

整合擴增實境 AR 及 CFD 以建構風 洞實驗室流場可視化技術研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

整合擴增實境 AR 及 CFD 以建構風洞實驗室流場可視化技術研究

受委託者：國立臺灣科技大學

計畫主持人：黎益肇

協同主持人：賴祐吉

研究助理：藍仁謙

研究助理：謝宜杭

研究期程：中華民國 109 年 1 月至 109 年 12 月

研究經費：新台幣 130 萬元整

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

圖次.....	III
表次.....	VII
摘 要.....	IX
ABSTRACT	XV
第一章 緒 論	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 研究目的.....	4
第三節 研究內容與方法.....	5
第二章 理論背景分析	8
第一節 計算流體力學.....	8
第二節 大氣邊界層	11
第三節 擴增實境技術.....	15
第四節 文獻回顧.....	16
第三章 研究方法	20
第一節 風洞試驗.....	22
第二節 CFD 模擬	26
第三節 實體模型建立.....	30
第四節 相機追蹤技術.....	35
第五節 流場可視化工具.....	37
第四章 結果與討論	44
第一節 風洞實驗結果.....	44
第二節 CFD 模擬驗證.....	56
第三節 AR 可視化技術建立	63
第五章 結論與建議	78
第一節 結論.....	78

第三節 建議.....	79
附錄一 採購評選會議意見回應	82
附錄二 第一次專家座談會意見與回應	86
附錄三 期中審查會意見與回應	91
附錄三 期末審查會意見與回應	95
附錄五 軟體安裝及操作手冊	99
參考文獻	107

圖次

圖 1-1 風洞實驗室流場可視化方法	2
圖 1-2 AR 整合氣象報導	3
圖 1-3 研究流程	6
圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖	12
圖 2-2 移動裝置使用擴增實境的情景	16
圖 3-1 系統運作流程圖	21
圖 3-2 建研所循環式大氣邊界層風洞性能	23
圖 3-3 多頻道電子式壓力掃描器	25
圖 3-4 簡易測試模型	31
圖 3-5 高寬比 6 之高層建築模型	32
圖 3-6 台北大巨蛋實體模型	33
圖 3-7 台北大巨蛋數值模型	33
圖 3-8 信義區 101 大樓周圍之模擬區域範圍	34
圖 3-9 信義區 101 大樓周圍之區域模型	35
圖 3-10 信義區 101 大樓周圍之區域 3D 模型	35
圖 3-11 建築模型及黏貼於其上之標記	36
圖 3-12 二維標記與彩色型隱密 QRCode	37
圖 3-13 根據鏡頭距離所載入的資料精細程度示意圖	39
圖 3-14 實際在三維空間的區塊大小	39
圖 3-15 流線可視化示意圖	41
圖 3-16 質點追蹤可視化示意圖	41
圖 3-17 渦度等值面可視化示意圖	43
圖 3-18 Q 準則等值面可視化示意圖	43
圖 4-1 高寬比 6 方型高層建築風洞實驗配置	44
圖 4-2 高寬比 6 方型高層建築模型表面壓力孔配置	45
圖 4-3 高寬比 6 方型高層建築實驗示意圖	45
圖 4-4 風洞實驗室風速分布特性	46
圖 4-5 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=0^\circ$)	47
圖 4-6 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=0^\circ$)	48
圖 4-7 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=10^\circ$)	48
圖 4-8 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=10^\circ$)	49

圖 4-9 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=20^\circ$).....	49
圖 4-10 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=20^\circ$).....	50
圖 4-11 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=30^\circ$).....	50
圖 4-12 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=30^\circ$).....	51
圖 4-13 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=40^\circ$).....	51
圖 4-14 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=40^\circ$).....	52
圖 4-15 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=50^\circ$).....	52
圖 4-16 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=50^\circ$).....	53
圖 4-17 高層建築風力作用示意圖($\theta=0^\circ$).....	54
圖 4-18 平均風力係數比較圖	55
圖 4-19 擾動風力係數比較圖	55
圖 4-20 計算網格圖	56
圖 4-21 紊流產生法於入流面之渦度比較圖($x/H=-3$).....	57
圖 4-22 紊流產生法於建築中心切面之渦度比較圖($y/D=0$).....	58
圖 4-23 紊流產生法建築表面壓力比較圖($z=2/3H$).....	59
圖 4-24 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{Mx}).....	61
圖 4-25 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{My}).....	62
圖 4-26 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{Mz}).....	62
圖 4-27 以 VTK 做建築表面壓力 AR 可視化.....	64
圖 4-28 以 VTK 做切面壓力等值圖之 AR 可視化.....	64
圖 4-29 以 VTK 做建築物周圍之流線 AR 可視化.....	65
圖 4-30 以 VTK 做建築周圍速度向量 AR 可視化.....	65
圖 4-31 以 FLTK 繪製建築壓力表面及其 GUI.....	66
圖 4-32 流線之功能選單示意圖	67
圖 4-33 流線之功能對應參數示意圖	67
圖 4-34 建築表面壓力與切面風速 AR 可視化結果	68
圖 4-35 流線 AR 可視化結果.....	69
圖 4-36 渦度等值面可視化結果	70
圖 4-37 前處理運作流程	71
圖 4-38 伺服端運作流程	71
圖 4-39 AR 校正流程.....	72
圖 4-40 客戶端運作流程	72
圖 4-41 系統運作示意圖	73

圖 4-42 前處理程式介面	74
圖 4-43 伺服端介面	74
圖 a5-1 相機校正程式	100
圖 a5-2 程式介面	101
圖 a5-3 伺服端程式介面	103
圖 a5-4 流線之功能選單示意圖	104
圖 a5-6 切換模型設定示意圖	105

表次

表 2-1 大氣邊界層之 α 、 δ 及 Z_0 建議值	15
表 4-1 紊流產生法之風力係數表比較表	60
表 4-2 資料庫大小比較	74
表 4-3 測試設備規格	75

摘要

關鍵詞：風洞實驗、計算流體力學、流場可視化、擴增實境

一、研究緣起

風工程是一個多面向、跨領域與日常生活息息相關的應用學門，其涵蓋大氣邊界層特性、紊流特性、鈍體空氣動力學等。我國位於全球的強震與強風區，當建築物高度高達一定程度後，風力的影響就不容忽視。此外，低層建築物受風荷載特性與人民生命財產安全關係密切，部分結構如工廠廠房、大型棚架結構、體育館等氣動力特性與高層建築存在相當程度的差異性，受風振動反應亦不可忽視。另在宜居的城市空間環境的創建領域已逐漸成為當今建築和都市規劃學門的主題，對諸如城市風環境等微氣候的研究也已經成為學術界關注的重要課題。作為城市微氣候的重要因素，城市自然通風在空氣污染物的擴散，消除熱島效應，感知開放空間的熱/風舒適度扮演重要角色，故目前在城市規劃和建築設計中應對氣候變化尤為迫切。

前述相關風工程議題可透過風洞實驗、計算流體力學(CFD)模擬來呈現或分析結果，並進行定性或定量討論分析。在 21 世紀之前，以物理模擬探討風工程相關問題，大多透過風洞實驗來進行有效率的研究。近十年來因電腦效能快速發展，平行化演算由電腦叢集(cluster)邁向圖形顯示單元(GPU)的加速，使得 CFD 進行風工程研究分析的目標逐漸趨於可實現。在風洞實驗中，由於受限於儀器性能與流體特性，進行流場可視化的技術門檻相當高。在高雷諾數狀況下，空氣在大氣邊界層以及建築周遭形成之渦流交互作用產生高頻運動特性，很難進行有效的視覺化觀測。相對於風洞實驗，CFD 能獲得完整的資料，透過 CFD 專家在後處理中呈現可視化結果並進行探討。

近年隨著移動設備以及穿戴式裝置發達，加速了擴增實境 (Augmented Reality, AR) 與虛擬實境 (Virtual Reality, VR) 的多方面應用，除了遊戲層面、乃至於工程應用與教學等領域，使得人們在理解或

觀察物理現象或工程問題時，有一個更直觀且簡便的工具。整合多重物理資訊至 AR 平台，在相機追蹤實體物件技術上，仍有部分難題需要克服。

本研究利用 CFD 模擬建置之建築風場資訊，透過 AR 軟體整合至實體建築模型，據以呈現平均及瞬時風場的可視化結果，讓使用者可以在風洞實驗室中即時觀測流場及建築表面風壓。對於實驗室業務推廣以及研究成果展現將有極大的助益，透過互動式學習亦可深化國內建築風工程科普教育。

二、研究方法及過程

本研究針對本所風洞實驗室開發 AR 流場可視化 APP，設計建立對應之 AR 模型。透過 AR 軟體整合至實體建築模型，據以呈現瞬時風場的可視化結果，讓使用者可以在風洞實驗室中即時觀測流場及建築表面風壓。主要工作項目為資料收集與理論整理，接下來分為 4 個分支進行工作，包含風場資料庫建置、伺服器軟體開發、用戶端軟體開發、數值模式驗證，說明如後：

一、風場資料庫建置

- (1) 實體與虛擬模型製作；
- (2) 數值模擬。

二、伺服器軟體開發

- (1) 數據資料傳輸介面整合；
- (2) 伺服器後處理影像技術開發；
- (3) 影像資料傳輸數據整合；
- (4) 影像資料傳輸整合優化。

三、客戶端軟體開發

- (1) 模型定位技術開發；
- (2) 客戶端選單介面開發；

四、數值模式驗證

- (1) 風洞實驗風壓量測；
- (2) 暫態大氣邊界層入流產生法研析；
- (3) 針對風洞試驗及數值模擬結果，交叉比對各項量測與模擬數據。

最後整合工作有工具整合和操作手冊撰寫、期末報告、成果報告等。
執行期間另舉辦 2 次專家諮詢座談會，以徵詢學者專家對本案之建議。

三、重要發現

本研究之重要發現與完成工作如下：

- (1) 在 AR 可視化技術建構部分，客戶端鏡頭追蹤採用標記式追蹤方法進行模型定位，並成功套用至不同型態之建築模型，並可對應至不同平台之客戶端設備。
- (2) 測試 VTK 可視化工具組後發現，雖其提供許多可視化工具，但並非全然符合本計畫所規劃之可視化選項，且系統龐大，可能會造成後續製作之移動設備 APP 過於龐大的問題。加上流線定位上有技術問題需要克服，故本系統採用 FLTK+OpenGL 之 AR 可視化解決方案，朝向客製化方式將 APP 做精簡處理。
- (3) 在 CFD 模擬驗證方面，本研究針對高寬比 6 之高層建築風壓實驗資料進行比對。在以 LES model 為紊流模式的暫態模擬中，採用合適的紊流來流，方可模擬出合於風洞實驗的風力、風壓結果。否則在預估設計風力上，可能會發生低估的狀況。
- (4) 在流場資料庫匯入部分，為因應不同 CFD 軟體所產出之資料，伺服器資料讀入格式主要以 ASCII 純文字檔作為輸入格式，輸入資訊主要為空間資料(x、y、z)、速度資料(u、v、w)以及壓力(p)，不需做特定排列順序。
- (5) 為因應龐大的流場資料無法全部存放於記憶體中的問題，採用了 Octree 的結構進行資料串流。其具有同時兼顧切割空間，及快速定

位鄰近點的功用。在運行時可透過鏡頭可見之範圍及距離，來決定動態透過硬碟或網路傳輸呈現所需之精細程度的資料，也同時節省了查找整筆資料造成運作過於緩慢的困擾。解決圖像傳輸資料過大的問題，提供使用者良好的體驗。

- (6) 為提供使用者簡易的顯示結果切換功能與細節調整，在畫面中即時渲染出疊加在鏡頭所照到真實建築模型上的壓力、流線、等值面等資料，採用對應之函數模組，呈現良好的即時動態效果。

四、主要建議事項

建議一

立即可行建議：應用 AR 可視化系統提升風洞實驗室技術以及服務

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣科技大學台灣建築科技中心、社團法人中華民國風工程學會

本計畫完成後，除移交 3 組 AR 模型以及對應之風場資料庫外，後續本團隊可透過教育訓練，協助本所實驗室同仁完成自行建構 AR 可視化模型。包含實體模型建立、數位模型建立、CFD 模擬資料庫建立以及匯入，乃至於伺服器與移動設備端的連線配對等完整流程。除有利於本所風洞實驗室之技術層面提升外，亦可提供相關服務，增加檢測案之誘因。

此外，對於國內風工程之推廣教育，提供一良好之工具以及平台。讓使用者透過本程式系統，建立各類 3D AR 模型。建議可針對建築業界、大專院校或教育相關產業進行推廣，讓建築風工程教育除觸及更廣，並向下扎根，採用更具親和力且友善的教具，協助教育或建築從業人員說明風害現象，讓風工程知識更普及以提高國人對風災的重視。

建議二

中長期建議：AR 可視化技術精進

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣科技大學台灣建築科技中心、台灣科技大學資訊工程學系

本年度計畫先以標記式追蹤方法進行 AR 模型定位，完善整體 AR 可視化之技術面問題。但對於實體模型本身，二維條碼標記的存在具有其突兀感。建議未來採用色彩標記式追蹤進行開發，或是可以針對模型的特定記號進行追蹤，以自然的方式整合實體模型定位。

將本年度開發之 AR 可視化技術做延伸，套用至實體建築之 AR 可視化技術，並開發建築特徵標記追蹤技術。除了建築外流場之外，亦可建立實體建築室內通風 AR 可視化技術，將其納入建築資訊模型的一環，以強化視覺化之技術。

Abstract

Keywords: wind tunnel experiment, CFD, flow visualization, augmented reality

I. Background

Wind engineering is a multi-faceted, cross-domain and applied science that is closely related to daily life. It covers atmospheric boundary layer characteristics, turbulence characteristics, and bluff body aerodynamics. Taiwan is located in a strong earthquake and strong wind area in the world. When the height of the building reaches a certain level, the influence of wind cannot be ignored. In addition, the characteristics of low-rise buildings subjected to wind loads are closely related to the safety of people's lives and properties. Some structures such as factory buildings, large-span structures, gymnasiums, their aerodynamic characteristics are quite different from those of high-rise buildings, and the responses of wind induced vibration are important. Today, the creation of a livable urban space environment has gradually become the subject of architecture and urban planning, and the study of microclimates such as urban wind environment has also become an important topic of academic concern. As an important factor of urban microclimate, urban natural ventilation plays an important role in the diffusion of air pollutants, eliminating the heat island effect, and perceiving the warm/wind comfort of open spaces. Therefore, it is particularly urgent to deal with climate change in urban planning and architectural design.

The aforementioned related wind engineering issues can be presented or analyzed through wind tunnel experiments and CFD simulations, and discussed and analyzed qualitatively or quantitatively. Before the 21st century, physical simulations were used to discuss wind engineering-related

issues, and most of them were efficiently studied through wind tunnel experiments. In the past ten years, due to the rapid development of computer performance, parallel calculations have been accelerated from clusters of computers to GPU, making the goal of computational wind engineering research and analysis gradually achievable. In the wind tunnel experiment, due to the limitation of instrument performance and fluid characteristic, the technical threshold for visualizing the flow field is quite high. Under the condition of high Reynolds number, the interaction of vortices formed in the atmospheric boundary layer and surrounding buildings produces high-frequency motion characteristics, which make it difficult to make the effective visual observation. Compared with wind tunnel experiments, CFD can obtain comprehensive data, which can be visualized and discussed in post-processing by the CFD experts.

In recent years, with the development of mobile devices and wearable devices, the applications of augmented reality(AR) and virtual reality (VR) have been accelerated, except for the game level, and even engineering applications and teaching fields. So that people have more intuitive and convenient tools to understand or observe physical phenomena or engineering problems. While integrating multiple physical information into the AR platform, there are still some problems to be overcome in the technology of camera tracking the physical objects.

