American Market Indices" *The European Physical Journal B*, 74(2), 263–271.

### 作者簡介

宋齊有為中正理工學院航空工程學士、國立臺灣大學機械工程碩士、國立清華大學動力機械工程博士，曾任職中正理工學院擔任航空工程學系助教、講師、副教授至教授兼系主任。民國90年轉任逢甲大學航空工程學系 (即今之航太與系統工程學系) 教授。曾任國科會/科技部工程司航太技術、熱傳學與流體力學學門複審委員、中華民國航空太空學會理事、臺灣ASME理事、中華民國力學學會理事(迄今)、中華民國國防科技研究學會理事(迄今)；曾榮膺美國航空太空學會副會士 (*AIAA Associate Fellow*, 2000)、美國機械工程師學會會士 (*ASME Fellow*, 2008)、中正理工學院傑出校友(2008)、中華民國航空太空學會會士 (*AASRC Fellow*, 2012)、2020-2025連年獲評名列「終身科學影響力世界前2%頂尖科學家」(*World's Top 2% Scientists, Stanford / Elsevier*) 等榮譽。110年8月1日於逢甲大學終身特聘教授任內退休。

作者公餘之暇曾習書法、篆刻、茶文化、古文物與藝術欣賞、古建築賞析、藝術史等。考試院「外(英)語導遊」/「外(英)語領隊」國家考試及格、交通部觀光局「外語導遊人員」/「外語領隊人員」職前訓練完訓，擁有「華語·英語導遊執業證」/「華語·英語領隊執業證」雙證照、行政院農委會茶改場「茶葉感官品評人才能力鑑定中級」合格證書、中華茶人雅興文化藝術協會/國際侍茶師學院「侍茶師」檢定合格證書、國際寶石學院臺北分校 (*Gemological Institute International – Taipei*)「翡翠玉石鑑定師」檢定合格證書、國立臺灣大學「茶葉官能鑑定人員培訓」完訓證書，以及「國立故宮博物院文物研習會」研習證明 (101-108)；具有文化導覽 (故宮文物、傳統寺廟、歷史街區、品茶等)、旅遊規劃、觀光導遊 / 領隊等逾十年經歷。開授人文通識課程，同時以旅遊、文化、科技 – 藝術跨領域等主題應邀演講。



中華民國力學學會  
2025 年全國力學會議學生論文獎  
研究成果簡介與心得分享



# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：固力材料(含設計與製造)

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

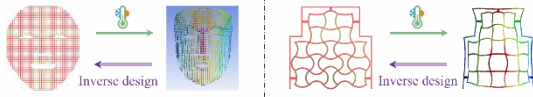
獲獎學生：陳茂全

指導教授：莊嘉揚

論文題目：「Deep learning-based inverse design and forward prediction of bimaterial 4D-printed facial shell」

## 一、研究背景與動機

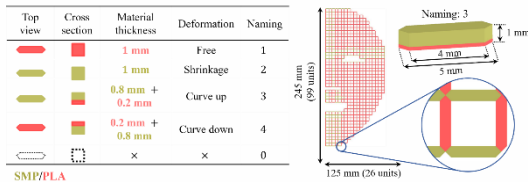
4D 列印係指以智慧材料進行 3D 列印製作平面結構，並透過時間所引發的加熱刺激，使其主動變形為立體幾何。由於成形過程不需列印懸空結構的支撐材，可大幅節省製作時間與材料；相較於傳統射出成型，本技術亦無須昂貴模具與大型設備，更適合少量多樣的客製化製造。然而，要使結構精準變形至目標曲面，必須解決反向設計問題，也就是由三維目標幾何反推出可列印的二維設計。同時，人臉具有獨特的全域輪廓與多尺度的局部特徵，使反向設計更具挑戰性。為此，本研究整合形狀記憶聚合物、有限元素分析與深度學習，提出由單張深度照片直接生成設計的新方法，成功重建人臉的複雜曲面[1, 2]，並為智慧製造中的客製化產品提供更高效、低成本的自動化設計途徑。



## 二、研究方法

### 2.1 直線矩陣

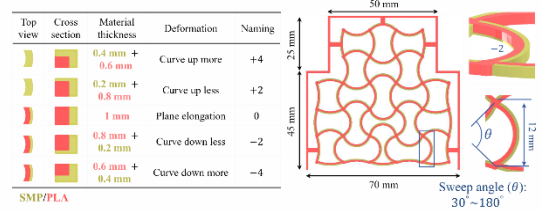
本研究採用整合有限元素分析、深度學習模型與雙材料 4D 列印技術之研究架構，以系統性方式建立人臉薄殼的平面設計與反向設計流程。首先，透過聚乳酸 (Polylactide, PLA) 與形狀記憶聚合物 (Shape Memory Polymer, SMP) 的雙材料堆疊比例，設計具可控變形行為的直線矩陣(圖三)，並結合參數化多項式函數描述人臉整體輪廓特徵，以生成仿真人臉面具之平面設計。



