



智慧化 人本環境 舒適度監測 與 視覺化平台

林佳穎／國立高雄科技大學工程資訊整合與模擬研究中心 BIM開發工程師

吳翌禎*／國立高雄科技大學土木工程系 教授

過去的室內環境監測平台多聚焦於即時監測與資料彙整，雖有部分研究結合控制功能，但對「人因互動」與舒適度調整的連續反饋設計仍較為缺乏。因此，本研究提出一套結合環境監測、設備控制與人因條件分析的監測平台，針對熱舒適度、視覺舒適度與空氣品質三項指標，設計循環互動的調節流程。系統透過感測器即時蒐集環境數據，並加入深度學習模型分析人數與衣著資訊，進行 PMV/PPD 熱舒適度計算、照度與色溫調整，以及 CO₂ 熱區判斷與換氣建議。實驗結果顯示，平台可即時呈現環境狀態，並根據人因進行動態調整，有助提升空間舒適度並減少不必要能源消耗。

關鍵詞：熱舒適度、視覺舒適度、室內空氣品質、PMV/PPD、以人為本

前言

現代教育空間的室內環境品質同時受到熱舒適度 (Thermal Comfort) 與室內空氣品質 (Indoor Air Quality, IAQ) 的影響最為明顯，且與建築能耗有密切的關聯。而通風系統為調節這兩項因素的主要設備，可透過引入新鮮空氣排除污染物 (如二氧化碳、揮發性有機化合物)，同時調整室內溫濕度，以達到健康且舒適的環境。然而，為維持良好的室內環境，暖通空調系統 (HVAC) 往往需耗費大量能源，約占非工業建築總能耗的 60 ~ 70% [1]。因此，現代智慧建築管理需兼顧室內環境品質與能源使用效率，達成最佳化的運作模式。此外，視覺舒適度 (Visual Comfort) 與聲學舒適度 (Acoustic Comfort) 亦影響使用者體驗。然而，視覺環境調節如照度與色溫，與能源消耗關聯性較高，且現有智慧照明系統已能穩定運作並整合感測資料進行即時控制，因此本研究優先將視覺舒適度納入系統設計。相較之下，聲學舒適雖亦重要，但其與

能源控制的直接關聯較低，故暫未納入本次系統建構範圍，未來可另行探討。

在熱舒適度的評估方法上，國際常見的指標為平均熱舒適度預估指標 (Predicted Mean Vote, PMV) 與預測不滿意百分比 (Predicted Percentage Dissatisfied, PPD)，兩者依據 ISO 7730 及 ASHRAE 55 等國際標準廣泛應用於空調環境。然而，傳統的 PMV/PPD 模型多使用一般化數值 (如固定代謝率與衣著絕熱值) 進行計算，未充分反映實際個體差異 [2]。

在空氣品質方面，二氧化碳 (CO₂) 濃度為評估室內通風效能及健康風險的主要指標。當通風不足，CO₂ 濃度容易上升，導致頭痛、疲勞、注意力不集中等症狀，並影響學習效率及認知能力。適當的空氣交換率 (Air Exchange Rate, ACH) 對維持良好的室內空氣品質相當重要 [3]。

在視覺舒適度方面，照度 (Illuminance) 與色溫 (Correlated Color Temperature, CCT) 為主要考量的指標，普遍應用於室內光環境品質評估，適當的照度能提升使用者的視覺舒適度與滿意度，而介於 3,300K 至

* 通訊作者，kwu@nkust.edu.tw

5,300K 的中性至高色溫範圍，有助於提高視覺清晰度與專注程度，此外，照度與色溫兩者之間存在交互作用，需同步調整，避免單獨設定導致視覺疲勞或不適^[4]。因此，現代照明設計需考量這兩項參數，以提供合適且實用的光環境。然而，在上述舒適度監測指標之外，使用者行為與人因參數的考量亦不容忽視。因此，未來智慧建築的舒適度監測應導入人因參數，並與環境控制策略緊密耦合，以貼合實際使用情境，提升系統可用性與調節成效。