This study uses CFD simulation to build the building wind field information and integrates it into the physical building model through AR software to present the average and instantaneous flow field visualization results, which allows users to observe the real-time flow field and building surface pressure in the wind tunnel. It will be of great help to the promotion of laboratory business and the display of research results. The interactive learning can also deepen domestic construction wind engineering science

education.

II. Research methods and processes

This research is aimed at the development of an AR flow field visualization APP for ABRI wind tunnel laboratory, and the design and establishment of the corresponding AR model. The AR software is integrated into the physical building model to present the visual results of the instantaneous wind field, allowing users to observe the flow field and surface pressure on the building in real-time in the wind tunnel laboratory. The main work items are data collection and theoretical collation. The work is divided into 4 branches, which are described as follows:

1. Build up the wind field database;
2. Develop the server software;
3. Develop the client software;
4. Numerical model verification.

III. Conclusions

The important findings and completed work of this research are as follows:

1. In terms of the construction of AR visualization technology, first, we establish a single building AR model for the demonstration. That is convenient to move and use the mark tracking method to locate the model, and it is applied successfully to different types of building models.
2. After testing the VTK visualization toolset, it was found that although it provides many visualization tools, they do not fully comply with the visualization options planned in this project, and the system is huge, which may cause the problem of mobile device storage wast. In addition,

there are technical problems in the streamline positioning that need to be overcome, so this system will use FLTK+OpenGL's AR visualization solution to simplify the software in a customized way.

3. In terms of CFD simulation verification, this study compares the surface pressure data of high-rise buildings with an aspect ratio of 6. In the transient simulation using the LES model as the turbulent flow mode, the appropriate turbulent flow can obtain the wind loads and surface pressure results which close to the wind tunnel experiment results. Otherwise, underestimation may occur in the estimated design wind load.
4. In the flow field database import part, For adapting the data produced by different CFD software, the server data import format is mainly ASCII file as the input format, and the input information is mainly spatial data (x, y, z), velocity data (u, v, w) and pressure data (p). It is not necessary to be arranged in a specific order.
5. To solve with the problem that the huge flow field data cannot be stored in the memory, the Octree structure is used for data streaming. It has the function of taking into account the cutting space at the same time and quickly positioning the adjacent points. During operation, the visible range and distance of the lens can be used to determine the precise level of data required for dynamic presentation through the hard disk or network transmission. Meanwhile, it saves the trouble of finding the entire data and causing the operation to be too slow. That solves the problem of excessive image transmission data and provide users with a good experience.
6. This project completes the complete software executable file, source code, environmental installation program, etc., as well as relevant documents such as system test report, information security test report, and manager's

operation manual to the organizer.

IV. Recommendations

For immediate strategies:

After the completion of this project, in addition to the transfer of 3 sets of AR models and the corresponding flow field databases, our team can assist ABRI's laboratory colleagues to build their own AR visualization models through education and training. Including physical model creation, digital model creation, CFD simulation database creation and import, and even the server and mobile device connection pairing and other complete processes. In addition to improving the technical level of our wind tunnel laboratory, it can also provide related services to increase the number of testing projects.

Besides, for the promotion and education of domestic wind engineering, the developed system provides a good tool and platform that allow users to create various 3D AR models through this program system. The suggestion is to promote this system to the construction industry, colleges and universities or education-related industries, so that the construction wind engineering education can not only reach wider, and take root down, use more friendly teaching aids that help education or construction practitioners to explain wind damage phenomena. Let the knowledge of wind engineering become more popular in order to increase people's attention to wind disasters.

For mid-term strategies:

The project of this year uses the marker tracking method to locate the AR model to improve the technical aspects of the overall AR visualization. But for the physical model itself, the existence of the barcode mark has its abrupt sense. It is recommended to use color mark tracking for development

in the future or to track specific marks of the model, and integrate the physical model positioning in a natural way.

We can extend the AR visualization technology developed this year, further apply it to the AR visualization technology of physical buildings, and develop building feature mark tracking technology. In addition to the flow field outside the building, AR visualization technology for indoor ventilation in physical buildings can also be established and incorporated into the building information model to strengthen the visualization technology.

第一章 緒 論

第一節 研究動機

風工程是一個多面向、跨領域與日常生活息息相關的應用學門，其涵蓋大氣邊界層特性、紊流特性、鈍體空氣動力學等。我國位於全球的強震與強風區，當建築物高度高達一定程度後，風力的影響就不容忽視。此外，低層建築物受風荷載特性與人民生命財產安全關係密切，部分結構如工廠廠房、大型棚架結構、體育館等氣動力特性與高層建築存在相當程度的差異性，受風振動反應亦不可忽視[1,2]。

宜居的城市空間環境的創建已逐漸成為當今建築和都市規劃學門的主題，對諸如城市風環境等微氣候的研究也已經成為學術界關注的重要課題。作為城市微氣候的重要因素，城市自然通風在空氣污染物的擴散，消除熱島效應，感知開放空間的熱/風舒適度扮演重要角色，故目前在城市規劃和建築設計中應對氣候變化尤為迫切。

前述相關風工程議題可透過風洞實驗、計算流體力學(CFD)模擬來呈現或分析結果，並進行定性或定量討論分析。在 21 世紀之前，以物理模擬探討風工程相關問題，大多透過風洞實驗來進行有效率的研究。

傳統在風洞實驗中進行流場可視化主要分為 2 大型式，首先為壁體表面軌跡法、指標法(絲線法)、化學反應軌跡法(如圖 1-1)，在固體表面塗上油墨、絲線或化學物質，藉以反映出面上時間平均之流體軌跡。其次為注入軌跡法搭配雷射光頁，觀測特定切面上之流場變化。在壓力可視化上，目前雖有壓力感測紙或感測片可貼在模型表面以色層方式顯示壓力變化，但目前無法呈現負壓(吸力)為其主要缺憾。綜合來說，在風洞實驗室中進行流場觀測，除設備成本高外，同時僅能觀測片面資訊。另需要有一定的技術門檻，方能有效觀測部分區域之流場或壓力特性。

相對於風洞實驗，CFD 模擬能提供完整、逐時之空間中各項物理資訊。近十年來因電腦效能快速發展，平行化演算由電腦叢集(cluster)邁向圖形顯示單元(GPU)的加速，使得 CFD 進行風工程研究分析的目標逐漸趨於可實現。在風洞實驗中，由於受限於儀器性能與流體特性，

進行流場可視化的技術門檻相當高。在高雷諾數狀況下，空氣在大氣邊界層以及建築周遭形成之渦流交互作用產生高頻運動特性，很難進行有效的視覺化觀測。相對於風洞實驗，CFD 能獲得完整的資料，透過 CFD 專家在後處理中呈現可視化結果並進行探討。以現有之計算機能量，搭配高速運算電腦之多核心運算，已能負荷如大渦模擬(Large Eddy Simulation)等較高可信度之瞬態(transient)計算。

(a) 壁體表面軌跡法



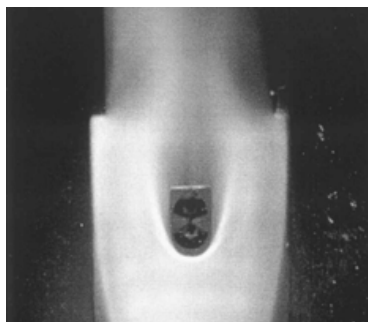
(b) 絲線法



(c) 化學物質反應法



(d) 電控制軌跡法



(e) 注入軌跡法



(f) 雷射光頁



圖 1-1 風洞實驗室流場可視化方法

資料來源：劉文欽[3]

以往在觀測 CFD 流場或建築表面壓力結果時，多在後處理軟體 (post-processing) 中分析，或製作成動畫後提供外界檢視。擴增實境 (Augmented Reality, 簡稱 AR) 代表透過手機等介面，把「虛擬的物品」與「真實的場景」結合起來，「真實+虛擬」也就是 AR (擴增實境)。虛實整合技術常應用於遊戲，讓玩家在實體環境中結合遊戲場景做互動。也有部分商家如 IKEA 透過 AR 方式，利用手機 APP 將其傢俱商品展示於用戶家中，以低廉成本提供用戶沉浸式體驗，提高購買意願。新聞台也透過 AR 整合氣象報導(圖 1-2)，將無趣的氣象報導在視覺化效果的加強下，強化閱聽人的視覺感受，體認大自然災害的威力。



圖 1-2 AR 整合氣象報導

資 料 來 源 :

<https://digitalsynopsis.com/design/the-weather-channel-hurricane-florence-augmented-reality/>

近年隨著移動設備以及穿戴式裝置發達，加速了擴增實境 (Augmented Reality, AR) 與虛擬實境 (Virtual Reality, VR) 的多方面應用，除了遊戲層面、乃至於工程應用與教學等領域，使得人們在理解或觀察物理現象或工程問題時，有一個更直觀且簡便的工具。整合多重物理資訊至 AR 平台，在相機追蹤實體物件技術上，仍有部分難題需要克

服。

就目前國內外發展現況來看，此類 AR 應用有以下問題亟待克服。首先在建構之初需要使用者採用人工方式，並且複雜地將模擬資料投射到 3D 模型空間中，十分耗費人力，需要發展快速應用模式。另在進行即時流場視覺化時，必須要有效追蹤相機之位置，用以導入適當流場資料，但在過去模型上缺乏有效之追蹤機制。此外，長時間且大範圍的流場資訊，由於資料量龐大，無法完整存在展示平台中，需要設計有效即時快速機制以達到動態展示之目的。

本研究擬利用 CFD 模擬建置之建築風場資訊，透過 AR 軟體整合至實體建築模型，據以呈現瞬時風場的可視化結果，讓使用者可以在風洞實驗室中即時觀測流場及建築表面風壓。對於實驗室業務推廣以及研究成果展現將有極大的助益，透過互動式學習亦可深化國內建築風工程科普教育。

第二節 研究目的

本研究擬針對本所風洞實驗室開發 AR 流場可視化 APP，設計建立對應之 AR 模型。透過 AR 軟體整合至實體建築模型，據以呈現瞬時風場的可視化結果，讓移動設備使用者可以在風洞實驗室中即時觀測流場及建築表面風壓。其研究主要目的如後：

- (1)建立 3 種 AR 專用之建築模型，規劃高寬比 6 之典型高層建築、大跨度屋蓋建築以及國內代表性之建築群等 3 種。
- (2)針對 3 組建築模型進行 CFD 模擬，據以建置風場資料庫以匯入伺服器進行影像處理，並建立對應之數據影像轉換程式。
- (3)建立移動設備相機鏡頭追蹤定位實體 3D 模型技術，將可視化圖像資訊投射到實體模型。
- (4)建立基於大渦模擬之暫態 CFD 模擬指南。
- (5)建立後處理資訊，如切面速度等值圖、壓力等值圖、流線、質點軌

跡、渦度等值面等。

- (6) 利用 OpenGL 圖形引擎結合後處理資訊，撰寫整合平台至建築模型之應用程式，讓使用者能在移動設備上觀察流場。
- (7) 提升伺服器影像傳輸技術，提供使用者良好的 AR 可視化體驗。

第三節 研究內容與方法

本計畫研究步驟流程參見圖 1-3。主要工作項目為資料收集與理論整析，接下來分為 3 個分支進行工作，包含風場資料庫建置、伺服器軟體開發、用戶端軟體開發，說明如後：

一、風場資料庫建置

- (1) 實體與虛擬模型製作；
- (2) 數值模擬。

二、伺服器軟體開發

- (1) 數據資料傳輸介面整合；
- (2) 伺服器後處理影像技術開發；
- (3) 影像資料傳輸數據整合；
- (4) 影像資料傳輸整合優化。

三、客戶端軟體開發

- (1) 模型定位技術開發；
- (2) 客戶端選單介面開發；

四、數值模式驗證

- (1) 風洞實驗風壓量測；
- (2) 暫態大氣邊界層入流產生法研析；
- (3) 針對風洞試驗及數值模擬結果，交叉比對各項量測與模擬數據。

最後整合工作有工具整合和操作手冊撰寫、期末報告、成果報告等。
執行期間另舉辦 2 次專家諮詢座談會，以徵詢學者專家對本案之建議。

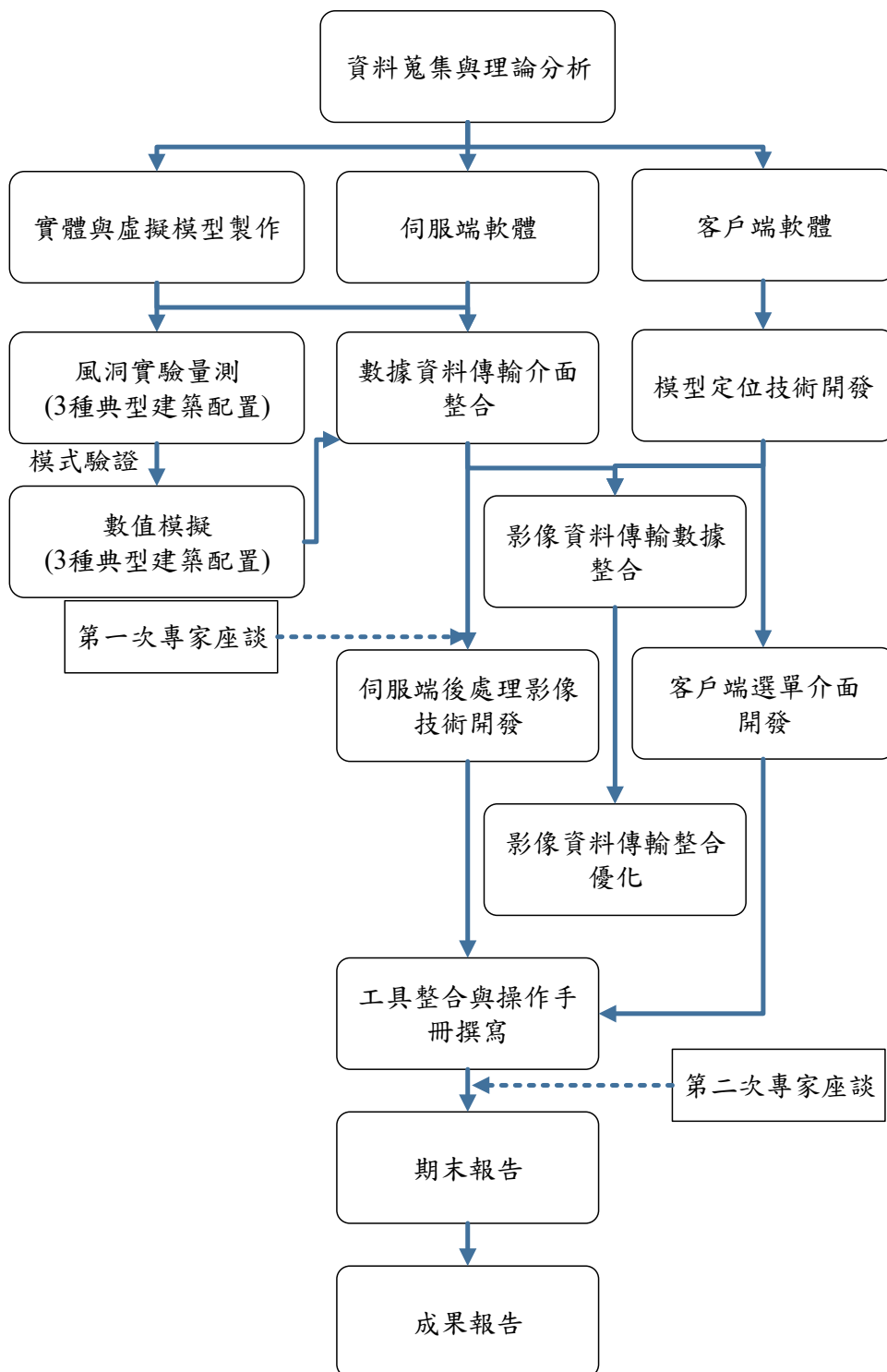


圖 1-3 研究流程

資料來源：本研究整理

第二章 理論背景分析

第一節 計算流體力學

在電腦尚未被廣泛應用前，數學解析的方法常與實驗方法並列為研究方法的兩大主流。對一個流場問題而言，其求解係以一個足以正確描述流場變數（流速、壓力、溫度、濃度等）對時間與空間變化的微分方程式（亦稱控制方程式；governing equations）為基礎，配合以適當的起始與邊界條件（initial/boundary condition）後，應用數學工具推衍出相應之流場數學解（mathematical solution）。然而，一個動力問題相應的控制微分方程式往往是非線性（non-linear）的，對此類問題數學解之尋求並非易事。更何況在實際問題中，隨著流場區域邊界幾何或動力條件複雜程度之增加，欲獲取一個精確的流場結果往往有頗高的難度。因此，在古典的解析方法中，常將區域邊界予以簡化以利求解，甚至沿用簡化但對真實流況描述能力較差之控制方程式以獲得流場的結果。在採取此雙重簡化的情況下，雖然達成了問題解析的目的，但是結果的真實度卻可能大打折扣。