圖一：網格單元之材料設計與直線矩陣設計空間

### 2.2 曲線矩陣

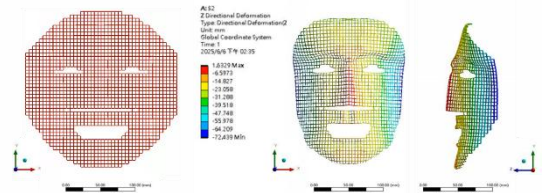
針對鼻子等具有顯著高曲率變化的局部特徵，使用曲線矩陣具備軸向與縱向的伸縮特性，可在加熱致動過程中提供鼻部所需的輪廓調整能力。曲線矩陣的肋條設計同時包含材料與幾何兩個層面(圖二)，材料方面透過調整肋條厚度方向上 PLA 與 SMP 的分布比例，以形成五種不同的彎曲方向與彎曲程度，將高收縮率的 SMP 置於弧形外側、低收縮率的 PLA 置於弧形內側，使加熱後 SMP 的較大收縮帶動肋條兩端沿弧形向外拉動，而 PLA 的阻抗促使肋條中段向內推進，進而產生可預期的彎曲變形。角度方面，肋條兩端點距離固定為 12 mm，並以圓弧掃出角度  $\theta$  定義其弧度，為避免列印空間干涉並符合設備限制，將  $\theta$  設定於  $30^\circ$  至  $180^\circ$  的範圍內，以確保結構可製造性與致動行為的可控性。



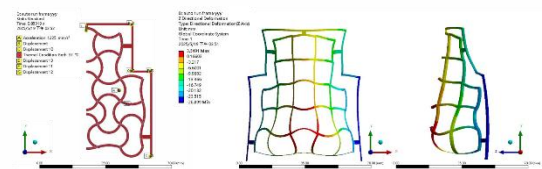
圖二：肋條單元之材料設計與角度設計

### 2.3 有限元素法分析

本研究以線性熱膨脹模型近似形狀記憶聚合物在加熱下的預應力釋放行為，並透過調整材料熱膨脹係數與施加的溫度差，重現與非線性 SMP 有限元素模型相近的變形場。為提升模擬與實驗的一致性，邊界條件採固定結構重心位置，並施加加速度場以近似水域加熱實驗中的重力與浮力效應。有限元素分析使用 Shell 181 單元並納入非線性幾何，以描述薄殼結構在致動過程中的大變形行為，其中直線矩陣用以近似人臉薄殼(圖三)，曲線矩陣則用以表徵鼻部高曲率特徵薄殼(圖四)。



圖三：直線矩陣之有限元素法分析結果



圖四：曲線矩陣之有限元素分析結果

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：固力材料(含設計與製造)

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

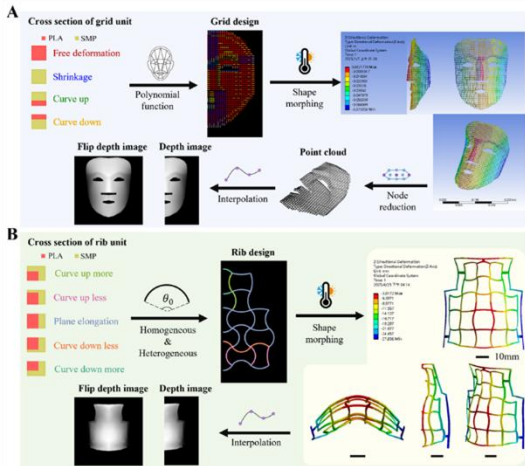
獲獎學生：陳茂全

指導教授：莊嘉揚

論文題目：「Deep learning-based inverse design and forward prediction of bimaterial 4D-printed facial shell」

## 2.4 深度學習資料庫

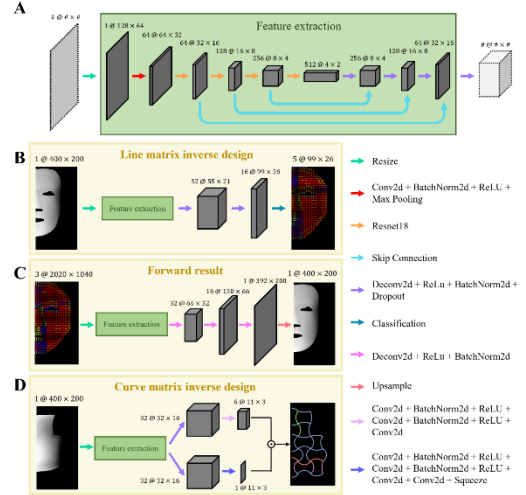
有限元素分析完成後，本研究進一步進行資料處理，透過內差與平滑化方法，將離散結構節點轉換為具連續性的表面表示，並據此生成深度照片，使單張二維影像即可有效表徵對應的三維幾何資訊，進而降低深度學習資料庫的儲存負擔。最終建立 36,087 組直線矩陣資料庫，包含網格設計與其對應深度照片之一對一配對關係（圖五A），並建立 13,360 組曲線矩陣資料庫，涵蓋材料設計、角度設計與深度照片（圖五B）。上述資料庫可作為後續深度學習反向設計模型的核心訓練基礎。