系統設計與實作

本研究之系統架構如圖 1 所示。IoT 感測器與相機負責量測環境與空間使用者的相關訊息（例如溫、濕度、CO₂、占用狀態與衣著量），並將資料送入的監測平台。平台依據即時資料與使用者需求，分別驅動三個獨立的舒適度運算模組：熱舒適度（PMV/PPD 熱圖）、空氣品質（CO₂ 熱圖）與視覺舒適度（智慧燈光控制）。各模組各自完成運算後，結果回饋至平台，由平台產生相應的控制或介面回應，以實現「感測－運算－回饋」的封閉式控制流程。此架構能確保空間內的舒適度條件維持在適當範圍，並提升環境調控的效率。



圖 1 系統架構圖

互動情境與場域配置

本研究以一間面積 45.62 平方公尺之教室作為實驗場域，進行室內舒適度互動系統之部署與測試。場域中配置 4 個溫濕度感測器與 4 組智慧燈具，分別負責即時環境資料蒐集與燈光控制回饋，並支援使用者與系統之互動操作。感測器佈點設計參考《2010 年臺北市工商業節能減碳自治條例》中針對 600 平方公尺以下室內空間之建議取樣密度，採用四點均勻配置方式，以提升空間覆蓋率與資料代表性。智慧燈具則依照場域使用需求（如上課、休息、演講等）規劃為可分組控制，並對應不同照度與色溫需求進行動態調節。

此外，實驗場域已建構完整建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM），以提供實體空間與視覺化人因互動平台之對應基礎。BIM 模型搭配即時感測資料，可於平台中呈現空間配置、設備佈署與感測位置，作為後續互動操作與熱圖視覺化的依據。如圖 2 所示，包含空間 BIM 模型、感測器配置與智慧燈具配置情形。

人因互動流程

本研究建構一套以人因互動為導向之平台，透過「感測－運算－回饋」流程，整合使用者回饋與系統控制，提升室內舒適度管理的回應性與操作可見性。整體互動流程可歸納為三項核心功能：

- 覺察（Perception）：系統於三維介面即時呈現各舒適度之熱圖，同步顯示座位占用情形，協助掌握人一環境互動狀態。
- 調節（Action）：使用者可透過介面進行場景模式切換（如上課、休息、演講）或進一步執行微調操作，如設定照度強度、色溫範圍。此設計保留使用者自主性，讓系統能因應不同活動需求靈活調整環境條件。

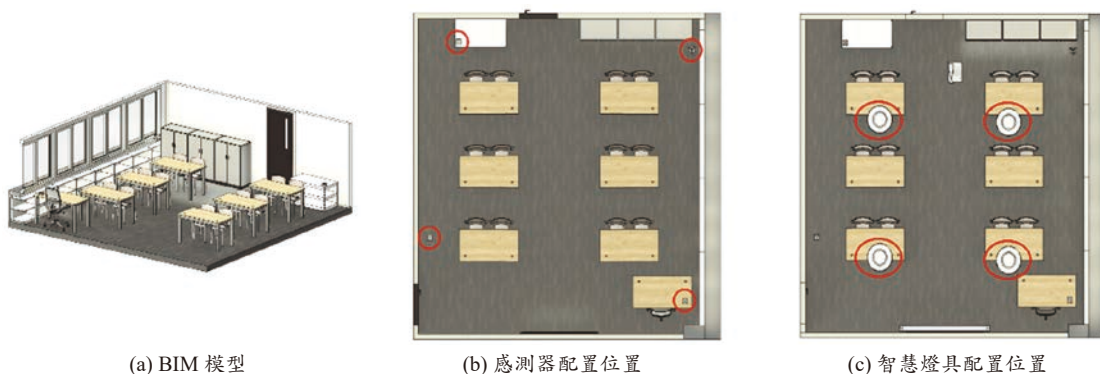


圖 2 BIM 模型和空間配置圖

- 回饋 (Feedback)：介面於使用者調節後，即時更新相關熱圖與感測數據，反映預期之環境變化；並針對特定情境 (如 CO₂ 濃度過高) 提供具體建議，例如透過燈光閃爍提醒使用者啟動交換機。

此互動流程兼顧系統自動控制與使用者主動調整兩者功能，實踐「Human-in-the-Loop」的設計理念，並提升使用者對環境變化的感知能力與參與感，為智慧空間中舒適度管理提供更具彈性與回應性的解決方案。

環境感測

本系統透過 IoT 感測裝置與影像辨識技術，進行室內空間中環境條件與使用者狀態之即時感知，作為後續舒適度模組運算與互動決策的基礎。其整體感測架構如圖 3 所示，分為三個層級：