隨著近年來電子計算機軟、硬體方面的快速進步，以往在數學解析方面可能遭遇的各種困難，在運用數值解析（numerical analysis）的方法後，多已迎刃而解（此即所謂 CFD 的方法）。值得一提的是，在古典數學解析的方法中，流場結果是以時間與空間函數的數學形式表示出來，其在時空方面之變化均具有連續性；而在數值解析方法中，則為離散化（discretized）數值形態時空分佈的流場結果。

一、紊流模型

在實際的情況中，絕大多數之氣流流動均為紊流之形態。由於紊流中有渦漩（eddy）之存在而具有高度之散漫特性，故較難以掌握。因此在涉及紊流的計算中，都要對紊流模型的類比能力以及計算所需系統資源進行綜合考慮後，再選擇合適的紊流模型進行類比。常見的紊流模型

包括、standard $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、RSM (Reynolds Stress Model, 雷諾應力模型) 模型和大渦模擬(LES) 等方法, 以下針對適用 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)的紊流模型以及 LES model 做簡單的介紹:

(1) standard $k-\varepsilon$ model

標準 $k-\varepsilon$ 模型由 Launder 和 Spalding 提出, 模型本身具有的穩定性、經濟性和比較高的計算精度使之成為紊流模型中應用範圍最廣、也最為人熟知的一個模型。標準 $k-\varepsilon$ 模型通過求解紊流動能 (k) 方程和紊流消散率 (ε) 方程, 得到 k 和 ε 的解, 然後再用 k 和 ε 的值計算紊流粘度, 最終通過 Boussinesq 假設得到雷諾應力的解。雖然得到了最廣泛的使用, 但因為標準 $k-\varepsilon$ 模型假定紊流為同向性(isotropic)的均勻紊流, 所以在旋流 (swirl flow) 等非均勻紊流問題的計算中存在較大誤差。

(2) RNG $k-\varepsilon$ model

RNG $k-\varepsilon$ 模型在形式上類似於標準 $k-\varepsilon$ 模型, 但是在計算功能上強於標準 $k-\varepsilon$ 模型, 其改進措施主要有: ①在 ε 方程中增加了一個附加項, 使得在計算速度梯度較大的流場時精度更高; ②模型中考慮了旋轉效應, 因此對強旋轉流動計算精度也得到提升; ③模型中包含了計算紊流 Prandtl 數的解析公式, 而不像標準 $k-\varepsilon$ 模型僅用使用者定義的常數。④標準 $k-\varepsilon$ 模型是一個高雷諾數模型, 而 RNG $k-\varepsilon$ 模型在對近壁區進行適當處理後可以計算低雷諾數效應。

(2) realizable $k-\varepsilon$ model

本模式滿足雷諾應力的約束條件, 可以更精確地模擬平面和圓形設流的擴散速度, 旋轉流計算、具有壓降梯度的邊界層流計算和分離流計算等問題, 其計算結果更符合真實情況。可有效改善 standard $k-\varepsilon$ model 的缺點, 提升精度。

(3) $k-\omega$ model

$k-\omega$ 模型也是二方程模型。標準 $k-\omega$ 模型中包含了低雷諾數影響、可壓縮性影響和剪力流擴散，因此適用於尾跡流動計算、混合層計算、射流計算，以及受到壁面限制的流動計算和自由剪切流計算。

剪應力傳輸 $k-\omega$ 模型，簡稱 SST $k-\omega$ 模型，綜合了 $k-\omega$ 模型在近壁區計算的優點和 $k-\epsilon$ 模型在遠場計算的優點，將 $k-\omega$ 模型和標準 $k-\epsilon$ 都乘以一個混合函數後再相加就得到這個模型。在近壁區，混合函數的值等於 1，因此在近壁區等價於 $k-\omega$ 模型。

在遠離壁面的區域混合函數的值則等於 0，因此自動轉換為標準 $k-\epsilon$ 模型。與標準 $k-\omega$ 模型相比，SST $k-\omega$ 模型中增加了橫向消散導數項，同時在紊流黏度定義中考慮了紊流剪切應力的輸運過程，模型中使用的紊流常數也有所不同。這些特點使得 SST $k-\omega$ 模型的適用範圍更廣，比如可以用於具有逆壓梯度的流動計算。

(4)RSM model

雷諾應力模型中沒有採用渦粘度的同向性假設，因此從理論上說比紊流模式理論要精確得多。雷諾應力模型不採用 Boussinesq 假設，而是直接求解 RANS 方程中的雷諾應力項，同時求解耗散率方程，因此在二維問題中需要求解 5 個附加方程式，在三維問題中則需要求解 7 個附加方程式。

從理論上說，雷諾應力模型應該比一方程模型和二方程模型的計算精度更高，但實際上雷諾應力模型的精度受限於模型的封閉形式，因此雷諾應力模型在實際應用中並沒有在所有的流動問題中都體現出其優勢。

(5)LES model

大渦模擬主要概念為，直接對大尺度渦旋進行解析，而對小尺度渦旋採用紊流模型模擬。因此，就解析比例而言，大渦模擬介於直接數值模擬(direct numerical simulation, DNS)和 RANS 之間。與 DNS 中相比，僅解決大尺度渦流可以讓 LES 中使用更粗的網格和更大的時間步。但

是 LES 仍然需要比 RANS 計算的網格更精細的網格。此外，LES 必須運行足夠長的時間才能獲得所模擬對象之穩定統計數據。在記憶體 (RAM) 和 CPU 時間方面，LES 所涉及的計算成本通常比穩定 RANS 計算要高幾個量級。因此，對於 LES，特別是對於工業應用必須使用到高性能計算（如並行計算）設備。

二、壁面函數(wall function)

在受壁面限制的流動中，因為壁面附近流場變數的梯度較大，所以壁面對紊流計算的影響很大。紊流模型中假定紊流是同向性的，因此在壁面附近需要進行特殊處理。處理的一種辦法是用半經驗公式將自由流中的紊流與壁面附近的流動連接起來，這種方法被稱為壁面函數法。另一種方法是通過在壁面附近加密網格，同時調整紊流模型以包含壁面影響的方法，被稱為近壁模型(near wall model)法。

壁面函數法中又有標準壁面函數法(standard wall function)和非平衡壁面函數法(non-equilibrium wall function)。一般來說，標準壁面函數可以適用於大多數流動問題。而非平衡壁面函數法則適用於流場函數在壁面附近存在很大梯度的流動問題。

第二節 大氣邊界層

地表附近空氣的移動受到地面之起伏、建築物、林木作物分佈等的磨擦作用的影響，使得平均風速隨高度而變，形成一垂直分佈剖面，越接近地表風速愈慢(參見圖 2-1)，及此「風速剖面」直接受到地表粗糙狀況之影響，而影響所及的範圍稱之為「大氣邊界層」，在邊界層頂部之風速通常稱之為梯度風速(gradient wind)。

一般風工程之應用所涉及的問題大都發生在較強的風勢情況下，而於近地表上數百公尺高度的大氣邊界層範圍內。在強風的情況下，大氣紊流作用遠超過熱對流作用。由於紊流之強制混合趨向於形成中性層差，所以本節對大氣邊界層之討論僅限於中性層差之大氣邊界層。

大氣邊界層之厚度，在中性層差的情況下，視風之強度、地表之粗糙程度及所在之緯度而定，通常在數百公尺至數公里之間。本案之風洞模擬實驗以及數值模擬，其中很重要之一項工作即是要模擬邊界層高度內紊流流場的各項重要性質，其中包括有平均風速特性、紊流強度以及紊流積分長度尺度。

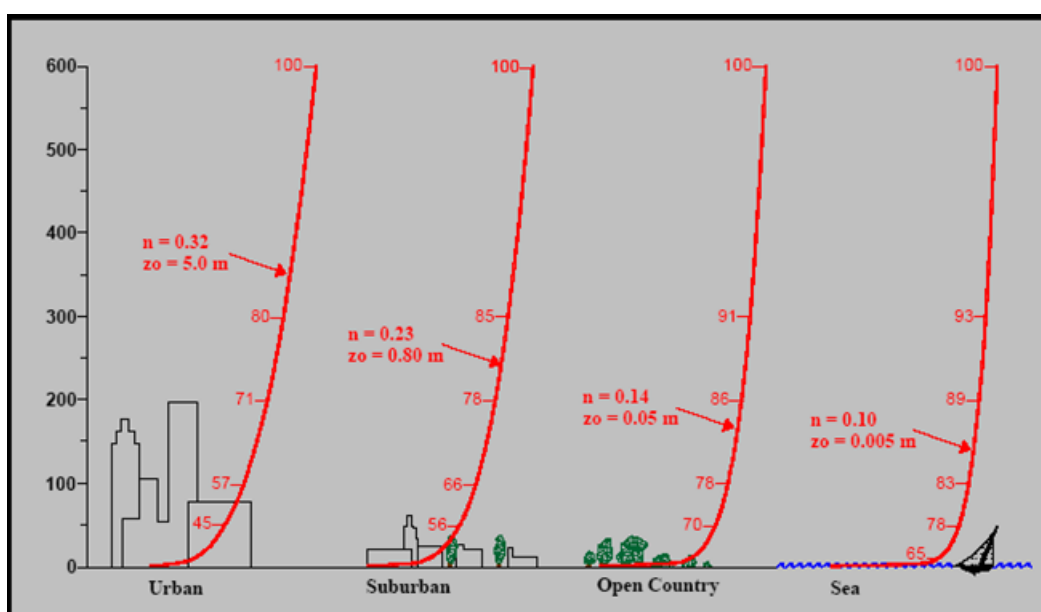


圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖

資料來源：[4]

一、平均風速剖面

一般常用於規範中的大氣邊界層風速剖面有 2 個主要定律，一為指數律(power law)，另一則為對數律(logarithmic law)。

(1) 指數律(power law)

邊界層流中水平方向均勻分佈之地形上的平均風速剖面，以指數律表示：

$$\frac{U(Z)}{U_{\delta}} = \left(\frac{Z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2-1)$$

其中， U 為縱向之平均風速； Z 為地表上之高度； U_0 為梯度風速； δ 為大氣邊界層厚度； α 為指數。在現行工程應用中之假設為：①一個 α 為定值之指數律可適用至梯度高度 δ 。②邊界層厚度 δ 僅只為指數 α 之函數。

(2) 對數律(logarithmic law)

在大氣邊界層中，愈接近地表的地方，其風速的擾動性愈高，解析描述也就愈加困難。在地表層(或稱之為常應力層)其剪應力值 τ_u 與地表面之剪應力值 τ_0 極為接近，且其橫風向之風速分量 V 極小。對邊界層橫風向之平均風速方程積分至高度，再加以整理可得：

$$Z_l = b \frac{u_*}{f} \quad (2-2)$$

其中， Z_l 為對數律之有效高度； u_* 為剪力風速 $= (\tau_0 / \rho)^{0.5}$ ； f 為科氏力參數； ρ 為空氣密度； b 為常數，其值約在 0.015 至 0.03 之間。在微氣象學研究的一些結果顯示，在地表其平均風速剖面可用下式表示：

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2-3)$$

其中， κ (≈ 0.4) 為 Von Karman 常數； z_0 為地表粗糙長度(roughness length)。公式(2-3)即為通常所稱之對數律。實場量測結果指出，在強風之情況下，對數律之適用範圍可達數百公尺之高度。有關在不同地表情況下，上述討論之大氣邊界層各參數的建議值詳見表 2-1。

二、紊流特性

紊流強度是紊流擾動流速大小的表達方式。將擾動風速之均方根值(root mean square)除以平均風速值，以百分比之方式表達出來。邊界層中某特定高度 Z 之紊流強度，其定義如下[1]：

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{u'(z)^2}}{U(z)} \quad (2-4)$$

其中， I_u 為順風向上之紊流強度； u' 為順風向上之擾動風速。而縱向擾動風速之均方根值與地表剪應力風速有下列關係：

$$\overline{u'^2} = \beta u_*^2 \quad (2-5)$$

其中， β 值通常假定與高度無關，在一般工程應用上可取為 0.6。在非常粗糙的地況下，其值最低可達 0.4。

大氣邊界層中的紊流性質除了前述的紊流強度之外，紊流長度尺度 (turbulence length scale) 以及紊流頻譜密度函數 (turbulence power spectrum density function) 和交相關頻譜 (cross-spectrum density function) 都是進行風洞模擬時不可忽略的重要特性。

風之紊流特性，基本上可視為由許多大小不同之渦漩 (eddy) 所組成。利用積分方式，求得紊流積分尺度 (integral scales)，將可視該積分值為紊流渦漩之平均特性。紊流之主流向紊流速度頻譜 (turbulent velocity spectrum) 作相關性分析，對其時間積分而得，可由下式得之：

$$T_x = \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (2-6)$$

$$R(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{u'^2}}} \quad (2-7)$$

上式中， $R(\tau)$ 為尤拉時間自相關係數 (Eulerian time autocorrelation coefficient)， $\overline{u'(t)u'(t+\tau)}$ 為兩不同時間之主流向風速擾動值自相關之時間平均值， τ 為時間延遲。其他側向與垂直向積分尺度分量，可以類似方法獲得。

表 2-1 大氣邊界層之 α 、 δ 及 Z_0 建議值

參考文獻	Coastal Area			Open Terrain			Suburban Terrain			Centers of Large City		
	α^1	δ^2	Z_0^3	α	δ	Z_0	α	δ	Z_0	α	δ	Z_0
Davenport [5]	—	—	—	0.16	275	—	0.28	400	—	0.40	520	—
ANSI	0.1	215	—	0.14	275	—	0.22	370	—	0.33	460	—
Cook, N. J	—	—	0.003 0.01	—	—	0.03 0.1	—	—	0.3	—	—	0.8
ESDU[6]	—	—	—	—	—	0.02 0.1	0.26	—	0.2 0.6	0.35	—	0.7 1.2
耐風設計 規範	—	—	—	0.15	300	—	0.25	400	—	0.36		

資料來源：本研究整理

第三節 擴增實境技術

擴增實境(Augmented Reality, AR)創造了能將電腦生成的資訊覆蓋在使用者真實所見上的環境。如 Wang [7]使用標記模擬在目標地點建造要求的建設、MacIntyre 等 [8]建立互動式網站，利用標記引導人瀏覽虛擬物件。Gee 等[9] 在地上設置標記以識別戶外景色的地點，這些方法大多有賴標記偵測與追蹤，以決定額外資訊與內容如何呈現於螢幕。