圖五：深度學習資料庫生成流程 (A)直線矩陣 (B)曲線矩陣

## 2.5 全卷積網路

基於矩陣結構與影像像素之間的高度對應性，本研究將反向設計問題表述為像素層級的影像分割任務，並以 ResNet 18 作為特徵擷取骨幹，建構全卷積神經網路（Fully Convolutional Network, FCN）以同時支援反向設計與正向預測。模型先將輸入照片統一調整為  $1 \times 128 \times 64$ ，完成前處理後，以 ResNet 18 前四個階段作為編碼器，不採用預訓練權重，並透過跳接結構保留關鍵空間細節；解碼端則以反卷積逐層上採樣重建輸出解析度（圖六A），定義為  $99 \times 26$  網格單元的分類問題。在此架構下，本研究規劃三項任務，包含由深度照片推得直線矩陣之反向設計（圖六B）、由設計樣式生成深度照片之正向預測以取代耗時的有限元素分析（圖六C），以及曲線矩陣之反向設計（圖六D），需同步預測  $11 \times 3$  的材料配置與角度參數，屬於分類與回歸並行的多任務學習，並採用 GradNorm 動態平衡任務權重，以提升收斂穩定性與預測準確度。



圖六：(A) 全卷積網路的特徵擷取器用於處理三項任務：(B) 直線網格反向設計、(C) 正向預測、(D) 曲線網格反向設計。特徵圖之間的運算以箭頭與文字註解表示。

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：固力材料(含設計與製造)

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

獲獎學生：陳茂全

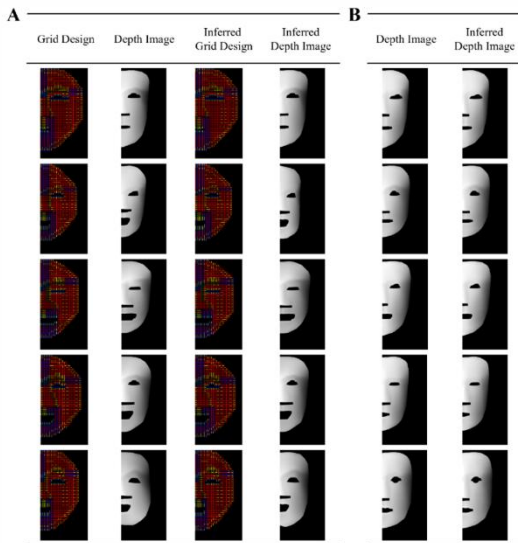
指導教授：莊嘉揚

論文題目：「Deep learning-based inverse design and forward prediction of bimaterial 4D-printed facial shell」

## 三、結果

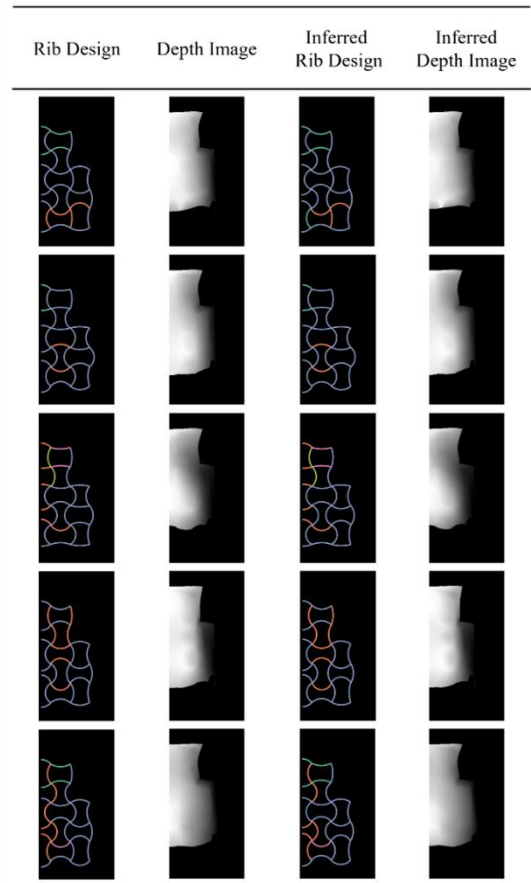
### 3.1 深度學習模型表現

在反向設計直線矩陣 (圖七A)，模型展現出高度可靠的預測能力，平均並交比為 0.9947，像素準確率平均為 0.9986，有 1919 筆 (55.3%) 能完全正確預測網格設計。我們使用有限元素法於推論網格設計，並資料處理成推論深度照片，深度照片的重建品質亦相當優異，推論深度照片與原始深度照片在結構相似性指數平均為 0.9799 與正規交互相關度平均為 0.9906 上皆呈現高度一致，代表模型能捕捉深度資訊中的亮度、對比與局部幾何細節。有 717 筆樣本的結構相似性指數與正規交互相關度同時達到 1，表明推論深度照片與原始深度照片完全相同，進一步凸顯模型在反向設計任務中的精確度與穩定性。在正向預測任務中 (圖七B)，採用逐像素回歸的全卷積網路取得結構相似性指數平均為 0.9624、正規交互相關度平均為 0.9901，顯示模型能生成與有限元素分析及資料前處理結果高度一致的深度照片，展現出優異的正向預測能力。



圖七：(A) 反向設計流程為先由網格設計生成深度照片並輸入模型推論網格設計，再將推論結果轉成深度照片以進行驗證。(B) 正向預測將網格設計影像化輸入 FCN，直接輸出深度照片以取代有限元素分析流程。