- 首先在感知層 (Perception Layer)，本研究採用具 Wi-Fi 傳輸功能之 ESP32 模組，搭配溫濕度與 CO₂ 感測器，進行每 5 秒一次的連續量測。感測資料於端點即自動加註時間戳記與節點代碼，並封裝為 JSON 格式。
- 於網路層 (Network Layer)，各節點資料經由 Wi-Fi 傳送至 Web API 伺服器，並透過 HTTP POST 方式上傳。伺服器端負責執行資料驗證與格式轉換後，將資訊儲存於後端時序資料庫中。
- 於應用層 (Application Layer)，系統採用 TimescaleDB 作為感測資料之儲存架構，支援高頻率資料的查詢與運算。前端平台由 Unity 所建構，結合 BIM 空間資訊，透過 REST API 定期擷取最新感測資料，以更新儀表板數值並繪製空間熱圖，達成即時之環境可視化回饋。

除了環境量測外，本研究亦導入影像辨識技術，以強化系統對人員狀態之理解，進一步提升互動能力與舒適度推估精度。於熱舒適度上，系統應用 U-Net 結合 ResNet50 架構進行即時影像分割，估算使用者衣著覆蓋率，轉換為相對應之衣著熱阻值 (Clo 值)，作為 PMV/PPD 模型之參數之一。於空氣品質上，則採用

YOLOv8 模型進行即時人數與活動狀態辨識，藉以擷取空間人數與 CO₂ 濃度上升趨勢，並評估是否需介入換氣調節以維持空氣品質。

本系統所整合之多元感測來源與即時辨識機制，能有效支援後續三項舒適度模組之運算與控制，並強化整體平台對於人一環境互動關係之即時掌握與互動能力。

舒適度運算模組

本系統針對教育場域，設計三項環境控制循環機制，分別為熱舒適循環、空氣品質循環與視覺舒適循環。此三循環以感測器與影像辨識資料為基礎，結合時序資料庫與環境監測平台之運算結果，進行實體空間的空調、通風與照明控制。透過回饋式架構，使虛實環境可即時互動，達成動態舒適度管理。以下將分別說明各循環之判斷邏輯與控制機制設計。

熱舒適度評估模組

本研究採用 PMV 與 PPD 兩項指標評估室內熱舒適度。PMV 模型由 Fanger (1970) 所提出^[5]，其計算式如式 (1) 所示，綜合考量空氣溫度、輻射溫度、風速、相對濕度、服裝熱阻與代謝率等因素，以量化人體對熱環境的主觀感受；PPD 指標則依據 PMV 值推算出預期感到不舒適的使用者比例。

$$PMV = (0.303e^{-0.0036M} + 0.028) \times \{ M - 3.05 \times 10^{-3} \times (5733 - 6.99M - p_a) - 0.42 \times (M - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) - 0.0014 \times M \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \} \quad (1)$$

為提升即時性與個別化的評估能力，系統整合 YOLOv8 進行即時人數偵測，並透過 UNet 搭配 ResNet50 模型辨識服裝類型，進一步估算個體服裝熱阻。所有參數均由感測器與影像辨識模組即時更新後匯入環境監測平台中運算，並以熱區圖形式呈現於使用者介面，協助判斷空間熱環境是否符合使用需求。

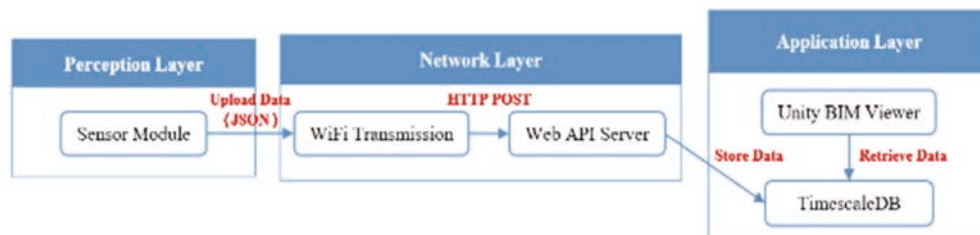


圖 3 IoT 環境感測架構圖

本研究所提出的熱舒適度循環監測架構，如圖 4 所示，係透過定期且自動化的監測循環，評估並呈現室內空間的熱環境舒適性。系統以 5 分鐘為單位，透過 IoT 感測器即時收集溫度、濕度及 CO₂ 等環境數據，並即時進行熱舒適度分析與判斷，流程架構如下：