其中，根據 Li 等[10]、Zhou 等[11]所述，擴增實境技術的核心技術，也就是鏡頭追蹤方法(圖 2-2)，可區分成主要兩種模式分別為，基於陀螺儀、磁力計、加速度計的感測器追蹤(Sensor based Tracking)，以

¹ α ：邊界層風速剖面冪數律指數

² δ ：邊界層厚度，單位：公尺

³ Z_0 ：粗糙長度，單位：公尺

及基於電腦視覺及影像分析演算法的影像追蹤 (Vision based Tracking)。

感測器追蹤方式的特點主要有，現在市面上的移動設備都會內建基本感測器，可以隨時使用。缺點則是容易累積誤差，進而產生畫面滑動或失準的現象。影像追蹤方式則可細分為有/無標記追蹤 (Marker / Markerless)，有標記的方式較無標記準確及快速，但缺點則是標記通常必須是平面及黑白的樣式，比較不美觀及在不使用擴增實境時會顯得突兀。

另外，近年來國際上也正在發展整合兩種追蹤方式優點的混合式追蹤 (Hybrid Tracking)，以感測器追蹤的數值來輔助無標記追蹤計算的方式來增加準確性，但目前仍無法像標記追蹤一樣，能夠精準追蹤定位。



圖 2-2 移動裝置使用擴增實境的情景

資料來源：[11]

第四節 文獻回顧

(1)CFD 流場可視化

有關 CFD 後處理部分，常見之商用 CFD 軟體如 Ansys Fluent、Star CCM+、Phoenics、COSMOL 等均搭配自行開發的後處理系統，而基於

開放原始碼 VTK(Visualization Toolkit)[12]開發之 Paraview，則被 OpenFOAM 所採用。通用型後處理軟體如 TECPLOT、EnSigh 等，可支援多種 CFD 軟體輸出格式。透過後處理軟體，除可於電腦，另可製作成特定視角動畫以展現流場結果。

(2)結合 AR 之流場可視化

Bruno 等[13]利用 AR 技術將模擬數據和實驗的結果，疊加實際的對象上，並通過手持設備以影片的方式來觀察，讓使用者可以感受到可視化數據在實際對象上的空間感。另開發了一個名為 VTK4AR 的可視化應用程序，它因建立在 VTK 模組上，因此可採用多種可視化技術在許多不同的應用領域中，亦可以通過互動性操作實現更有效的可視化方式。而 AR 的追蹤性能也是一門重要的技術，擁有強大的追蹤性能才能提供給用戶穩定且準確的訊息，Li 等[14]討論了 AR 的可視化、追蹤技術以及移動平台上的應用，分析每種技術的優缺點以及其適用性於特定類型的應用程序。至於應用方面，Yao 等[15]透過整合現實世界的建築形態訊息和虛擬世界，可以快速地直接提供設計師訊息以供觀察和評估。

基於 AR 技術對風環境研究進行了可視化，成果大致可分為三點，(1)顯示的可視化氣流在建築物周圍可以為設計師提供快速、直接的訊息評估；(2)定量處理與風環境有關的數據，以直觀、易於理解的圖形方式呈現；(3)進一步開發可視化系統未來的環境，有助於快速評估建築設計開始時的一系列程序。Heuveline 等[16]在城市風流場模擬的案例中證實了移動 AR 技術的好處及增強現實可視化，實現了通過一種新穎的可視化方法，將城市模型數據正確地定位在真實世界的圖像中。然而應用不只適用於城市風場或是建築物的模擬，Kim 等[17]將室內空氣淨化的模擬以 OpenFOAM 計算流體動力學來執行，並通過後處理將結果轉換為適合 AR 可視化的形式，模擬出的結果可以顯示在設備上，例如智能手機，平板電腦。這種 AR 可視化功能提供用戶即時性的監控室內空氣的淨化情況。

(3)標記追蹤法

基於單眼視覺的相機追蹤對於 AR、電腦視覺(Computer Vision, CV) 以及電腦圖學(Computer Graphics, CG)都是重要的一環。此類方法輸入都是連續的單眼視覺影像，每個時間點只有一張或黑白或彩色的影像，而輸出則是相機在各時間點上的姿態。其方法基本上可以分為兩類：基於標記的方法，以及不使用標記的方法。基於標記的追蹤法需要識別特定標記，如擴增實境工具組(ARToolkit) [18]、擴增實境戳(ARTag) [19]、同心圓戳(Concentric Circles Tags, C2 Tags) [20]、容投影戳(Projective Invariant Tag, Pi-Tag) [21]，及可校方格碼(Error-correcting Grid Codes) [22] 以估算相機相對於其所屬平面的姿態。

第三章 研究方法

近年來由於電腦效能大幅提升，以數值模擬方法代替實驗，可大幅節省許多金錢與時間的付出，因此以數值模式來模擬空間中流體分布的研究成為另一種符合經濟性及實用性的選擇，而數值模擬在風工程的應用愈趨普遍。相較於風洞試驗，數值模擬可在無縮尺狀況下模擬建築周圍環境微氣候或表面壓力資料，並較經濟地獲致完整之風場資訊，對於分析探討建築鄰近區域之流場可視化有莫大的助益，惟計算域、格網解析度、紊流模式選定等相關之參數設定需要風洞試驗數據來做進一步確認。

在紊流模型部分擬採用 LES model，為目前計算機能量可實現之高可靠度紊流模型，提供可信之模擬結果以作為可視化資料來源。另同步進行風洞實驗量測，以確認模擬參數與流程，同時建立採用 LES model 進行風工程相關模擬研究的原則方法。

在 AR 與 CFD 資料整合方面，運作流程如圖 3-1，AR 可視化系統的各元件主要運作模式為：

- (1) 建立流場資訊：以 CFD 建立所需之流場資訊資料庫，並透過風洞實驗對 CFD 模擬結果進行驗證。
- (2) 伺服器主機：透過資料轉換軟體進行插分計算分配空間資訊，並傳輸移動設備所需之影像資料。
- (3) 客戶端設備：也就是移動設備如手機、平板，在安裝客戶端 APP 軟體後，利用其相機鏡頭進行模型定位追蹤，在透過選單設定後，向伺服器主機提供需求並接收對應之影像資訊。

而 AR 軟體開發主要分為以下 3 個工作階段：

- (4) 測試 AR 追蹤方法：於此計畫中的可行性及於可接受範圍內之準確度及運算效率，首先將既有標記追蹤方法之準確度當作基準，循環測試一系列追蹤方法組合於此建築案例上的效果。透過將虛擬 3D 模型和實體製作之建築模型在透過辨識後進行對應，即可將模擬之結果投影

至實體建築模型上。

- (5) 編碼優化：將 CFD 模擬所給出空間中的速度以及壓力數值進行編碼優化，在取得流場資料時先進行初始資料優化編碼及動態密度規劃，乃是在此軟體中能給予使用者良好體驗十分重要的一環。
- (6) 後處理選單開發：資料讀取完畢後，可根據使用者需求設計，以選單方式提供多種常用的流場呈現模式，如切面速度(壓力)等值圖、3D 平均流線、3D 順時流線、瞬間渦度等值面、建築表面壓力等值圖等。以上流場呈現模式除了定格檢視結果(穩態模擬)外，另有動態檢視(瞬態模擬)呈現。

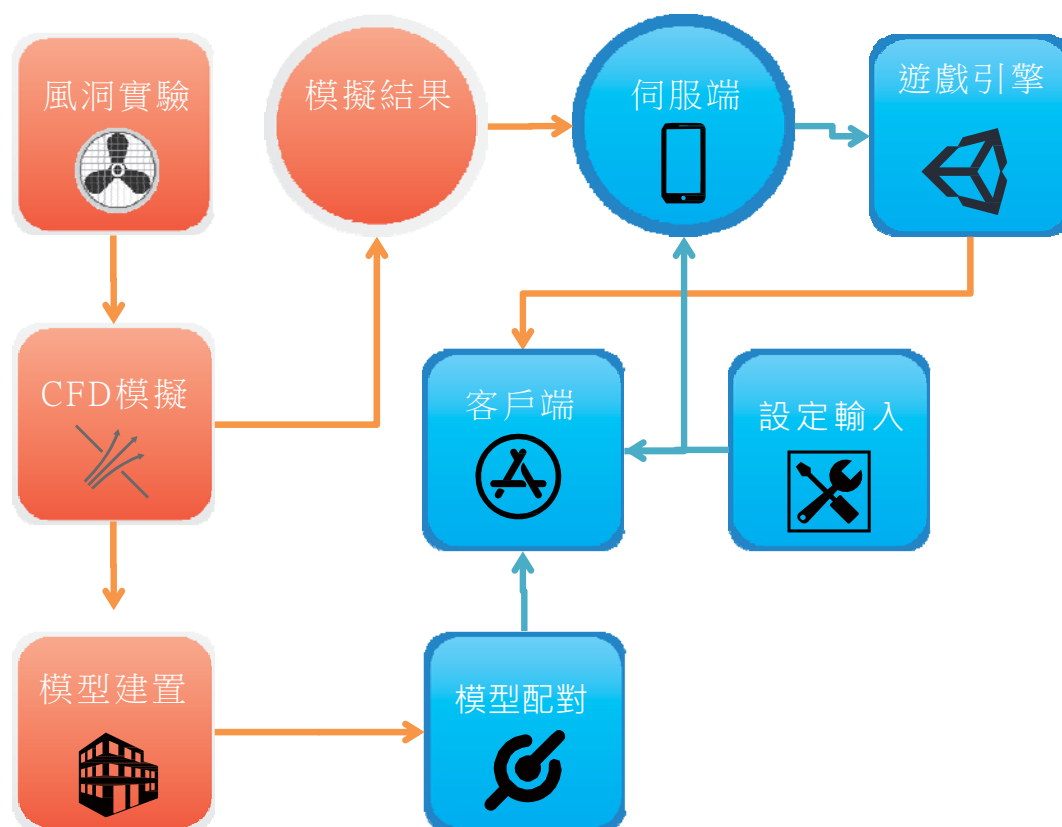


圖 3-1 系統運作流程圖

資料來源：本研究整理

第一節 風洞試驗

本研究風洞試驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行，其風洞本體為一垂直向的封閉迴路系統，總長度為 77.9m，最大寬度為 9.12m，最大高度為 15.9m，為東南亞目前最大之建築風洞實驗室。

整個風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有 2 個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1m，安置於距測試區入口處 3m 處，從事一般流體力學研究；第二座旋轉盤直徑 2.6 m，置於可移動式軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5m 或 31.5m 處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，以進行建築物受風力作用的空氣動力學研究及污染擴散試驗為主。第二測試區則配置一座旋轉盤，位於風洞本體整流段出口 15m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。

環境風場試驗於本實驗室第一測試段之第二旋轉盤進行，本測試段長 36.5 公尺、寬 4 公尺、高 2.6 公尺，最大風速為 30 公尺/秒。風洞頂部為可調式上蓋板，以維持測試段壓力梯度為零，並將阻塞比降到最低。實驗室相應性能參數與配置圖如圖 3-2 所示。

一、循環式風洞性能

(一)、風洞尺寸

測試段長度	36.5 m
測試段寬度	4 m
收縮比	4.7:1

(二)、驅動系統

總功率	500 kW
風扇型式	直接傳動軸流式風扇
風速控制	變頻器控制馬達轉速

(三)、風速

最高風速	30 m/s
------	--------

邊界層厚度 最高 200 cm
紊流強度 測試區處約 2 %

(四)、順風向壓力梯度 零梯度由可調式上蓋板調整

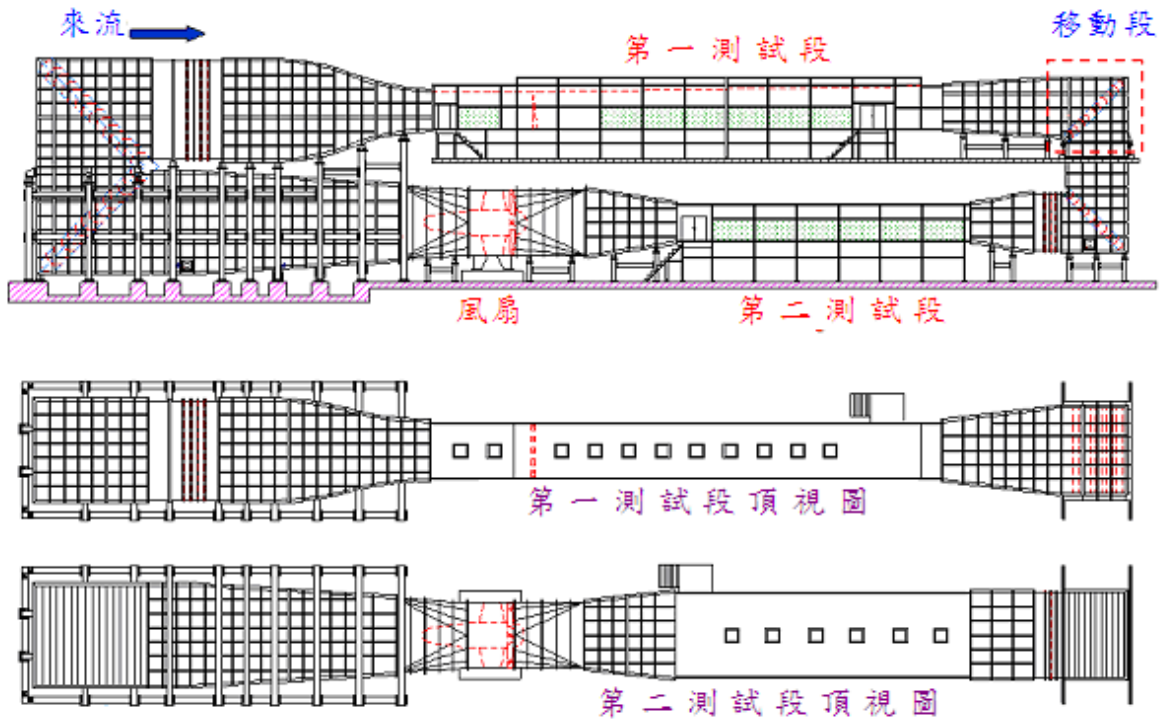


圖 3-2 建研所循環式大氣邊界層風洞性能

資料來源：本研究整理

二、風速量測設備

(a) 皮托管

本研究採用皮托管進行來流平均風速之量測，由皮托管所量測到的壓力差值，利用伯努利方程式(Bernoulli equation)，即依據後式計算出相應之風速。

(b) 熱線測速儀

來流風速剖面量測採用 Dantec 公司生產之熱線(hot-wire)測速儀進

行。所謂熱線測速儀是利用電流通過金屬導線時會使導線溫度升高，而當流體流經金屬表面時會帶走部分熱量之原理來量測流體之速度。當探針(probe)所在位置之電阻 R 值因溫度之改變而改變時，使得電橋失去平衡。本實驗室所有之恆溫式流速儀，利用補償電路(compensating circuit)，因應流速之變動，對流經探測元之電流做瞬間之改變來維持探測元之操作溫度固定不變(因而探測元之電阻亦不變)，使電橋保持平衡狀態。如此即可經由回饋電壓的變化來得知所要量測流場中流速之變化。實驗中，將測速儀裝設於可垂直與橫向移動的移動機構，測針擺設位置均以電腦控制。

三、壓力量測設備

前述之風速量測方法中，亦涉及壓力之量測。本計畫採用多頻道電子式壓力掃描閥，用來同步擷取作用於各點地表風速計內外管的瞬時壓力，經過適當的處理便可得到該點行人高度之平均風速、擾動風速。

本儀器為 SCANIVALVE 公司之產品，如圖 3-3 所示，其元件包括：

1. 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)