在反向設計曲線矩陣任務中 (圖八)，本研究展示從肋條設計、深度照片到推論結果的完整流程。結果顯示模型在材料預測上具有高度準確性，平均準確率達 0.9732，代表在 33 個肋條位置中平均僅約一處預測錯誤；角度預測的平均絕對誤差約  $3^\circ$ ，顯示模型能穩定掌握曲率變化趨勢。推論深度照片與原始深度照片亦呈高度一致，結構相似性指數平均為 0.9839，正規交互相關度平均為 0.9861，證實其幾何結構相似度極高。此外，共有 710 筆資料 (53.1%) 達到材料配置完全正確。整體而言，結合全卷積網路、ResNet 18 編碼器與 GradNorm 的輕量化架構，即可在曲線矩陣反向設計中取得穩定且精確的表現，顯示該方法足以有效處理 4D 列印設計中複雜且高度非線性的映射關係，且不需依賴過度龐大的深度模型。



圖八：肋條設計先轉為深度照片輸入模型推論肋條設計，再將推論結果轉為深度照片驗證。

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：固力材料(含設計與製造)

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

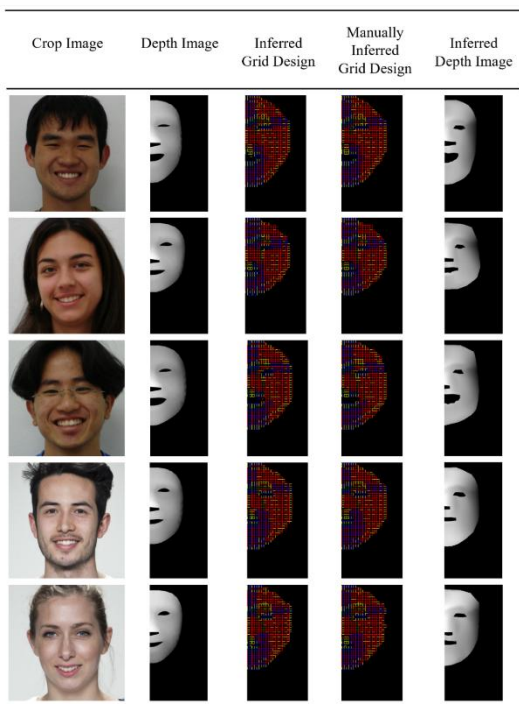
獲獎學生：陳茂全

指導教授：莊嘉揚

論文題目：「Deep learning-based inverse design and forward prediction of bimaterial 4D-printed facial shell」

## 3.2 遷移學習於真實人臉

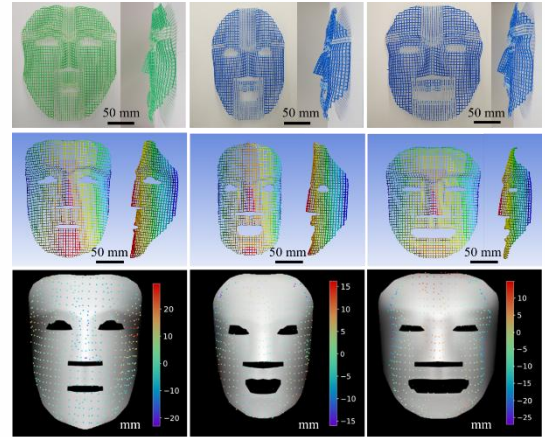
在 195 組人臉資料中，共有 134 組成功完成反向設計 (圖九)。結構相似性指數平均為 0.8913、正規交互相關度平均為 0.8199，顯示推論結果與原始深度照片具有高度結構一致性。整體而言，本研究以全卷積網路為核心的反向設計流程，能有效由單張深度照片推回準確的面具設計，並成功由仿真人臉資料集遷移至真實人臉資料，證實此方法在 4D 列印薄殼結構的反向設計中具有良好可行性與穩定性。



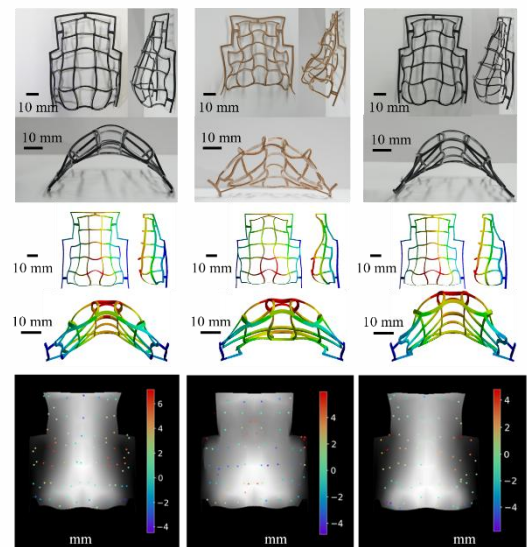
圖九：模型先以仿真人臉資料訓練並對真實人臉進行遷移學習，反向設計流程由 RGB 生成深度照片並推論網格設計，經人工封網後再產出推論深度照片。