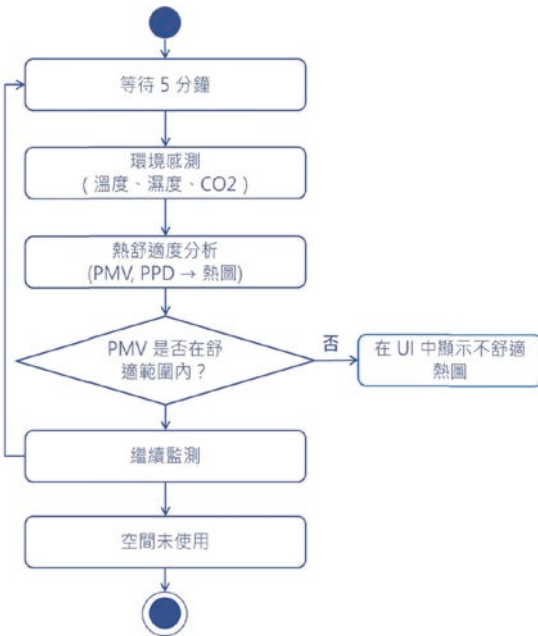


圖 4 熱舒適度判斷流程圖

首先，系統每隔 5 分鐘進行環境數據的擷取，包括室內的溫度、濕度及二氧化碳 (CO₂) 濃度等參數。接著，系統透過 PMV 與 PPD 模型，進行熱舒適度的計算分析，將結果以視覺化熱圖的方式展示於使用者介面 (UI) 中。

接著系統將自動判斷目前的 PMV 數值是否落在定義的舒適範圍內 (-0.5 到 0.5 之間)，若超出範圍，系統將於 UI 中即時且直觀的顯示不舒適區域之熱圖，協助管理者迅速辨識需調整之空間，並提供視覺依據以供後續空調或通風調整操作；若當前 PMV 值在舒適範圍內，則系統繼續下一輪監測，直到空間不使用且系統關閉此監測循環才會停止。透過此監測與回饋流程示例如圖 5 所示，管理者能有效且即時地掌控室內熱環境品質，並依據具體視覺化資訊主動調控，以提高使用者對空間舒適度的滿意程度。

空氣品質評估模組

首先本研究以 Faubel 等人^[6]提出的室內 CO₂ 品質平衡模式評估換氣建議，如式 (2) 所示^[6]。

$$C(t) = \left(C_{out} + \frac{S}{q} \right) - \left(C_{out} + \frac{S}{q} - C_0 \right) e^{-K1(t-t_0)} \quad (2)$$

id	temperature	humidity	co2	windSpeed	detectiondatetime
integer	real	real	real	real	timestamp without time zone
1	2	30.6	74.4	557	0
2	1	29.6	68.2	1089	0
3	3	32.4	62.6	874	0
4	4	30.3	75.9	367	0
5	2	30.5	74.5	549	0
6	1	29.9	60.3	1099	0
7	3	32.5	62.7	900	0
8	4	30.1	76	363	0
9	2	30.6	74.4	550	0
10	1	29.5	68.4	1117	0
11	3	32.2	62.8	896	0
12	4	29.6	76.1	367	0
13	2	30.7	74.2	562	0
14	1	29.4	68.5	1122	0
15	3	32.3	63.2	875	0
16	4	30.4	76.3	365	0
17	2	30.6	74.4	543	0

(a) 即時監測資料



(b) PMV Heatmap

圖 5 熱舒適循環示例

式中的參數如下：

- 戶外 CO₂ (C_{out}) 與初始室內 CO₂ (C₀) 皆由 DS-CO₂-20 感測器量測。
- 即時人數 (N) 透過影像辨識取得。
- S 為室內 CO₂ 生成率 (ppm · m³/h)，取決於即時人數 N 與單人排放量；本研究以 40 mL/min (0.000667 m³/s) 作為平均值，故 S = N × 0.000667 × 106 / V。
- V 為室內體積 118.62 m³。