- (1) 最多可支援 8 組類比訊號轉換成數位訊號之轉換器(A/D MODULE)
- (2) 最多可支援 8 組壓力感應模組，共 512 個壓力量測點。
- (3) 其類比訊號轉換成數位訊號(A/D convert)解析度達 16bit。
- (4) 最大採樣速率可達 500Hz
- (5) 採用 USB 介面傳輸。
- (6) 具備網路控制與傳輸功能。

2. 壓力感應器模組特性：

- (1) 壓力感應範圍為 ± 10 in H_2O 。
- (2). 誤差範圍為 $\pm 0.2\%$ 。

實驗中將各個風壓孔之壓力訊號經 PVC 管傳遞至壓力感應器模組，其量得之訊號傳至壓力訊號處理系統計算後所得壓力值傳回電腦。

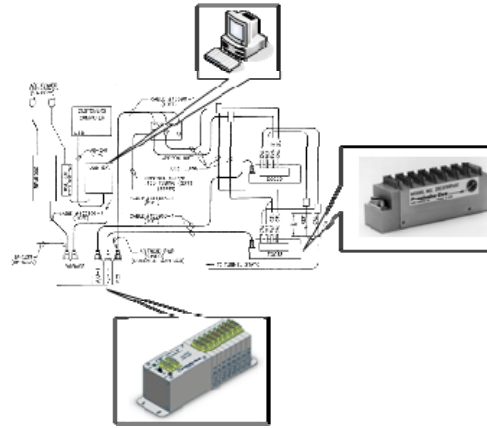


圖 3-3 多頻道電子式壓力掃描器

資料來源：本研究整理

第二節 CFD 模擬

本計畫之數值模擬方法擬採用開源(open source)之泛用型計算流體力學軟體 OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation)，可分析的問題包括層流、紊流、可壓縮流、不可壓縮流、自然對流流場、強制對流流場、靜態或動態流場等。而其統御方程式除了基本的連續方程式、動量方程式、能量方程式、濃度方程式等，對於上述問題有多種相應之數學模型可進行耦合解析。受益於物件導向的程式設計和運算子多載，使用者可以相對容易地建立自己的求解器。此外，OpenFOAM 具有很好的可延伸性，使用者在建立客製化的物體或物件（例如邊界條件或紊流模型）時，無需修改或是重新編譯軟體包，便可在已有的求解器上工作。同時，OpenFOAM 具有相當強大的平行運算效能，在 128 核心以內的分散計算，仍呈現良好的線性加速效果。

一、基本控制方程式

本研究採用 OpenFOAM 之 pisoFoam 求解器乃基於有限體積法 (finite-volume method) 為架構所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如下之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中， u 、 v 、 w 為速度在 x 、 y 、 z 三個方向之分量； t 為時間； f_x 、 f_y 、 f_z 為場加速度在 x 、 y 、 z 座標上之分量； p 為壓力； ρ 與 ν 分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。

有限體積法可將非線性偏微分方程轉變為網格單元上的線性代數方程，然後通過求解線性方程組得出流場的解。網格劃分可以將連續的空間劃分為相互連接的網格單元。每個網格單元由位於幾何中心的控制點和將網格單元包圍起來的網格面或線構成，以求解流場控制方程，最後獲得所有控制點上流場變數的值。

二、紊流模型

在紊流模型部分擬採用 LES model，為目前計算機能量可實現之高可靠度紊流模型，提供可信之模擬結果以作為可視化資料來源。另同步進行風洞實驗量測，以確認模擬參數與流程，同時建立採用 LES model 進行風工程相關模擬研究的原則方法。

若將速度與壓力分別以一個均值(mean)和一個擾動量(fluctuation)的和表示：

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'; \quad p = \bar{p} + p' \quad (3-4)$$

繼而代入(3-2)式至(3-3)式，將方程式作時間平均，而基於雷諾平均原則(Reynolds averaging principle)可得如後之為指標(index notation)型式之方程式：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + f_j \quad (3-6)$$

依據 Boussinesq 渦旋-黏滯度假說(eddy-viscosity hypothesis)，(3-6)式中的紊流應力(Reynolds stress)項可表示為：

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3-7)$$

其中， ν_t 為渦漩或紊流黏滯度 (eddy/turbulent viscosity)； k ($= \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}/2$) 為紊流動能 (turbulent kinetic energy)， δ_{ij} 為 kronecker delta 函數。

紊流模型採用 Smagorinsky[24] 建議之次網格紊流模型 (subgrid-scale turbulence model)，其方程式為：

$$\nu_t = C_s \Delta^2 \left(\frac{S_{ij}^2}{2} \right)^{0.5} \quad (3-8)$$

其中 C_s 為 Smagorinsky 常數，於此採用 0.15， Δ 為計算網格之特徵長度，而 $S_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j)$ 為剪應力張量。

一、大氣邊界層入流

紊流合成技術具有直接、計算量小之特性，目前常為國際上所應用。Smirnov 等[25]基於頻譜法(spectral method)的概念，併入了紊流長度尺度和時間尺度，從而產生非等向性(anisotropic)的非旋性(divergence-free)擾動速度場，稱為隨機流場產生法(random flow generation；RFG)。Castro[26]基於 DSRFG 方法進行修正研究，除維持原有特性與優點外，另提升空間相關因子的可調式性，並加入時間相關性因子，得到修正之離散與同步式隨機流場產生法 MDSRFG (modified discretizing and synthesizing random flow generation)。而本研究之邊界層紊流入流資料產生乃使用 MDSRFG(Modified)隨機紊流產生器來產生，風速隨著空間與時間變化，型式為傅利葉級數(Fourier series)的合成，其表示式如後：

$$U(x, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[p_i^{m,n} \cos \left(\tilde{k}_j^{m,n} \tilde{x}_j + \omega_{m,n} \frac{t}{\tau_0} \right) + q_i^{m,n} \sin \left(\tilde{k}_j^{m,n} \tilde{x}_j + \omega_{m,n} \frac{t}{\tau_0} \right) \right] \quad (3-9)$$

其中

$$p_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{4c_i}{N} E_i(k_m) \Delta k_m \frac{(r_i^{m,n})^2}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (3-10)$$

$$q_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{4c_i}{N} E_i(k_m) \Delta k_m \frac{1}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (3-11)$$

而 $\omega_{m,n} \in N(0, 2\pi f_m)$ 表示為 $\mu_\omega = 0$ (平均值) 以及 $\sigma_\omega = 2\pi f_m$ (標準偏差值) 的常態分布隨機數據, f_m 為相應 m 波數(wave number)之頻率。 $r_i^{m,n}$ 則是 $\mu_r = 0$ 及 $\sigma_r = 0$ 之三維常態分布隨機數據。 $c_i = 0.5\bar{U}$ ($\bar{U}$ 為平均風速), $\tilde{x} = x / L_s$ ($L_s = \theta_1 \sqrt{L_u^2 + L_v^2 + L_w^2}$), x 為空間位置, 而 L_s 為空間相關性的尺度因子(scaling factor)。此外, 導入時間相關性之因子 $\tau_0 = \theta_2 L_s / \bar{U}$, 可針對時間相關性進行微調。紊流動能 $\tilde{k}^{m,n} = k^{m,n} / k_0$ 為三維分佈, 乃依據非均勻性(inhomogeneous)與非等向性(anisotropic)頻譜特性所呈現球體表面之正交值來給定。

本研究紊流產生為非均勻性與非等向性大氣邊界層入流, 三個方向的風速頻譜採用 von Kármán 形式如後:

$$S_u(f) = \frac{4(I_u \bar{U})^2 (L_u / \bar{U})}{\left[1 + 70.8(f L_u / \bar{U})^2\right]^{5/6}} \quad (3-12)$$

$$S_v(f) = \frac{4(I_v \bar{U})^2 (L_v / \bar{U}) \left[1 + 188.4(2 f L_v / \bar{U})^2\right]}{\left[1 + 70.8(2 f L_v / \bar{U})^2\right]^{11/6}} \quad (3-13)$$

$$S_w(f) = \frac{4(I_w \bar{U})^2 (L_w / \bar{U}) \left[1 + 188.4(2 f L_w / \bar{U})^2\right]}{\left[1 + 70.8(2 f L_w / \bar{U})^2\right]^{11/6}} \quad (3-14)$$

上式中, I_u 、 I_v 、 I_w 分別為順風向、橫風向、垂直向速度之紊流強度, L_u 、 L_v 、 L_w 則分別為順風向、橫風向、垂直向速度在 x 方向的紊流積分長度尺度。

參數 L_s 為主要控制空間相關性之因子, 因此參數 θ_1 為控制空間相關性的主要之因子。但由於風洞實驗及實場量測中, 空間相關係數的量

測較為困難且繁複，而且並沒有可靠的空間相關性係數理論公式以供參考，故於此採用了 Coherence 函數的比對來進行參數 θ_1 的調整。在一個窄頻(narrow-band)的交相關 (cross-correlation) 情況下，Coherence 函數的均方根值為：

$$Coh = e^{-\hat{f}}, \hat{f} = \frac{n[C_z^2(z_1 - z_2)^2 + C_y^2(y_1 - y_2)^2]^{1/2}}{0.5[U(z_1) + U(z_2)]} \quad (3-15)$$

y_1 、 y_2 、 z_1 、 z_2 代表的是 2 個空間座標點位置， C_y 與 C_z 分別為橫風向與垂直向的衰減係數，依據 Davenport 所建議[27]，本研究採用衰減係數 $C_z = 10$ 以及 $C_y = 16$ 為理論值。經由 θ_1 調整與 Davenport 理論式擬和，找出 3 種地況相應之 θ_1 。此外， θ_2 可針對時間稽延(time lag)進行微調，也就是調整自相關性，其值約在 0.1-1 之間。 θ_2 於此由紊流積分長度尺度的擬合來決定。N 參數為描述每個三維離散波段(每個波段對應特定紊流尺度)在組合時所需的個數，Huang(2010)建議值為 100。M 參數為生成紊流時，離散(discretizing)波數所需的個數，過少會造成生成風速頻譜失真的現象，太多則會增加生成計算量，於此採用 2500，以兼顧生成頻譜精度以及計算量。

第三節 實體模型建立

本研究旨在建立 AR 可視化技術，並提供 3 組實體模型。透過 CFD 模擬建立完整的流場資料庫並匯入伺服器中，於伺服器端透過資料轉換技術，將可視化影像透過網路傳輸至移動設備，透過相機鏡頭影像定位技術呈現 AR 可視化結果。這 3 組模型分別為：(1)高寬比 6 之高層建築；(2)台北大巨蛋；(3)信義區 101 大樓周遭建築群。相關模型介紹以及設定於後續章節說明。

在開發初期，為快速進行相機追蹤技術測試以及可視化技術整合，減省進行實驗量測及模擬驗證工作，另額外製作一組以珍珠板所製作之簡易建築測試模型(圖 3-4)，作為前期軟體開發測試用。該模型寬 8 公

分，長 9 公分，高 24 公分，在 1 樓挑高處有 0.5 公分之屋簷突出。體積小、移動方便，有利於即時展示使用。同時在不考量精度問題狀況下，以 CFD 模擬快速建置流場資料庫，作為初步測試系統架構之用。



圖 3-4 簡易測試模型

資料來源：本研究拍攝

一、高寬比 6 之高層建築模型

本模型採用典型之高層建築之高寬比 6，模型設計為長寬(D)均為 10 公分，高(H)為 60 公分(如圖 3-5)。於模型 4 個立面埋設風壓孔，除針對表面風壓進行平均風壓以及擾動風壓比較外，另透過壓力對面積之積分獲得建築風力歷時，比較平均風力、擾動風力以及風力頻譜。於風洞實驗中 19 組風攻角實驗，檢視風力作用之特性。最後透過與風洞實驗比對，確立大氣邊界層流場中，高層建築風力之 CFD 模擬之可靠度。



圖 3-5 高寬比 6 之高層建築模型

資料來源：本研究拍攝

二、台北大巨蛋模型

不同於高層建築的分離點(separation point)通常落在迎風面銳緣處，大跨度圓頂屋蓋建築因分離點的高度不確定性及變異性使其存在著雷諾數效應(Reynolds Number Effect)的問題。一般而言，雷諾數越高，其在曲面上分離點位置越往下游移動，因尾跡(wake)範圍變小而有較小的阻力，橫風向風力亦會隨之變化。

本研究選擇台北大巨蛋(圖 3-6)作為第二組 AR 模型，具有其特別意義。除了前述因氣流特性造成風力作用與高層建築明顯不同，另因模型表面為曲面且屬於低矮型建築，在鏡頭追蹤定位技術上需要對應處理，克服此類型態建築追蹤技術可擴增本技術的適用性。本模型縮尺為 1/500，尺寸為長 54 cm×寬 42.5 cm×高 13 cm。另為比較數值模擬結

果，於大巨蛋本體表面縱向及橫向中心線埋設風壓孔(圖 3-7)，以利後續進行風洞實驗量測。基本之佈點原則為，在 x 軸線上以投影長度作等分佈設 25 點，在 y 軸線上以投影長度作等分佈設 21 點



圖 3-6 台北大巨蛋實體模型

資料來源：本研究拍攝

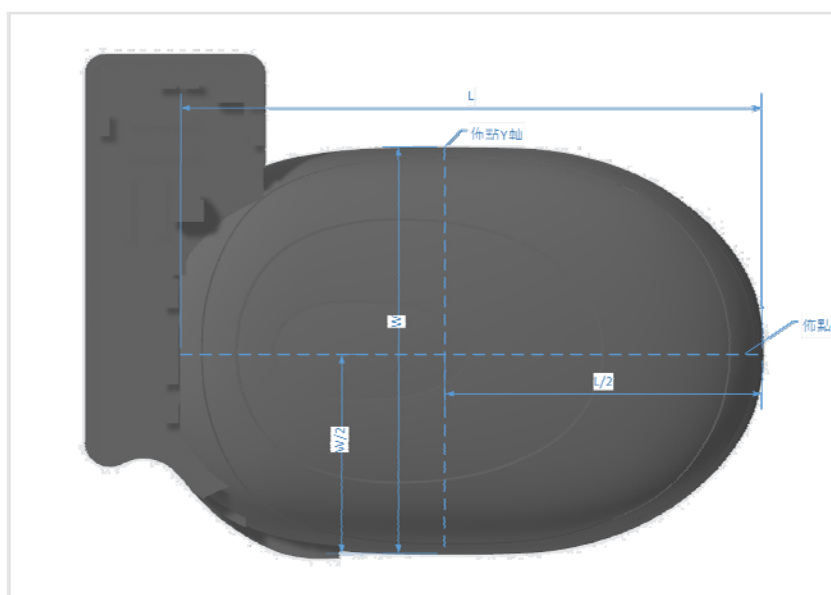


圖 3-7 台北大巨蛋數值模型

資料來源：本研究繪製

三、信義區 101 大樓周遭建築群

第三組 AR 模型乃針對台北市信義計畫區建築群進行建模，以台灣具有指標意義的最高樓台北 101 為中心，劃定 AR 模型之建構範圍。鎖定 101 縮尺模型為 1 公尺高，模型縮尺約為 1/500。按內政部建築研究所風洞實驗室第一測試段寬為 4 公尺，故設定模擬範圍為 3 公尺×3 公尺，於實尺寸範圍為 1.5 km²，詳細範圍界定如圖 3-8 所表示，實際模型如圖 3-9，數位 3D 模型如圖 3-10。