## 3.3 深度偏差分析

我們用 3D 掃描取得實驗薄殼的點雲，透過迭代最近點算法對齊模擬節點，再以插值與 K 維樹計算掃描點與模擬表面之間的垂直偏差，並以彩色圖呈現。在面具薄殼中 (圖十)，三組樣本的平均絕對偏差為 6.52、3.52、6.27 毫米，約占薄殼高度的 8%、5%、10%。我們亦比較鼻部薄殼 (圖十一)，並以相同方式進行 z 方向偏差分析，三組樣本的平均絕對偏差為 2.62、2.60、1.72 毫米，相當於高度的 9%、8%、6%，呈現良好的模擬與實驗一致性。



圖十：直線矩陣之薄殼誤差分析



圖十一：曲線矩陣之薄殼分析

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：固力材料(含設計與製造)

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

獲獎學生：陳茂全

指導教授：莊嘉揚

論文題目：「Deep learning-based inverse design and forward prediction of bimaterial 4D-printed facial shell」

## 四、未來展望

本研究所提出之設計流程兼具高度客製化與快速推論的優勢，未來可進一步結合物理資訊神經網路 (PINNs) 或生成式模型，以降低對大量有限元素模擬資料的依賴，並提升模型在面對分佈外樣本時的泛化能力與推論可靠性。此一技術路徑可由目前的人臉模型系統延伸，拓展至客製化醫療輔具、可穿戴裝置、仿生結構與軟性機構等多元應用情境，進而實現由影像或 3D 掃描資料直接生成可製造設計的智慧化製程。整體而言，本研究方法可為深度學習輔助 4D 列印薄殼結構之反向設計奠定具可擴展性與實務潛力的基礎；尤其在生醫輔助具領域，有望支援低廢料、高效率的複雜曲面製造，提供更具體且可落地的技術路徑。

## 五、得獎心得與感謝

能夠獲得中華民國力學學會與評審委員的肯定，本人感到萬分榮幸。這項獎項不僅是對研究成果的褒獎，更是對我在學術探索道路上所付出努力的極大鼓勵。

特別感謝我的指導教授莊嘉揚老師。在研究過程中，老師不僅在專業方向上給予悉心指導，更帶領我學習批判性思考。透過老師的教誨，我深刻體會到如何從複雜的問題中理出頭緒、如何嚴謹地驗證假設，並從研究挫折中獲取成長的經驗。這段研究歷程讓我學習到學術研究不僅是技術的開發，更是思維邏輯的淬煉。

## 參考文獻

[1] Chiu, Y.-H., Huang, Y.-T., Chen, M.-C., Xu, Y.-X., Yu, Y.-C. and Juang, J.-Y. (2025). "Inverse design of face-like 3D surfaces via bi-material 4D printing and shape morphing," *Virtual and Physical Prototyping*, 20(1), e2507099. doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2507099>.

[2] Chen, M.-C., Li, Y.-C., Yu, Y.-Y., Huang, Y.-T., Chen, Y.-H., Hou, P.-L., Tai, Y.-C. and Juang, J.-Y. (2025). "Deep learning-based inverse design and forward prediction of bi-material 4D-printed facial shells," *Soft Science*, 5(4), 57. doi: <https://dx.doi.org/10.20517/ss.2025.81>.



# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：熱流與能源

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

獲獎學生：洪簡揚

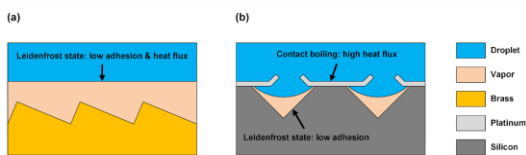
指導教授：呂明璋

論文題目：「微溝槽表面上自推進亞努斯液滴之動力學」

## 一、研究背景與動機

本研究旨在利用加熱之微結構表面，開發兼具「高速定向自推進」與「高效熱交換」功能之液滴操控技術，並深入探討其運動機制與熱傳特性。此議題在微尺度熱管理與相變散熱等領域中具有重要意義，在高熱通量散熱系統中，為了有效帶走熱量並抑制局部過熱，須避免液體在界面長時間滯留。因此，在噴霧冷卻、電子元件液冷系統及高功率裝置熱管理等應用中，如何在維持高熱通量的同時，有效控制界面液體的更新，已成為重要課題。

在過去使用棘齒表面 (ratchet surface) 控制液滴運動的研究中[1]，雖可藉由萊頓弗洛斯特效應 (Leidenfrost effect) 所產生的蒸氣層大幅降低附着力 (adhesion force) 以實現液滴自推進，但蒸氣層的低熱傳導率亦顯著削弱液滴與加熱表面之間的熱交換效率 (見圖一(a))，進而限制其在散熱相關應用上的發展。為了解決此問題，本研究設計了一種矽 / 白金混合V型微溝槽表面 (platinum V-shaped microgrooved surface, PTVM)，利用矽與白金兩種材料之萊頓弗洛斯特點 (Leidenfrost point) 的差異，使得當表面溫度介於兩者之間時，液滴將同時處於接觸沸騰 (contact boiling) 與萊頓弗洛斯特狀態 (Leidenfrost state)，這種共存的現象又被稱為亞努斯狀態 (Janus state)。在此狀態下，接觸沸騰區域能顯著增加熱傳效率；而萊頓弗洛斯特區域產生的蒸氣層則能有效降低附着力 (見圖一(b))。結合上述機制與結構的不對稱設計，本研究提出之PTVM表面不僅具備優異的液滴運動性能，更能突破傳統限制，顯著提升液滴與加熱表面之間的熱傳效率。