空氣品質的部分也採用循環式監測架構，如圖 6 所示，每隔 5 分鐘透過 IoT 感測器即時偵測室內二氧化碳 (CO₂) 濃度，並依據數據自動進行後續調控判斷。其監控流程首先進行濃度數據擷取與分析，接續判斷當前 CO₂ 濃度是否達到或超過預設的警戒閾值 (1,000 ppm)，再根據判斷結果採取相應措施。

當 CO₂ 濃度達到或超過 1,000 ppm 時，系統將透過環境監測平台中的 CO₂ 熱圖結果，即時辨識濃度較高的區域，並啟動該處智慧燈具進行三次閃爍，提供現場使用者與管理者明確的視覺提示。同時，UI 將同步顯示空氣交換建議，並提供操作提示按鈕，供管理人

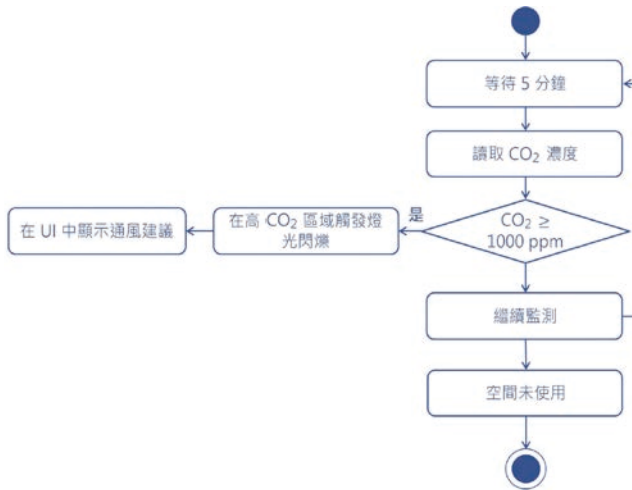


圖 6 空氣品質判斷流程圖

員評估是否執行換氣調節。若點擊提示，系統將自動標示並高亮顯示對應換氣設備的位置，協助使用者迅速完成操作，使室內空氣品質回復至合適範圍。若監測結果未超過 1,000 ppm 閾值，系統則維持現有監測狀態，不觸發額外動作，並持續以每 5 分鐘為週期執行下一次監測，直到系統關閉此監測循環才會停止，其應用情境如圖 7 所示，以確保即時掌控室內空氣品質變化，進而達到主動維護空間空氣品質的目的。

視覺舒適度評估模組

本研究建構一套視覺舒適度控制系統，目的在協助使用者根據實際需求與活動場景，即時調整照明環境，以確保視覺舒適性維持於適宜範圍內。

首先，從文獻中發現照度及色溫為視覺舒適的主要因素，然而從歐盟的 EN 12464-1 標準中發現此標準針對教育場域的情境、照度與色溫都有明確的建議值，因此本研究在視覺舒適的評估中參考此標準 [7]，建立三種針對教育空間常見之照明情境，分別為「上課模式」、「休息模式」及「演講模式」，並針對這些情境事先定義適合的色溫與照度建議範圍，三種模式的設定值如表 1 所示。

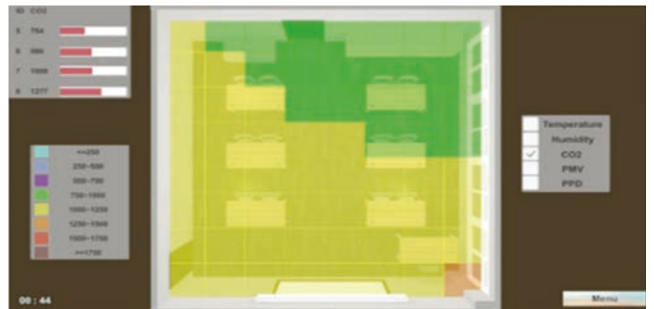
表 1 照明情境模式設定

場景	照度 (lx)	色溫 (K)
上課模式	300 ~ 500	3300 ~ 5300
休息模式	100 ~ 300	3300 以下
演講模式	300 ~ 500	3300 ~ 5300

