

全臺首創！臺中市政府消防局結合官產醫力量 打造全臺首件具專利3D列印氣切訓練模具

A first in Taiwan! The Taichung City Fire Department, in collaboration with government, industry, and medical professionals, has created Taiwan's first patented 3D-printed tracheotomy training mold.

圖、文：臺中市政府消防局 莊曜仲

前言

臺中市政府消防局在緊急救護教育領域邁出重要一步，首創結合產官醫力量，研發出具專利的3D列印氣切呼吸道訓練模具。這項創新不僅突破傳統高價進口教具的限制，實現「低成本、高擬真」的訓練目標，更將透過嚴謹的準實驗研究設計，全面評估其對中級救護技術員在氣切管路照護上知識、技能與信心度的提升成效，為臺灣院前急救教育注入科技新動能，並邁入自主研發與科技創新的新階段。

The Taichung City Fire Department (TCFD) has achieved a significant milestone in emergency medical services (EMS) education by pioneering the development of a patented, 3D-printed tracheostomy airway training model, created through an innovative collaboration between government, industry, and medical sectors. This low-cost, high-fidelity device overcomes the limitations of expensive imported equipment. Furthermore, the TCFD is launching a rigorous quasi-experimental study to systematically evaluate the model's effectiveness in enhancing the knowledge, skills, and confidence of Emergency Medical Technician (EMT) in tracheostomy tube care, marking a new era of technology-driven prehospital training in Taiwan and signaling a shift toward autonomous R&D and technological innovation.

研發背景與文獻回顧

院前氣道管理的關鍵性與 EMT 的角色

在院前急救（Pre-hospital emergency care）情境中，氣道管理是影響病人預後和存活率的關鍵環節（Carney et al., 2023）。儘管中級救護技術員（EMT-II）的執業範圍通常不包括高階侵入性氣道處置，但面對氣切造口（tracheostomy）患者的管路照護與維持通暢，EMT-II 仍扮演著確保生命安全的重要第一線角色。

然而，氣切患者的緊急狀況（如管路阻塞或脫出）可能危及生命，且需要迅速正確的處置。過去研究指出，醫療專業人員對於氣切

緊急狀況的處置，其知識、能力和信心水準可以透過系統性的模擬訓練工作坊顯著提升（Kilaru & Boustani, 2020; Palvadi et al., 2024）。將此項訓練推展至院前急救人員，對於提升病患安全至關重要（Chang et al., 2024）。

傳統訓練模式的限制與挑戰

傳統的急救技能教學多依賴高價位模擬人或臨床見習，但這些方式往往受限於高昂的成本與可近性（De Boer et al., 2019）。特別是對於 EMT-II 而言，臨床上接觸氣切病患或進行管路照護的機會相對有限，導致氣道相關技能和緊急處置的經驗累積不足，進

而造成實務操作信心度不足（Baker et al., 2016）。

此外，針對特定且複雜的變異氣道解剖結構（Altered Airway Anatomy, AAA），傳統教學工具可能難以提供足夠的擬真度與重複訓練機會，這對第一線急救人員在突發狀況下的應變能力構成了重大挑戰（Wang et al., 2022）。

■ 3D 列印技術作為創新教學輔具的潛力

隨著 3D 列印技術的進步，研究者已找到低成本、高效益的替代方案。3D 列印模型在醫學教育中的可行性與效益已被廣泛證實（Ventola, 2014; Vitali et al., 2018）。相較於商用模擬人，3D 列印模型具備低成本、可重複使用、依需求修改和高度客製化等優點（Hoang et al., 2019）。

近年來的研究更進一步證明，3D 列印模型能有效應用於複雜技能的訓練，包括：

- 一、變異氣道管理：3D 列印的氣切造口模型能顯著提高醫學生在氣切、喉全切除術等變異氣道相關的知識、設備熟悉度與信心水準（Epperson et al., 2024; Wang et al., 2022）。
- 二、院前環境應用：3D 列印技術已被成功應用於製造低成本、可部署的訓練輔具，用於高級救護員（Paramedics）進行環甲膜切開術等緊急氣道處置訓練，證實能提升操作熟練度與信心（Attaalla & Lazar, 2018; Cowling et al., 2015; Trauner, 2023）。