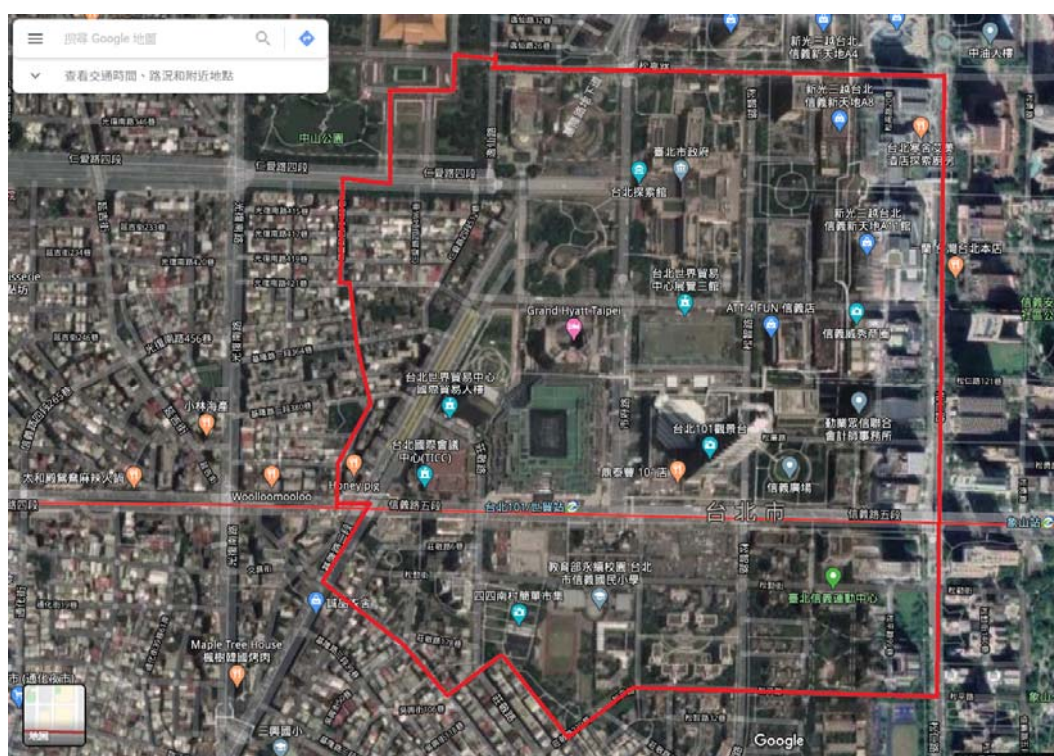


圖 3-8 信義區 101 大樓周圍之模擬區域範圍

資料來源：本研究繪製



圖 3-9 信義區 101 大樓周圍之區域模型

資料來源：本研究拍攝

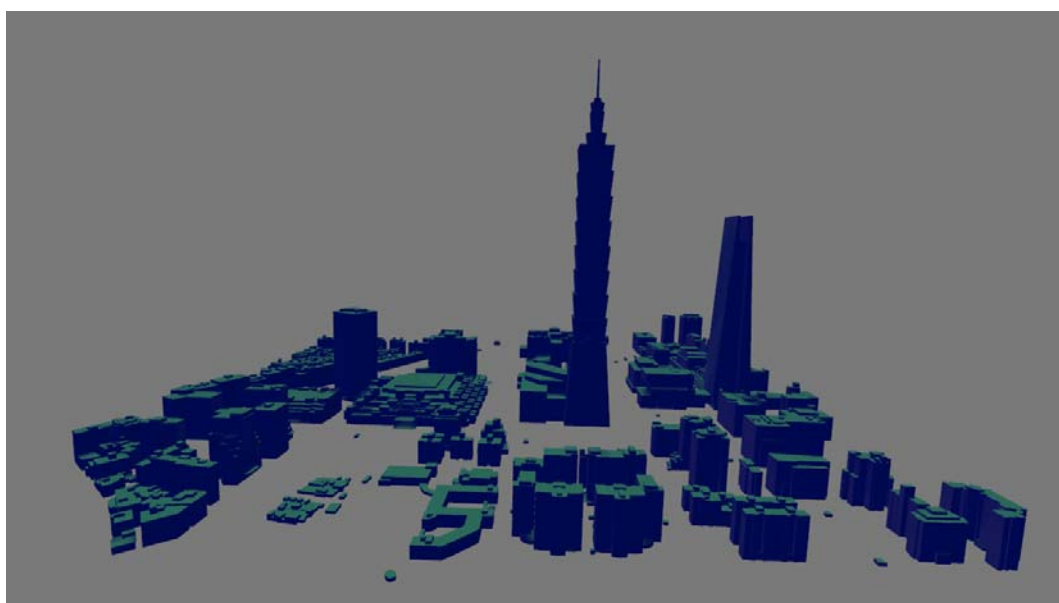


圖 3-10 信義區 101 大樓周圍之區域 3D 模型

資料來源：本研究製作

第四節 相機追蹤技術

目前對於物體的相機追蹤方式主要分為 2 大類，分別是條碼標記式追蹤以及色彩標記式追蹤。本研究初期先以條碼標記式追蹤技術建構

AR 流場可視化技術，下階段則以可融合至建築本體特色之記號進行色彩標記式追蹤，以下針對 2 種方法做概要之介紹。

一、條碼標記式追蹤

標記式追蹤即是以相機鏡頭追蹤特定標記，以判斷鏡頭於特定點之關係，藉以定位 3D 模型在空間中的位置。首先在測試階段，本研究採用的是開源函式庫 ArUco[28]所提供的標記(Barcode)方案。其內部所生成之偵錯碼可以有效的避免標記過小或鏡頭太遠所造成的編號判讀錯誤問題。另外，採用標記可以在測試時，準確的將流場可視化資料繪製於畫面上，以確認後續定位追蹤流程之正確性。

如圖 3-11，我們在模型 4 個面各自黏上二維條碼，另在底座的 4 個角落也黏上對應之條碼，作為 3D 模型之追蹤記號。

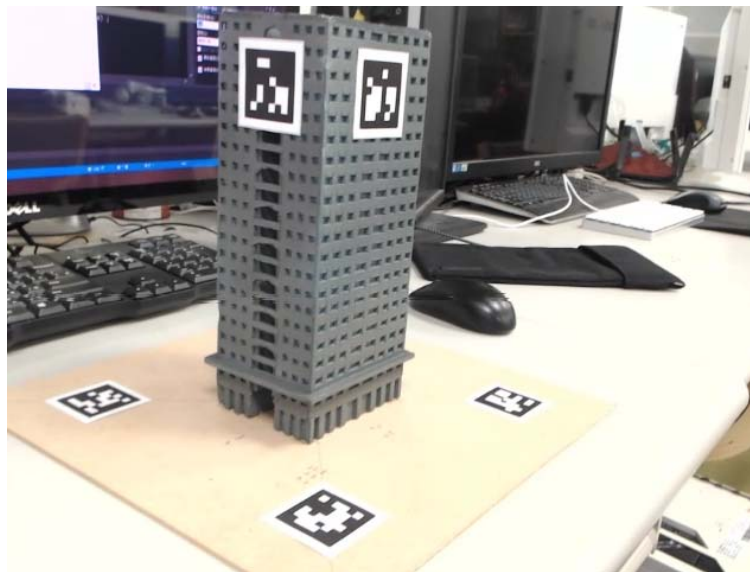


圖 3-11 建築模型及黏貼於其上之標記

資料來源：本研究製作

在透過 Aruco Code 求解相機位置時使用到了 PnP 技術，PnP (Perspective-n-Point) 是求解 3D 到 2D 點對運動的方法。它描述了當知道 n 個三維空間點座標及其二維投影位置時，如何估計相機的位姿。在本應用中利用一個 Marker 的四個角點在真實空間的 XYZ 位置，對應

掃描完畢的 Markermap 即可取得相機在此 map 裡的相對於參考點的真实位置。

二、色彩標記式追蹤

在整個鏡頭追蹤系統完善後，因條碼標記對於建築風格特性無法融合，且與需要多次黏貼動作，故採用色彩標記式追蹤之最終目標，是希望能去除需要在建築上黏貼標記的步驟。

為了能在模型建構階段就完成標記的建置，在結合建築上會具有的彩繪或是色彩玻璃特性，其中 Chae 等[29]、Nguyen 等[30]所提出的彩色型隱密 QRCode 技術及彩色 BarCode(圖 3-12)就十分符合這個使用情境，降低二維條碼對於建築本體的突兀感。

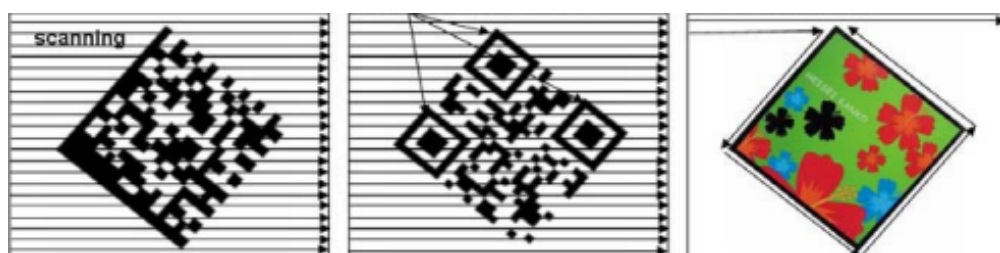


圖 3-12 二維標記與彩色型隱密 QRCode

資料來源：[29]

第五節 流場可視化工具

有關流場可視化工具，目前有 VTK 提供現成的工具組以及 FLTK 結合 OpenGL 自行定義之 AR 顯示資料庫，另在動態資料呈現部分，會關係到可視化呈現的效果，於此一併說明。

一、VTK 與 FLTK 介紹

VTK(Visualization Toolkit)是一個開放源代碼的免費軟件系統，用於 3D 計算機圖形，建模，圖像處理，體繪製，科學可視化和 2D 繪圖。它支持多種可視化算法和高級建模技術，並且分別利用線程和分佈式內

存並行處理來提高速度和可伸縮性。該工具基於 OpenGL 包裝了許多在醫療、科學領域會使用到的繪圖函式，能加速醫學影像、點雲類的視覺化使用操作。

但其高度訂製的特性也使得 VTK 的自由度遭到限制，在本研究中必須使用透明物體遮擋效果，來呈現 AR 上虛擬建築重疊現實物件的視覺效果。在 VTK 中因為繪圖管道已經定義好的緣故，所以無法簡單的操作螢幕緩衝達成上述的效果。另外 VTK 內建的流線繪製函式過於單一缺少擴充性，也比較不合適使用在動態流場呈現上。

FLTK(Fast Light Toolkit)是一個跨平台的 C++GUI 工具集，用在 UNIX/Linux (X11)、微軟 Windows 和 Mac OS X 上。FLTK 提供現代的 GUI 功能，除卻膨脹，通過 OpenGL 和內建的 GLUT 模擬器提供 3D 圖形支援。

OpenGL 作為底層繪圖 API，有許多開放的流程及著色器可供自行定義，搭配 FLTK 框架作為使用者介面。開放存取的螢幕緩衝可訂製 AR 所必備的透明物體遮擋效果，且可自訂流線繪製著色器及記憶體管理，其缺點為許多函式需自行整合及測試。

二、動態載入流場資料

為了因應本研究中龐大的流場資料無法全部存放於記憶體中的問題，我們採用了八元樹(Octree)的結構進行資料串流。八元樹具有同時兼顧切割空間，及快速定位鄰近點的功用。在運行時可透過鏡頭可見之範圍及距離，來決定動態透過硬碟或網路傳輸呈現所需之精細程度的資料，也同時節省了查找整筆資料造成運作過於緩慢的困擾。

八元樹是一種用於描述三維空間的樹狀資料結構，其每個節點表示一個正方體的體積元素，每個節點有八個子節點，將八個子節點所表示的體積元素加在一起就等於父節點的體積。八元樹是四元樹在三維空間上的擴展，二維上我們有四個象限，而三維上，我們有 8 個象限。在本應用中主要用於儲存空間劃分和最近鄰居搜索。目前在測試下固定使用 5 層作為分層層數，並且根據層數做維度的重新採樣。

主要執行方法如圖 3-13，首先在記憶體中預先載入 Octree 的結構及位置、範圍。再根據目前相機位置及朝向，從 Octree 的結構中判斷應該動態載入哪些層數的區塊。當距離相機起點越近的區塊則載入越下層(細節越多)的資料，若該區塊已在記憶體內，則不進行載入。在 3D 狀況下，Octree 的結構如圖 3-14 所示。

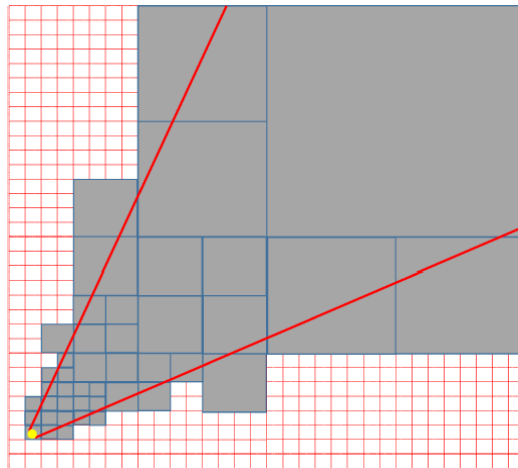


圖 3-13 根據鏡頭距離所載入的資料精細程度示意圖

資料來源：<http://cri5ti.com/game/2015/09/27/chunked-LOD/>

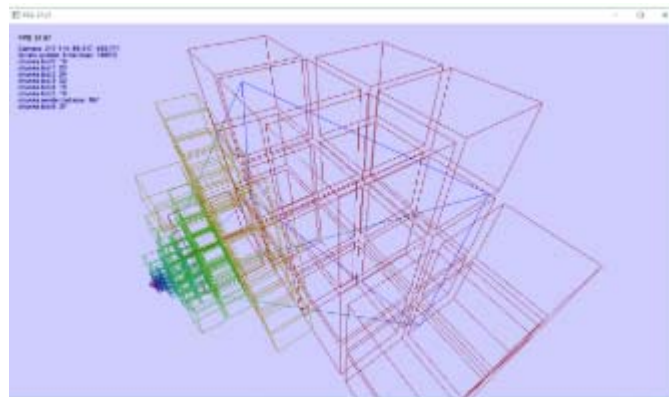


圖 3-14 實際在三維空間的區塊大小

資料來源：<http://cri5ti.com/game/2015/09/27/chunked-LOD/>

二、可視化選單

可視化呈現採用定格檢視以及動態檢視 2 種方式，定格檢視主要以平均或特定瞬間流場來檢視流場，僅需要一組空間資料即可完成。動態檢視則是呈現瞬態模擬結果，需要逐時傳輸動態影像至移動設備。本研究規劃定格檢視之選單資料有：(1) 表面或切面等值圖；(2) 流線；(3) 質點軌跡。而在動態檢視則多了：(1) 渦度等值面；(2) Q 準則等值面；用以檢視渦流隨時間運動之特性。以下針對前述可視化功能作說明。

(1) 表面或切面等值圖

檢視速度場或壓力場時，以二維方式檢視較三維直觀且簡易。等值圖即是以等高線的概念，將等值的物理量(壓力、速度)，在平面上以同樣的線段或色塊表現。可用以觀察建築表面壓力，以及空間中特定切面之速度、壓力或是渦度。

(2) 流線與質點追蹤可視化

雖然流體運動十分複雜，一般來說，可透過 3 個典型的流場線來進行可視化的工作。

- a. 徑線(path line)：流體中特定質點在不同時間流經的軌跡，本身隱含拉格蘭吉(Lagrangian)觀點。
- b. 煙線(streak line)：通過某一特定點的所有質點連成的軌跡，如以相機拍攝香菸之煙流即為煙線。
- c. 流線(stream line)：流體在流場中，每一點速度向量切線的軌跡。對於穩定流動，流線在空間中為固定線且與徑線重合，其公式為：

$$\frac{dx}{u(X,t)} = \frac{dy}{v(X,t)} = \frac{dz}{w(X,t)} = dt \quad (3-16)$$

為了在 FLTK 中顯示流線以及質點追蹤，由上述基本定義中得知其做法。基本上流線的推求僅需要 1 組流場資料，先由空間中特定點速度乘上自定義之時間步距，以獲得下一個切線位置。再將各時間步所推得的空間位置連線，即可得到流線。在可視化選單中，採用流線顯示如圖 3-15 所示。