圖一：(a) 棘齒表面；(b) PTVM表面

## 二、研究方法與內容摘要

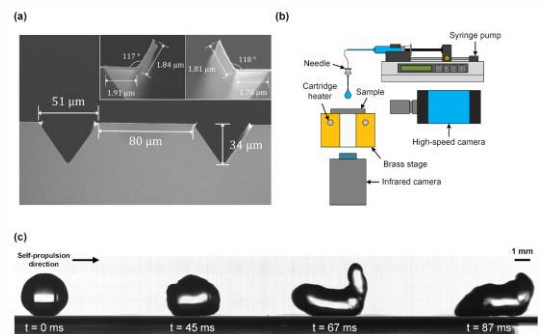
本研究採用實驗量測結合ANSYS計算之方法，探討液滴之動力學與熱傳機制。主要流程包含樣品製備、實驗觀測、數據處理、以及模型驗證四個部分。

首先是樣品製備。本研究設計之PTVM表面係透過微影製程 (photolithography) 定義圖形，並在濺鍍沉積100 nm厚度之白金層後，利用掀離 (lift-off) 技術去除光阻，最後則以氫氧化鉀 (KOH) 濕蝕刻製作出V型微溝槽結構。製備完成後，利用掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 量測橫截面 (見圖二(a))，以確認結構之幾何參數。

在實驗觀測上，本研究使用高速攝影機拍攝液滴之動態，並以紅外線攝影機同步量測樣品的溫度分布 (見圖二(b))。為建立沸騰機制之溫度分界，先於平坦矽與平坦白金表面量測萊頓弗洛斯特點。後續於PTVM表面實驗中，以兩材料之萊頓弗洛斯特點為界，將表面溫度劃分為沸騰 (Boiling)、亞努斯 (Janus) 與萊頓弗洛斯特 (Leidenfrost) 三個區間，據以觀測並分析液滴在不同沸騰機制下之運動行為；在此以亞努斯區間之代表影像示例 (見圖二(c))。

在數據處理方面，針對高速影像，本研究利用影像處理技術擷取液滴輪廓，計算其位移、速度及表觀接觸角 (apparent contact angle) 等運動參數。針對紅外線熱影像，則將量測所得之表面溫度場匯入ANSYS暫態熱傳系統作為邊界條件，以計算液滴與PTVM接觸區域之平均熱通量，作為後續理論分析之基礎。

最後為模型驗證。為定量解析液滴自推進之機制，本研究聚焦於「非對稱氣泡動量力 (asymmetric bubble momentum force)」；氣泡動量力之定義為氣泡成長時，界面推開周遭液體所施加之動量力。本研究建立兩種物理模型對此力進行交叉驗證，以檢視兩者估算結果之一致性：(1) 力平衡路徑：由液滴水平運動之動力學方程式出發，將實驗量測之位移與表觀接觸角數據代入方程式，並考量附着力與慣性效應後，逆向反推液滴所受之非對稱氣泡動量力；(2) 能量平衡路徑：利用能量守恆原理，將ANSYS計算所得之熱通量轉換為被推開液體之質量流率，並結合氣泡成長理論[2]計算界面膨脹速度。接著，將質量流率與膨脹速度結合，並引入幾何不對稱因子，即可正向推導出理論上的非對稱氣泡動量力。此兩種路徑分別代表了「由運動反推受力」與「由熱傳預測受力」的觀點。綜上，本研究成功地建立「力平衡路徑」與「能量平衡路徑」兩套交叉驗證框架，用以定量估算並驗證液滴自推進之非對稱氣泡動量力。



圖二：(a) PTVM橫截面之SEM圖；右上角插圖分別為左/右側壁白金懸垂結構 (overhang structure) 之放大圖；(b) 實驗系統示意圖；(c) 亞努斯區間之液滴自推進影像

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：熱流與能源

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

獲獎學生：洪簡揚

指導教授：呂明璋

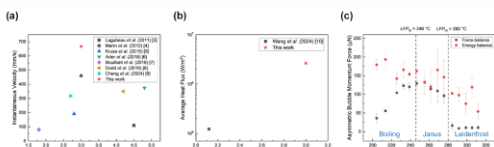
論文題目：「微溝槽表面上自推進亞努斯液滴之動力學」

## 三、主要研究貢獻

本研究之主要貢獻包括兩項：設計新型表面以解決過去棘齒表面熱傳效率低落的問題，對微尺度熱管理及相變散熱領域提供新的表面設計策略；提出基於「非對稱氣泡動量力」的液滴自推進物理模型，並驗證其合理性。

具體而言，本研究證實：PTVM表面在亞努斯區間可同時呈現接觸沸騰的高熱傳與萊頓弗洛斯特狀態的低阻力優勢。在運動性能方面，實驗量測之液滴最大瞬時速度可達670 mm/s，據我們所知，為目前文獻中純熱驅動之自推進液滴的最高值[3-9] (見圖三(a))；在熱傳性能方面，結合紅外線量測與ANSYS 暫態熱傳計算，所得接觸區域之平均熱通量的最大值為2.6 MW/m<sup>2</sup>，相較於文獻中棘齒表面的結果[10]高出約一個數量級 (見圖三(b))。此結果確切回應了「高速推進同時提升界面熱傳」的研究動機。