■ 研發缺口與目的

儘管 3D 列印模型在醫學訓練中展現出巨

大的潛力，且對氣切照護進行模擬訓練有其臨床必要性，但針對 EMT 這一特定群體，利用 3D 列印氣道模型進行院前氣切管路照護訓練的相關研究仍屬稀少。

因此，本研究計畫的目的在於探討以 3D 列印氣道模型作為教學輔具，對救護技術員（EMT）在氣切管路照護的知識、技能與信心度提升的效果，期望能補足臨床教育的不足，並促進病患安全，為未來急救訓練提供創新且具成本效益的模式。

■ 創新源起與挑戰分析：從成本桎梏到技術突破

臺中市政府消防局緊急救護科深知氣切管路照護是緊急救護技術員（EMT）不可或缺的專業能力，尤其在面對居家照護病患時，突發的氣切管脫落或阻塞可能帶來致命風險。這種低發生率、高致死率的緊急情境，對 EMT 的技能與心理素質提出了極高的要求。將這項關鍵技能納入常規訓練面臨著巨大的挑戰，主要集中在「教具成本與可近性」以及「訓練擬真度與重複性」2 大方面。

一、昂貴教具帶來的成本與資源分配困境

過去，市面上具備氣切訓練功能的「高擬真模擬人」或「專用氣道模型」幾乎仰賴進口。這類進口教具的單價通常落在新臺幣數萬元以上，且後續的耗材（如皮膚墊片、氣管環）同樣價格不菲。對於必須在全市各個分隊推展訓練的消防局而言，高昂的採購與維護費用成為教育資源分配上難以跨越的門檻。為了兼顧預算與訓練覆蓋率，往往只能集中資源在少數幾個區域訓練中心，導致基層 EMT 每年能獲得的實作時數極為有限。這種訓練時數的缺乏，直接影響了救護員在壓力情境下的操作表現和自

信，遠低於建立操作穩定性所需的門檻。

二、訓練擬真度與操作環境的落差的深化分析

傳統模型雖具備基本功能，但在材質的生物力學模擬上仍有顯著不足。氣切管路處置要求操作者能夠精確辨識喉結、環狀軟骨及氣管環的「臨場體感」，這需要對壓力、彈性和摩擦力有細微的感知。然而，許多平價模型無法精確模擬皮膚的彈性（例如蕭氏硬度）（翁瑞侑，2022）、軟骨的硬度以及氣管內壁的黏膜層摩擦力。特別是當模擬氣切管半脫落時，管壁與造口邊緣的緊密程度，更是傳統教具難以呈現的。這使得學員在模型上操作的經驗，難以有效轉移到真實的臨床情境，進而影響操作準確度及緊急反應速度。本局的創新目標正是要解決這種操作真實感（Haptic Fidelity）的根本性落差。

臺中市政府消防局緊急救護科郭凱瑋股長及救護教官莊曜仲正是基於對這些痛點的深刻理解，提出了「技術自主、在地生產」的解決方案，確立了導入3D列印技術來實現「低成本、高擬真、模組化」的創新專案，以期徹底打破進口壟斷，將訓練資源最大化地普及至每一位救護人員，達到訓練資源的在地永續。

官產醫協作模式：多維度專業整合與設計迭代

本專案的成功絕非單一部門的成就，而是奠基於臺中市政府消防局、童綜合醫院與拓弼科技股份有限公司三方高度協作的成果。團隊建立了一個嚴謹且具科學性的「實務－臨床－工程」三維度回饋迭代機制，確保教具

從概念到實體完全符合急救教育的最高標準，並確保每一處細節都經得起臨床實務的檢驗。

一、第一線實務經驗的輸入與情境確立

郭凱瑋股長與救護教官莊曜仲作為消防局的代表，深度參與了問題定義階段，提供了至關重要的實務情境模擬與挑戰案例。他們不僅提供氣切管路脫落的標準處置流程，更著重於急救現場可能出現的各種異常情境，例如：氣切造口邊緣水腫導致難以復位、管路半脫落時的固定挑戰、以及不同吸痰導管尺寸下的抽吸手感差異等。這些第一手的實戰經驗被轉化為CAD設計的「模擬要求清單」，例如要求模具必須能模擬正壓通氣（Positive Pressure Ventilation）時，氣切口周圍可能出現的漏氣狀況，以訓練學員即時修正密封。在協作過程中，他們參與了至少數十次的原型測試，針對操作手感、器材匹配性進行精細調整，如圖1所示。