而在質點釋放及追蹤可視化部分(如圖 3-16)，其概念與徑線相同，且需要多組瞬時資料來計算。在起始時間之流場特定點位置釋放質點，並開始追蹤。與流線計算相同，在質點所在位置之速度乘上下一個瞬間的時間步距，獲得質點在下一個瞬間的空間位置，再由此瞬間的速度去推估質點於下一瞬間所在位置。重複此運算後，可以得到完整之質點運動軌跡之動畫。

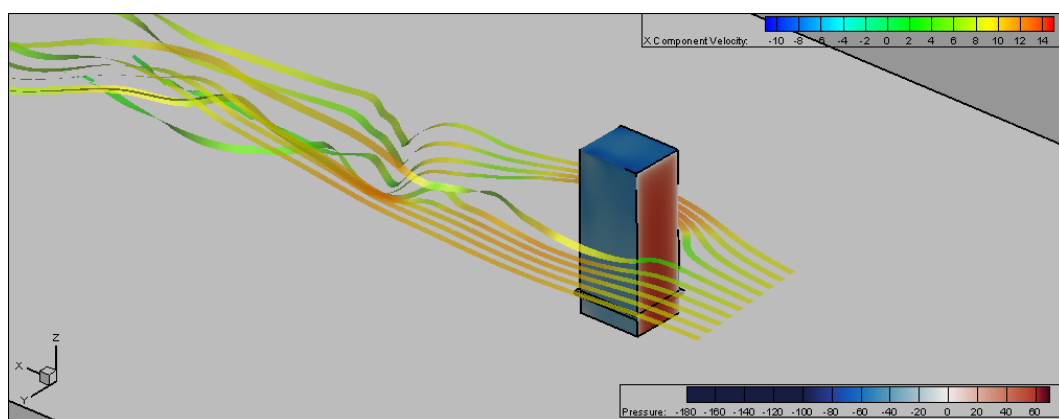


圖 3-15 流線可視化示意圖

資料來源：本研究繪製

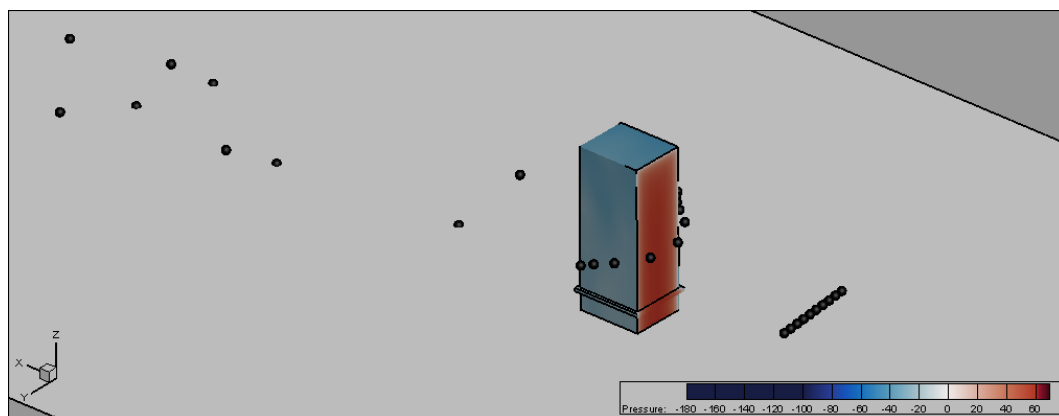


圖 3-16 質點追蹤可視化示意圖

資料來源：本研究繪製

(3) 渦度等值面

渦度(vorticity)的定義為速度的旋度(curl)，公式如下：

$$\begin{aligned}\omega = \nabla \times \mathbf{U} &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)\hat{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\hat{k} \quad (3-17)\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{U}$ 為速度， ω 為渦度，相當於流體在特定時間與空間(x,t)旋轉 2 次。根據這個結果，可以直接以渦度來了解渦旋，渦度等值面(iso-surface)可視化示意圖如圖 3-20 所示。但這個方法卻有個缺點，它無法區別旋渦運動和剪切運動。

(4) Q 準則等值面

為彌補渦度等值面可視化的不足，於此嘗試扣除剪切運動。由流場之速度梯度張量 $\bar{D}$ 來看，可以用 $D_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$ 來表示之。由於這是一個二階張量，因此可以分解為對稱和斜對稱。其中，Q 準則(Q-criterion)代表 ∇u 中第二不變量的連通流體區域。其公式為：

$$Q = \frac{1}{2}(tr(\bar{D})^2 - tr(\bar{D}^2)) = \frac{1}{2}\|\bar{\Omega}\|^2 - \|\bar{S}\|^2 \quad (3-18)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (3-19)$$

其中， S_{ij} 為應變率張量， Ω_{ij} 為渦度張量。由公式(3-17)可以看出，Q 代表剪應變率(shear strain rate)和渦流強度間的局部平衡，並將渦旋定義為渦流強度大於應變率強度的區域。由圖 3-18 可以觀察到，相對於渦度等值面，Q 準則等值面可以觀察到較純粹的渦旋外觀。此外，在地面附近不會有像渦度等值面出現多餘之剪應力能量，並不是呈現渦流真正的效應。

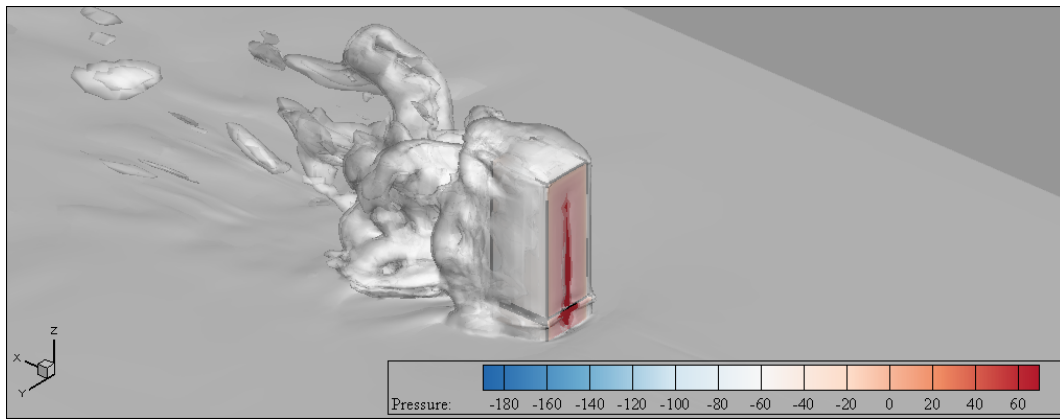


圖 3-17 渦度等值面可視化示意圖

資料來源：本研究繪製

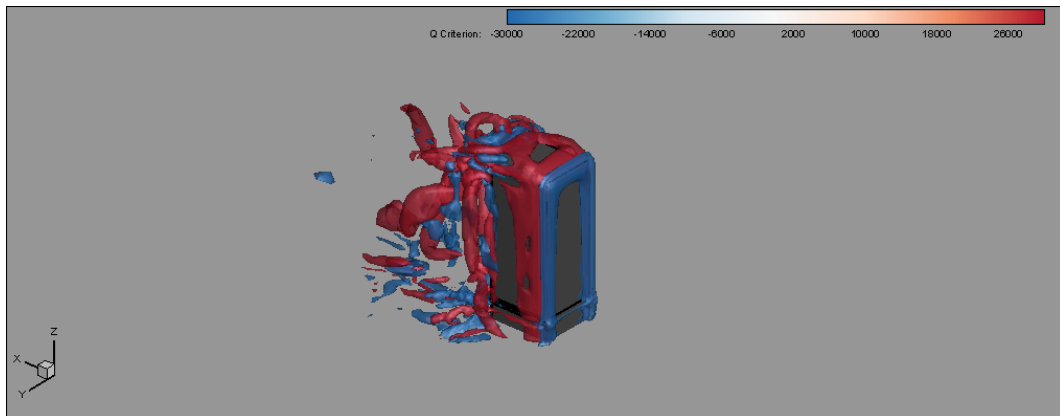


圖 3-18 Q 準則等值面可視化示意圖

資料來源：本研究繪製

第四章 結果與討論

本研究進行高寬比 6 方型高層建築、台北大巨蛋風洞實驗，並建構相對於風洞實驗之大氣邊界層紊流產生法入流，針對高層建築之風壓係數、風力係數以及風力頻譜進行比對驗證。另完成條碼標記式追蹤為基礎之鏡頭追中技術，以展示模型作為示範，結合 CFD 模擬建立之風場資料庫，初步以 VTK 顯示 AR 可視化結果。

在初步測試後，發現 VTK 雖提供簡便之可視化模組，但使用上較受侷限。為強化 AR 可視化效果及功能，本研究另以 FLTK 搭配 OpenGL 之解決方案進行開發，以下針對相關工作成果進行說明。

第一節 風洞實驗結果

實驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行(如圖 4-1)，。於建築 4 個表面分別埋設 105 個風壓孔(圖 4-2)，共 420 個風壓孔。入流風場地況為 C 地況，建築高度處風速(U_H)為 10 m/s。實驗時以 A 面為起點(如圖 4-3)，標記為 0° ，每 10° 逆時針旋轉圓盤一次。因本建築外型對稱，故量測至 180° ，共 19 個風向角。每次紀錄表面風壓資料，實驗取樣頻率為 250 Hz，取樣時間為 1080 秒。



圖 4-1 高寬比 6 方型高層建築風洞實驗配置

資料來源：本研究拍攝

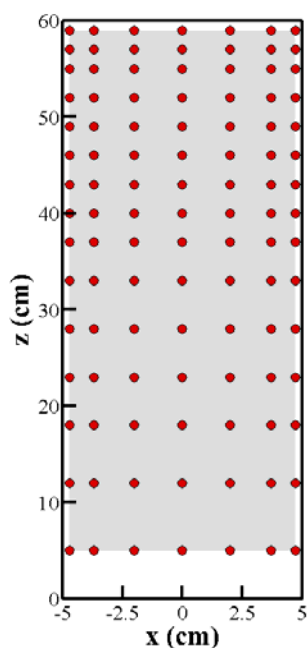


圖 4-2 高寬比 6 方型高層建築模型表面壓力孔配置

資料來源：本研究繪製

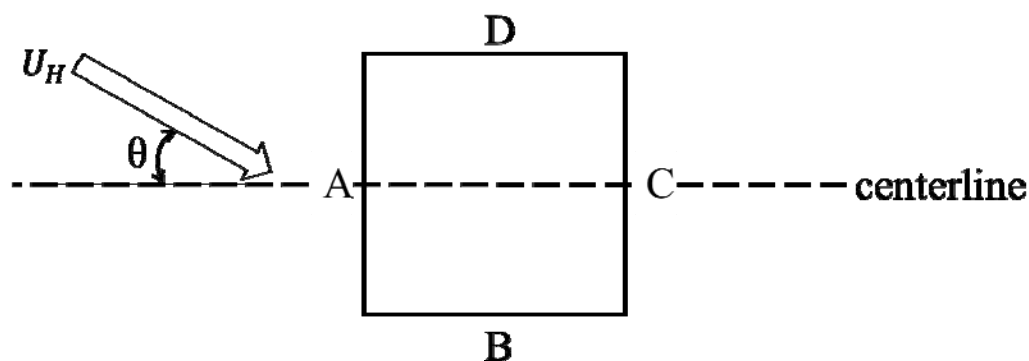


圖 4-3 高寬比 6 方型高層建築實驗示意圖

資料來源：本研究繪製

風洞入流邊界條件其平均風速剖面公式乃依據冪數率(power law)給定，可由圖 3-12 的風洞實驗室量得之平均風速回歸得到 α 為 0.15。依實場的邊界層厚度(δ)給定為 400 公尺(風洞實驗縮尺後為 1.6 公尺)，紊流強度剖面公式同樣依據風洞實驗室量測結果進行回歸所得，其公式

為：

$$I(z) = 0.22 - 0.18 \left(\frac{z}{\delta} \right)^{0.6} \quad (4-1)$$

圖 4-4 為風洞實驗室 C 地況之入流條件，包含平均風速、紊流強度以及紊流積分長度尺度，基本上符合規範中 C 地況的風速剖面特性。

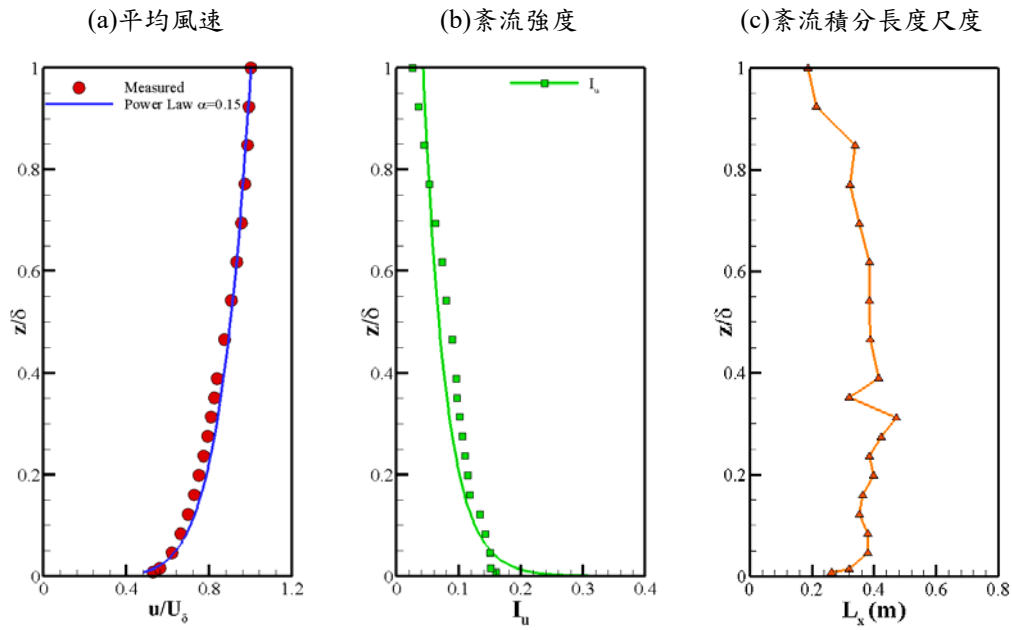


圖 4-4 風洞實驗室風速分布特性

資料來源：本研究繪製

一、表面風壓結果

為檢視建築物表面壓力(p)變化，將其針對建築物高度之風速(U_H)進行無因次化，故風壓係數公式可寫為：

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho U_H^2} \quad (4-2)$$

其中 p_0 為參考壓力，於此取在入流處建築等高位置。 $\bar{\quad}$ 表示為平均值，上標'表示為擾動值。圖 4-5 至 4-16 為不同角度($\theta=0^\circ\sim50^\circ$)之建築表面風

壓的平均以及擾動結果。可以看出平均壓力在 $\theta=0^\circ$ 時(圖 4-5)，在迎風面(A 面有最大值發生)。B、D 面為側風面為負壓且 2 面對稱。在擾動值部分(圖 4-6)，基本上，受到渦流分離的影響，側風面(B、D 面)的擾動是對稱的，且其值遠高於迎風面及背風面。