接著，使用者可透過系統提供的，在事先界定好的範圍內自由調整燈光設定（色溫與照度），以符合實際使用需求或個人舒適偏好。

id	integer	temperature	humidity	co2	windSpeed	detectiondate
		real	real	real	real	timestamp without time zone
1	1	20.61	64.44	240	2.55	2024-11-19 11:40:17.58541
2	2	20.52	74.7	240	0	2024-11-19 11:42:04.899294
3	4	23.7	70.5	648	0	2024-11-19 11:43:26.121975
4	3	20.07	68.67	240	0	2024-11-19 11:44:34.671459
5	1	22.8	71.5	328	0	2024-11-19 11:45:17.837541
6	2	22.9	83	451	0	2024-11-19 11:47:05.426405
7	4	23.7	70.5	604	0	2024-11-19 11:48:27.109996
8	3	22.3	76.4	887	0	2024-11-19 11:49:35.105308
9	1	23.3	72	696	0	2024-11-19 11:50:18.086542
10	2	23.8	83.3	501	0	2024-11-19 11:52:05.963333
11	4	24.4	70.6	511	0	2024-11-19 11:53:27.447131
12	3	23.7	76.7	1009	0	2024-11-19 11:54:35.446661
13	1	22.6	73.2	620	0	2024-11-19 11:55:18.325538
14	2	23.6	84.3	498	0	2024-11-19 11:57:06.626187
15	4	24.4	70.7	529	0	2024-11-19 11:58:27.993754

(a) 即時監測資料



(b) CO₂ Heatmap



(c) 真實空間照明閃爍提示

圖 7 空氣品質循環示例

系統接收到使用者調整後的設定值，將立即進行檢查判斷，確認是否仍符合 EN 12464-1 標準內所建議的舒適範圍：

- 若調整後的設定值位於舒適範圍內，系統將立即透過智慧燈具執行調整，提供使用者即時回饋的視覺舒適環境。
- 若設定值超出標準建議範圍，則系統將維持前次的照明設定，並提供介面提醒，提示使用者重新調整參數，直到達到符合標準的範圍為止。

透過此即時回饋與互動控制架構，如圖 8 所示，平台在滿足照明標準的同時，也納入使用者參與與個別化調整機制，使視覺環境能隨空間需求與情境彈性調整，提升整體照明使用的效率與舒適感，其應用情境如圖 9 所示。



圖 8 視覺舒適度判斷流程圖

結論

本研究整合 IoT 感測器網路與深度學習影像辨識，提出一套自動化循環監測系統，應用於室內環境舒適度的監測與調控。系統設計涵蓋熱舒適度、空氣品質與視覺舒適度三個面向，透過即時資料擷取與視覺化處理，使環境變化清楚呈現、便於判斷。在熱舒適度部分，應用 PMV/PPD 模型結合熱區圖分析，提供空間調整依據；空氣品質方面，系統結合感測與運算結果，自動提示換氣建議，並透過燈號與介面引導實體操作；視覺舒適度控制則依不同情境快速切換燈光設定，並支援人工介入調整，以符合照明需求與相關標準。整體系統具備即時感知、分析與互動控制能力，可有效協助室內環境管理，並兼顧舒適度與能源使用效率。

參考文獻

- Jia, L.R., Han, J., Chen, X., Li, Q.Y., Lee, C.C., and Fung, Y. H., "Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: a comprehensive review," *Buildings*, 11(12), 591 (2021).
- Parmaksiz, K., Yesilnacar, M. I., and Karabulut, A. I., "Assessing thermal comfort and indoor air quality in an educational facility of a semi-arid climate zone," *Atmosphere*, 16(1), 29 (2024).
- Nyembwe, J.P.K.B., Takizala, J.F.M., Kalonji Muangala, S., Kayembe Nyembwe, O., Ogundiran, J.O., and Gameiro da Silva, M., "Assessment of indoor air quality in primary school classrooms: a case study



(a) 視覺舒適度 UI



(b) 系統模擬照明



(c) 真實空間照明

圖 9 視覺舒適度循環示例

in Mbuji Mayi and Lubumbashi, Democratic Republic of Congo," *Buildings*, 15, 730 (2025).

- Budhiyanto, A., and Chiou, Y.S., "Visual comfort and energy savings in classrooms using surveillance camera-derived HDR images for lighting and daylighting control system," *Journal of Building Engineering*, 86, 108841 (2024).
- Fanger, P. O., *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen (1970).
- Faubel, C., Martinez-Molina, A., and Suk, J.Y., "Calculation of CO₂ generation and required fresh air rates in a high-intensity physical athletic facility," *Journal of Building Engineering*, 82, 108289 (2024).
- CEN, "EN 12464-1: Lighting of work places – Part 1: Indoor work places," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium (2002). 