圖1、消防局與產業訓練模具理念交流

二、臨床醫學的審校與精準度把關：醫師的深度參與

黃泰霖醫師（童綜合醫院急診醫學部緊急救護科主任暨醫療指導醫師）的角色是確保模具的「解剖精準度與臨床安全性」。在原型製作階段，黃醫師基

於其豐富的急診臨床經驗，嚴格審核了氣切位置的標定、氣管環的間距，以及模具材料的耐受性等醫學參數。他特別關注氣管軟骨的生物力學回饋，堅持要求工程師必須調整材料參數，確保操作者在施加復位壓力時，能感受到軟骨的適當抵抗力而非簡單的塌陷。此外，黃醫師也確保了模擬氣切造口與環狀軟骨的角度設計，能夠反映學員在操作的真實難度，防止訓練產生錯誤的肌肉記憶，提升學員在真實情境下的應變能力及實戰性，如圖 2 所示。



圖 2、醫界與產業訓練模具設計討論

三、3D 列印工程的創新實現與材料優化：科技的賦能

拓弼科技股份有限公司總經理翁瑞侑博士及其工程團隊負責將複雜的醫學與實務需求轉化為可列印的數位模型。他們在整個研發過程中完成了數次關鍵的技術突破：

- (一) CAD 建模與數據基礎：根據 CT 影像，利用逆向工程與醫學影像處理技術，建立了從喉結到氣管分岔點的「數位解剖結構」，確保尺寸誤差小於 0.5 毫米。此模型是以亞洲成年人標準體型為設計依據。
- (二) 多材料列印技術：團隊摒棄了傳統單一材料的 3D 列印方案，選用高階的

多噴頭、多聚合材料（Multi-Material PolyJet/SLA）列印技術。這使得他們能夠在單一系列印過程中，精確地將柔軟的類矽膠材料（用於模擬皮膚和黏膜）與堅硬的高分子樹脂（用於模擬軟骨）結合，實現觸感的分層擬真。軟骨模擬材料的杜羅硬度經過多次測試，以達到與真實軟骨最接近的壓縮回饋，大幅提升了操作的逼真度。

- (三) 模組化設計：針對高耗損區域，設計了易於拆卸與替換的「快拆式氣切組件」。這種創新結構確保在數百次訓練操作後，僅需以低廉成本替換局部零件，極大地延長了模具的生命週期，從根本上解決了維護成本高的痛點。

這套緊密而高效的協作流程，是本訓練模具能夠在極短時間內從概念走向專利產品的決定性因素。

技術製程與專利價值：自主知識產權的建立

本款 3D 列印氣切呼吸道訓練模具的技術製程，體現了高科技與救護教育的完美結合，並最終憑藉其獨特的設計獲得專利認證，確立了其不可取代的技術價值。

一、關鍵解剖結構的精確重現與功能模擬

設計的基礎是對人體解剖學的深度還原，依據臨床解剖結構（成人約 70 公斤之 CT 影像），模具不僅再現了從喉結（Laryngeal Prominence）到氣管分岔點（Carina trachea）的關鍵呼吸道長度（約 14.8 公分），氣切位置氣管直徑約 2.2 公分作為設計，更重要的是，它精確模擬了氣管環在頸部的埋藏深度與間距。這使得訓練者在進行處置前，必須像對待真實患者一樣，先進行

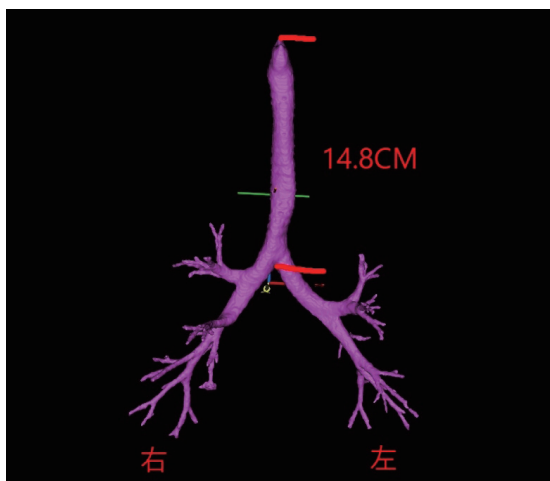


圖 3、呼吸道長度

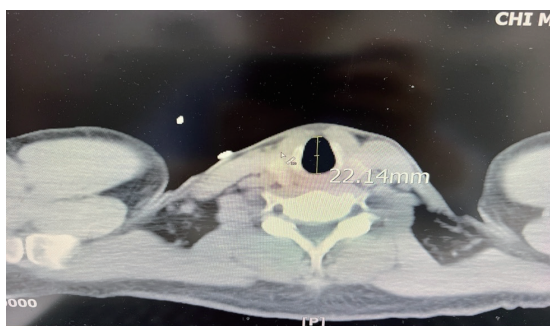


圖 4、氣切位置氣管直徑

精確的觸診定位，才能進行後續操作。此外，模具內含的氣管腔道能模擬氣切管進入時的角度修正與阻力，有效訓練學員掌握正確的氣切管插入角度，從而優化學習曲線並提高訓練效率。在功能上，模具還能模擬少量液體或分泌物的積聚，使學員練習氣道抽吸（Airway Suctioning）時，能夠評估抽吸深度與效果，全面覆蓋氣切緊急照護的核心技能，如圖 3、圖 4 所示。