在理論機制的驗證上，本研究建立了兩種路徑來計算驅動液滴的「非對稱氣泡動量力」：(1) 由運動學數據反推的「力平衡路徑」；(2) 由熱傳數據結合氣泡成長理論正向預測的「能量平衡路徑」。此兩種方法計算出的非對稱氣泡動量力在亞努斯區間於量級上相符 (見圖三(c))。此結果不僅顯示了非對稱氣泡動量力可能為液滴自推進的主要驅動機制，亦支持了本研究建立之物理模型的合理性。



圖三：(a) 瞬時速度之文獻比較[3-9]；(b) 平均熱通量之文獻比較[10]；(c) 非對稱氣泡動量力之兩路徑估算結果

## 四、未來展望

未來可透過改變雙材料組合，以調控兩材料萊頓弗洛斯特點之差異，進而設計液滴自推進的溫度窗口。另一方面，透過系統性調整結構之幾何參數，包含溝槽寬度、深度、週期與白金懸垂之不對稱量，可建立更完整的參數趨勢與最佳化準則，進一步提升推進速度與界面熱傳，拓展其在高速定向輸運與高熱通量散熱等應用的潛力。

## 五、得獎心得與感謝

本次獲獎對我而言是一個重要的鼓勵，在研究過程中需同時整合微影製程、表面量測、紅外線溫度校正、影像處理，以及熱傳與動力學模型建立，使我學習到如何以可量化、可比較的指標連結實驗觀測與理論推導，並在不同方法間進行交叉驗證。

特別感謝指導教授呂明璋老師在研究方向、模型推導與寫作表達上的細心指導。亦感謝實驗室同學在研究過程中的協助，以及中華民國力學學會與評審委員的肯定。

## 參考文獻

- [1] Ok, J.T., Lopez-Oña, E., Nikitopoulos, D.E., Wong, H. and Park, S. (2011). "Propulsion of droplets on micro- and sub-micron ratchet surfaces in the Leidenfrost temperature regime," *Microfluidics and Nanofluidics*, 10(5), 1045–1054.
- [2] van Stralen, S.J.D., Sohal, M.S., Cole, R. and Sluyter, W.M. (1975). "Bubble growth rates in pure and binary systems: Combined effect of relaxation and evaporation microlayers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(3), 453–467.
- [3] Lagubeau, G., Le Merrer, M., Clanet, C. and Quéré, D. (2011). "Leidenfrost on a ratchet," *Nature Physics*, 7(5), 395–398.
- [4] Marín, Á.G., del Cerro, D.A., Römer, G.R.B.E., Pathiraj, B., Huis in 't Veld, A. and Lohse, D. (2012). "Capillary droplets on Leidenfrost micro-ratchets," *Physics of Fluids*, 24(12), 122001.
- [5] Kruse, C., Somanas, I., Anderson, T., Wilson, C., Zuhlke, C., Alexander, D., Gogos, G. and Ndao, S. (2015). "Self-propelled droplets on heated surfaces with angled self-assembled micro/nanostructures," *Microfluidics and Nanofluidics*, 18(5), 1417–1424.
- [6] Arter, J.M., Cleaver, D.J., Takashina, K. and Rhead, A.T. (2018). "Self-propelling Leidenfrost droplets on a variable topography surface," *Applied Physics Letters*, 113(24), 243704.

# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：熱流與能源

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

獲獎學生：洪簡揚

指導教授：呂明璋

論文題目：「微溝槽表面上自推進亞努斯液滴之動力學」

[7] Bouillant, A., Mouterde, T., Bourrienne, P., Lagarde, A., Clanet, C. and Quéré, D. (2018). "Leidenfrost wheels," *Nature Physics*, 14(12), 1188–1192.

[8] Dodd, L.E., Agrawal, P., Parnell, M.T., Gherli, N.R., Xu, B.B., Wells, G.G., Stuart-Cole, S., Newton, M.I., McHale, G. and Wood, D. (2019). "Low-friction self-centering droplet propulsion and transport using a Leidenfrost herringbone-ratchet structure," *Physical Review Applied*, 11(3), 034063.

[9] Cheng, Z., Wang, C., Li, X., Xu, T., Chen, Z., Cui, Z., Cheng, K., Zhu, S., Wu, D. and Yong, J. (2024). "Designable and unidirectional motion of Leidenfrost droplets on heated asymmetric microgrooves written by femtosecond laser," *Applied Physics Letters*, 124(6), 061601.

[10] Wang, S., Ok, J.T., Park, S., Elsharafi, M. and Guo, Y. (2024). "A simplified model for the study of film-boiling droplet motion on microscale ratchets," *Applied Mechanics*, 5(1), 91–101.