二、生物相容性材料與分層擬真技術： Haptic Feedback 的優化

為了達到「真實體感」，拓弼科技團隊採用了生物相容性高分子材料，並利用 3D 列印技術實現了獨特的 3 層結構模擬，如圖 5 所示：

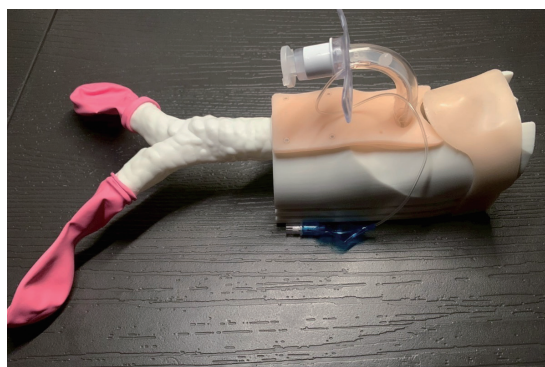


圖 5、氣切呼吸道訓練模具

- （一）表皮與皮下組織層：採用具備高彈性和自癒合特性的柔性樹脂，模擬真實皮膚的柔軟與韌性，並允許一定程度的張力模擬。
- （二）軟骨層：採用高強度且具備微彈性的硬質材料，確保在按壓或尋找氣管環時，能給予明確的「硬度回饋」。軟骨層的硬度參數經過精確調校，以模擬中年人氣管軟骨的平均硬度，避免過軟或過硬導致錯誤的觸診習慣。
- （三）氣管內壁與黏膜層：內壁表面經過特殊處理，模擬抽吸導管進入時的輕微摩擦阻力，以確保抽吸動作的真實性。這種多材料、分層次的列印技術，是傳統矽膠灌模技術難以比擬的，極大地提升了訓練的操作逼真度（Operational Fidelity），為救護員提供了更接近真實患者的觸覺經驗。

三、專利優勢與知識產權的體現：戰略性價值

本模具的專利價值不僅在於其擬真度，更在於其模組化設計所帶來的成本效益與可重複使用性。專利保護的核心在於：透過一種可替換的內置結構，實現高損耗零件的快速更換，同時維持主體結構的穩定與長期使用。這項設計徹底解決了以往訓練教具「單次使用成本過高」和「整體報廢週期過短」的兩難。



圖 6、訓練模貝運用於到院前緊急救護訓練狀況

取得專利是對消防局自主創新能力的官方認可。它代表著臺中市政府消防局不僅是急救服務的提供者，更已成為智慧財產與教具研發的創新主體。透過在地化研發與專利保護，不僅能夠以極具成本效益的方式製作出可重複使用的氣切模貝，未來更能根據訓練需求或臨床技術的發展，快速且自主地優化模貝設計，擺脫對國際供應鏈的依賴。此舉對整個臺灣的院前急救教育裝備在地化供應鏈具有戰略性意義。

訓練導入與教育品質的實質飛躍

這款專利教具的誕生，立即為臺中市的緊急救護訓練帶來了實質性的提升，標誌著臺中市救護教育從傳統模式向科技模擬教學的根本性轉變，如圖 6 所示。

一、訓練資源的極大化普及與效益評估

由於模貝具備低成本和高耐用度的優勢，消防局得以大幅增加訓練資源的配置。在訓練課程中，可以大量採購，使得學員能以兩人一組的高效率模式進行操作練習。這種資源的下放與普及，確保了全市各級 EMT-II 都能獲得充足的實作時數，有效克服了「臨床機會有限」的訓練瓶頸。

二、提升臨場信心與技能精準度的訓練核心

訓練模式被設計為高強度、高密度的實作演練，要求每位學員皆需完成至少 1 次完整的氣切管路處置情境，包括：氣切管全脫落的緊急復位、半脫落的評估固定，以及常規的深度抽吸技術等。通過教官的即時回饋與技術修正，學員能夠在安全且高度擬真的環境下，將操

作流程內化為「肌肉記憶」，大幅降低了在真實緊急狀況下因緊張而犯錯的可能性。

這款全臺首創且獲專利的氣切訓練教具，讓我們能為救護人員提供一個安全、零壓力的環境，反覆演練這項高風險、低頻率的關鍵技能。實作培訓將有助於學員建立臨場信心，熟練掌握處置流程，進而提升操作精準度與成功率。這不僅是救護教育品質的提升，更象徵臺中市在急救訓練領域正式邁入自主研發、科技創新的新階段，未來我們將持續推動官產醫合作，導入創新科技與醫學專業，持續精進到院前救護品質，打造更安全、更具韌性的健康城市。

參考文獻

中文參考文獻

1. 翁瑞侑，以 3D 列印技術為基礎之臨床神經醫學用擬真手術假體設計製作與評估，南臺科技大學電機工程系博士學位論文，2022 年。

英文參考文獻

1. Attaalla, M., & Lazar, J. (2018). 3-D Printed Emergency Medicine Training. EM Resident. Retrieved from "https://www.emra.org/emresident/article/3-d-printed-training"
2. Baker, P. E., Alinier, G., & Jones, L. (2016). Paramedic student's perception of educational training and confidence in airway management: A pilot study. *Journal of Paramedic Practice*, 8(1), 14–2.
3. Carney, N., Totten, A. M., Cheney, T., Hedges, J. R., & Kerby, J. D. (2023). Evidence-Based Guideline for Prehospital Airway Management. *Prehospital Emergency Care*, 27(7), 803–814.
4. Chang, S. T., Tsang, W. L., Mak, W. L., Ho, Y. K., Yung, H. C., & Wong, K. Y. (2024). Tracheostomy Care Simulation Workshop: To Improve Knowledge, Competency and Confidence in Tracheostomy Emergency among Nurses in Department of Surgery, United Christian Hospital [Conference Abstract]. HA Convention 2024, Hong Kong.
5. Cowling, M. A., Birt, J., & Moore, E. (2015,

October). Using 3D Printed Tools and an Augmented Reality Smartphone App to Enhance Paramedic Skill Development [Poster presentation]. Council of Ambulance Authorities Conference, Melbourne, Australia.

6. De Boer, H. L., Eilers, P. H. E., De Jong, A. E., & Ten Cate, O. T. J. (2019). Cost-effectiveness of simulation in surgical skills training: A systematic review. *BMJ Surgery*, 7(2), e000405.
7. Hoang, D., Davies, P., Chuang, M., & Lim, W. (2019). The application of 3D printing in airway training—A systematic review. *International Journal of Surgery*, 64, 148–154.
8. Kilaru, S., & Boustani, D. (2020). An Interactive Workshop to Increase Comfort and Knowledge Regarding Adult Tracheostomy Management: A Pilot Study. *The Laryngoscope*, 131(7), E2255–E2260.
9. Epperson, M. V., Mahajan, A., Sethia, R., Seim, N., VanKoeveering, K., & Morrison, R. J. (2024). A deployable curriculum with 3D printed skills trainers for altered airway management. *BMC Medical Education*, 24(1), Article 39.
10. Palvadi, R. K., Nagesh, K. S., Sarma, N. B., & Sreejith, S. (2024). The Role of a 'Tracheostomy Care Training Module' in Improving the Knowledge, Attitude and Practices Among Nurses in High Dependency Units. *Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery*, 76(1), 107–113.
11. Trauner, J. (2023). 3D-Printable Training Aids for EMS. *Journal of Emergency Medical Service*.
12. Ventola, C. L. (2014). Applications of 3D printing in the pharmaceutical and medical fields. *P & T: A Peer-Reviewed Journal for Managed Care and Hospital Formulary Management*, 39(10), 704–711.
13. Vitali, L. S., Cheng, J., & Vitali, C. E. (2018). Utility and cost-effectiveness of 3D-printed materials for clinical use. *3D Printing in Medicine*, 2(1), 1–10.
14. Vitali, L. S., Cheng, J., & Vitali, C. E. (2018). Utility and cost-effectiveness of 3D-printed materials for clinical use. *3D Printing in Medicine*, 2(1), 1–10.
15. Wang, G. T., DeFatta, R. J., & Rutter, M. J. (2022). Altered Airway Anatomy Course Using 3D-Printed Models for Medical Students. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 168(3), 481–488.