# 中華民國力學學會2025 年全國力學會議學生論文獎 研究成果簡介與心得分享

競賽組別：熱流與能源

學校系所：國立臺灣大學機械工程學系

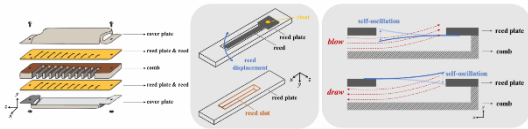
獲獎學生：邱以信

指導教授：黃育熙

論文題目：「口琴簧片之尺寸與流場特性於吹奏時之振動分析」

## 一、研究背景與動機

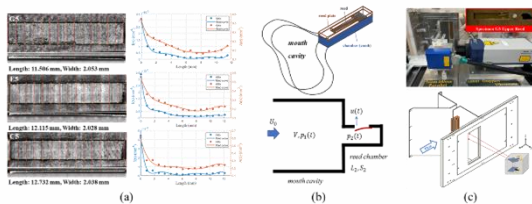
本研究旨在探討口琴自由簧片於吹奏時之振動行為及其與內部流場之交互作用機制。自由簧樂器之發聲涉及結構振動、流場與聲學之耦合問題，透過將工程領域中的科學化理論與量化數據引入分析，可更深入探討樂器在音高穩定性、發聲條件判定與音色形成機制等關鍵議題上的物理本質。口琴於實際吹奏過程中，常因吹氣方式、進氣角度或口型變化不同，產生不同特性之氣流驅動簧片，進而影響簧片振動與聲音表現，使音色與樂音效果出現多樣變化。為了解上述問題，本研究聚焦於結構振動理論、自由簧最小模型與流固耦合分析之整合應用，透過精細幾何量測、功能性梯度理論建模、數值模擬與風洞實驗驗證，期望能提供對口琴簧片發聲機制更精確且具物理意義之分析架構。



圖一：口琴構造與吹奏機制示意

## 二、研究方法與內容摘要

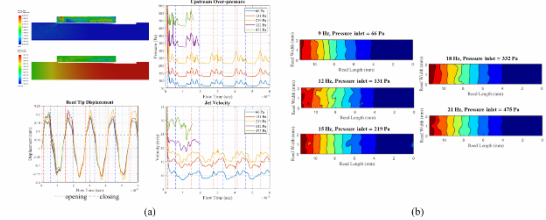
本研究採用理論分析、數值模擬與實驗量測相互驗證之研究方法。研究流程主要包含以下步驟：首先進行簧片與簧板之幾何尺寸量測，透過顯微量測取得簧片厚度與寬度沿長軸方向之分佈；其次，於理論分析中導入功能性梯度梁彎曲模態理論，修正傳統尤拉-柏努利梁模型在自然頻率預測上因幾何錐度所造成之誤差。在吹奏條件與流場分析方面，本研究引用自由簧最小模型進行線性穩定性分析，以推導口琴簧片產生穩定振動所需之壓力與腔體條件，並進一步建立完整之ANSYS雙向流固耦合模型，模擬琴格內部流場之壓力、噴流速度與簧片位移之時域行為。最後，透過自行設計之風洞系統，搭配雷射都卜勒振動儀與掃描式量測技術，實際量測簧片於吹奏狀態下之振動模態與頻率特性，以驗證理論與數值模型之合理性。



圖二：(a) 簧片幾何尺寸量測 (b) 自由簧最小模型分析 (c) 風洞實驗量測

## 三、主要研究貢獻

本研究之主要貢獻包括：建立考慮實際幾何漸變之口琴簧片振動模型，並以功能性梯度理論顯著提升自然頻率預測之準確度；從理論上明確說明口琴吹奏所需之壓力與腔體條件，並驗證實際振動頻率低於簧片自然頻率之物理機制；此外，透過雙向流固耦合模擬與風洞實驗，揭示簧片位移、上游過壓與噴流速度之動態回饋關係，補足簡化理論模型在多模態與流場描述上的不足，為自由簧樂器之發聲機制提供更完整之工程與物理基礎。



圖三：(a) 簧片位移與流場耦合關係 (b) 簧片振動模態量測結果

## 四、未來展望

未來期望持續深化本研究方向，進一步納入口腔聲學阻抗、非線性大振幅振動與更高階模態效應，並將研究成果應用於自由簧樂器設計優化、聲學模擬與跨尺度流固耦合問題。此外，本研究所建立之分析方法亦可延伸應用至其他流致振動與微結構振動相關工程問題，期望在學術研究與工程實務上皆能發揮影響力。

## 五、得獎心得與感謝

本研究能夠順利完成並參與學生論文競賽，深感榮幸。誠摯感謝指導老師黃育熙教授在研究過程中的悉心指導，並於各階段給予極大的支持與鼓勵，使本研究得以在有限時間內完成；亦感謝實驗室同儕於討論過程中的協助與建議。最後，感謝國科會對本研究之經費支持，使研究工作得以順利推進。



## 誌謝

本期刊物由出版委員會主委編輯邀稿與潤飾文字，誠摯感謝國立清華大學動力機械工程學系蔡宏營講座教授、逢甲大學航太與系統工程學系/通識教育中心宋齊有特聘教授、國立臺灣大學機械工程學系陳茂全同學、洪簡揚同學、邱以信同學，及學會秘書處彙編與排版。



秘書處地址：300新竹市東區光復路二段101號  
國立清華大學動力機械工程學系  
網 址：<http://www.stam.org.tw>  
電 話：(03)5715131 #33785  
E - m a i l：society.stam@gmail.com