從風壓結果亦可看出，由於本模型外型為對稱，在風攻角為 45 度時，AB 面、CD 面分別各自互為對稱面，理論上對稱面風壓結果應相同。從 $\theta=40^\circ$ (圖 4-14、圖 4-15)、 $\theta=50^\circ$ (圖 4-15、圖 4-16)來看，無論是平均或擾動風壓， $\theta=40^\circ$ 的 A、B、C、D 面，分別對應到 $\theta=50^\circ$ 的 D、C、B、A 面，互為鏡面結果。可見本實驗的流場對稱性相當良好，可作為後續模擬驗證的基礎。此外，由於量測時間長達 18 分鐘，相關資料亦可成為風壓極值分析的參考資料之一。

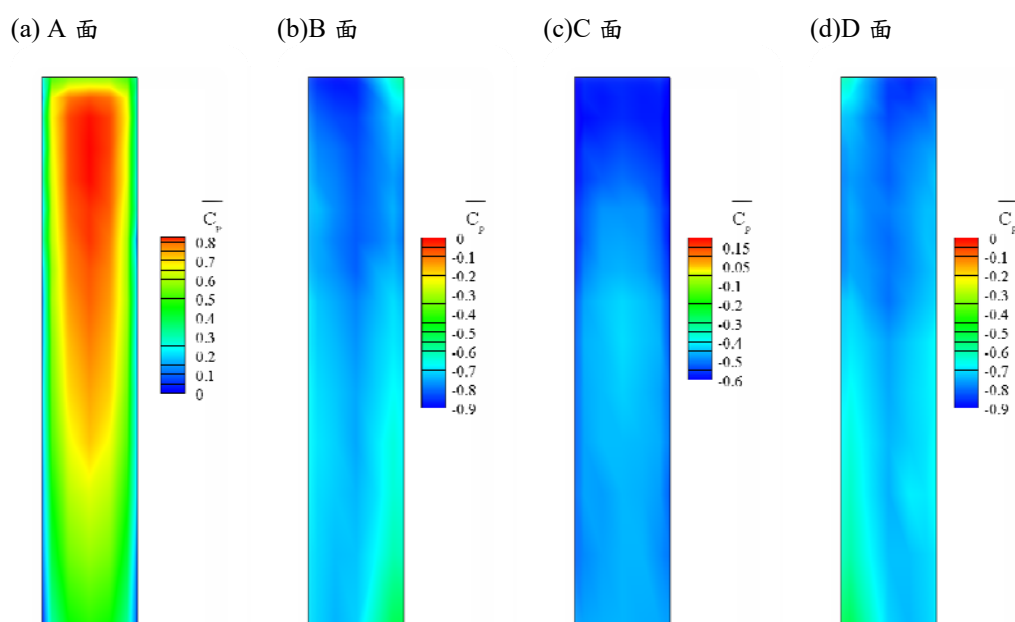


圖 4-5 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=0^\circ$)

資料來源：本研究繪製

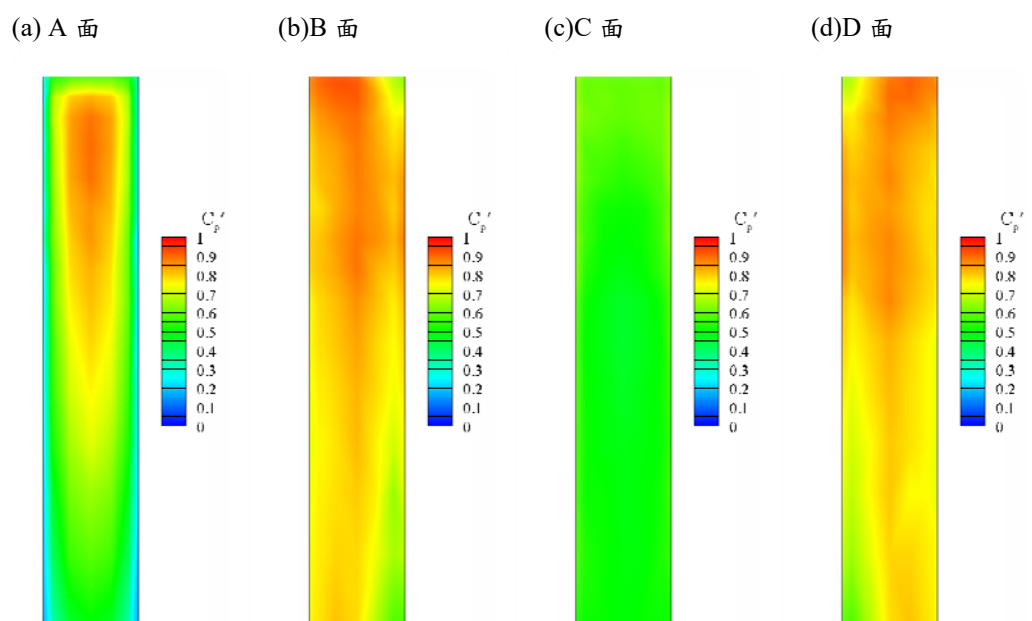


圖 4-6 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=0^\circ$)

資料來源：本研究繪製

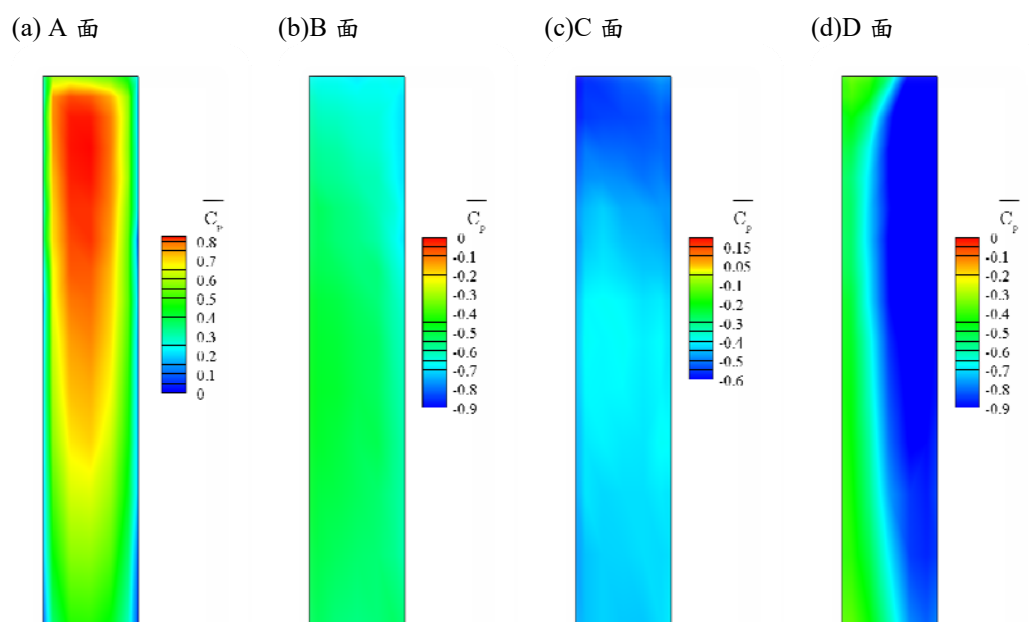


圖 4-7 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=10^\circ$)

資料來源：本研究繪製

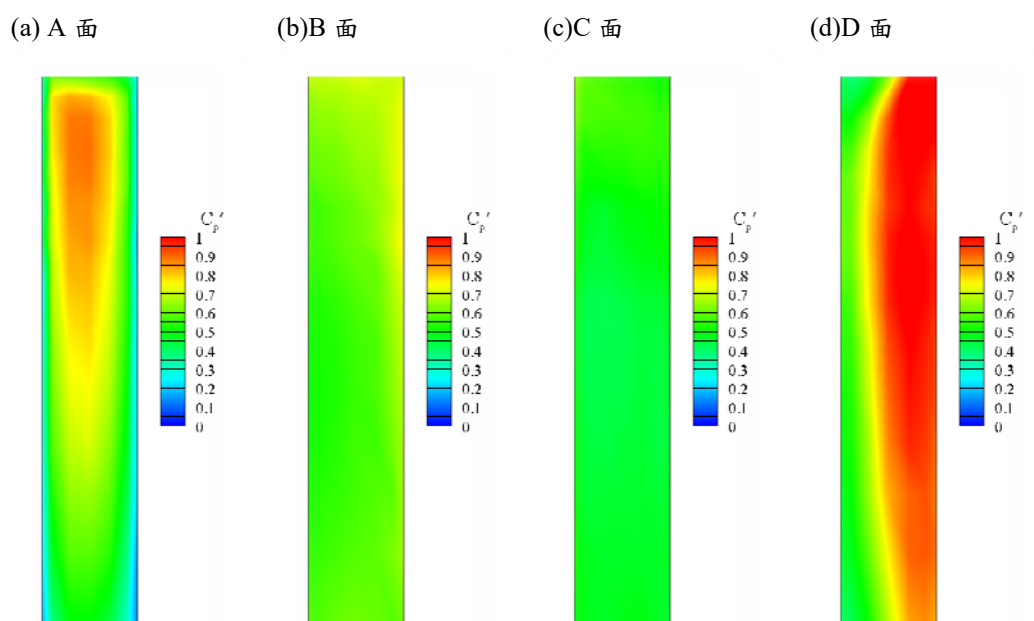


圖 4-8 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=10^\circ$)

資料來源：本研究繪製

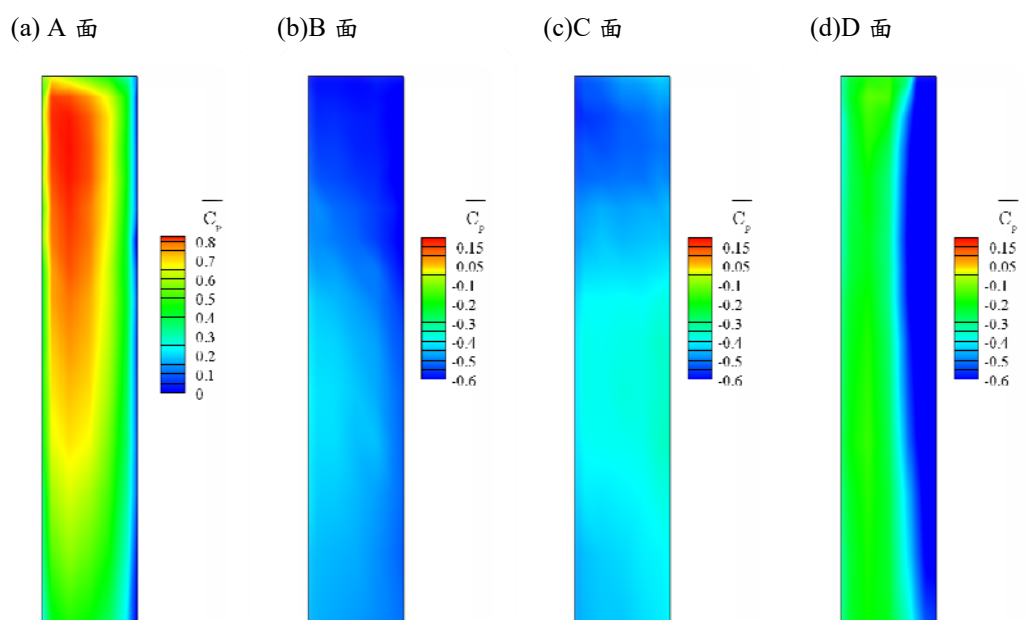


圖 4-9 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=20^\circ$)

資料來源：本研究繪製

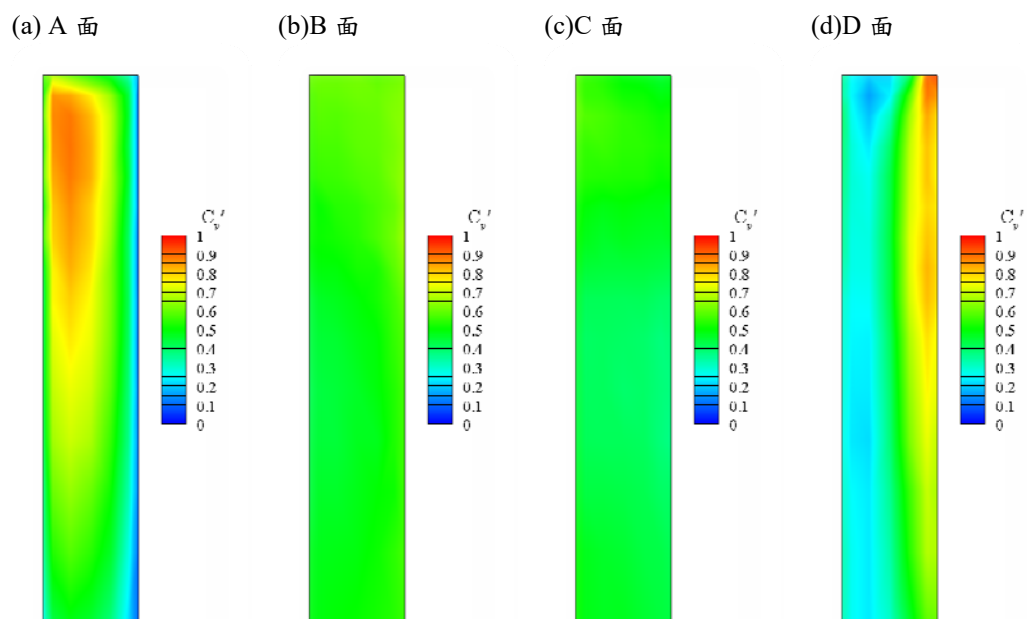


圖 4-10 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=20^\circ$)

資料來源：本研究繪製

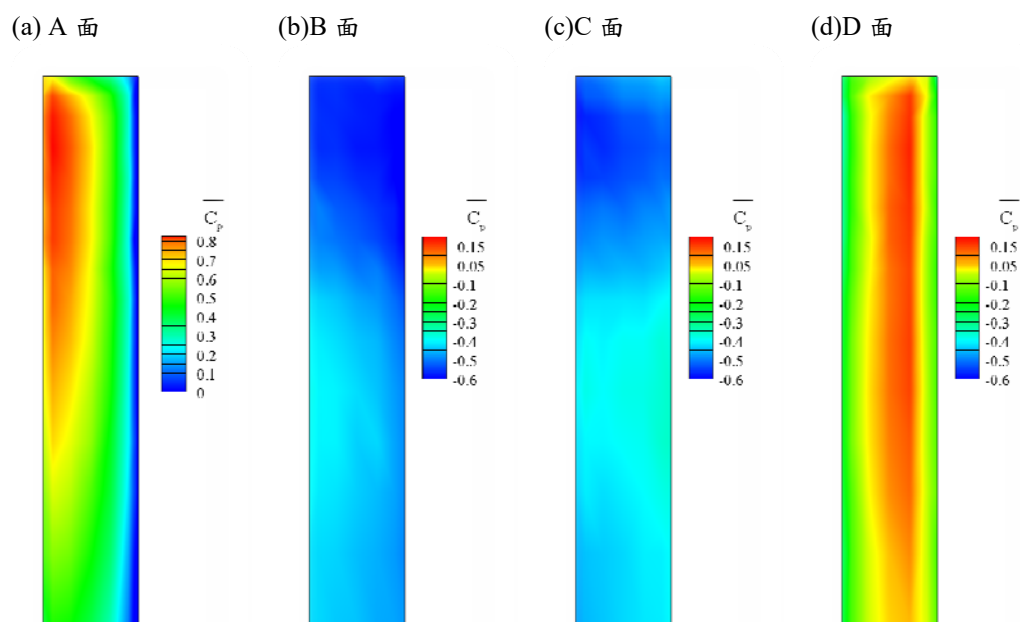


圖 4-11 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=30^\circ$)

資料來源：本研究繪製

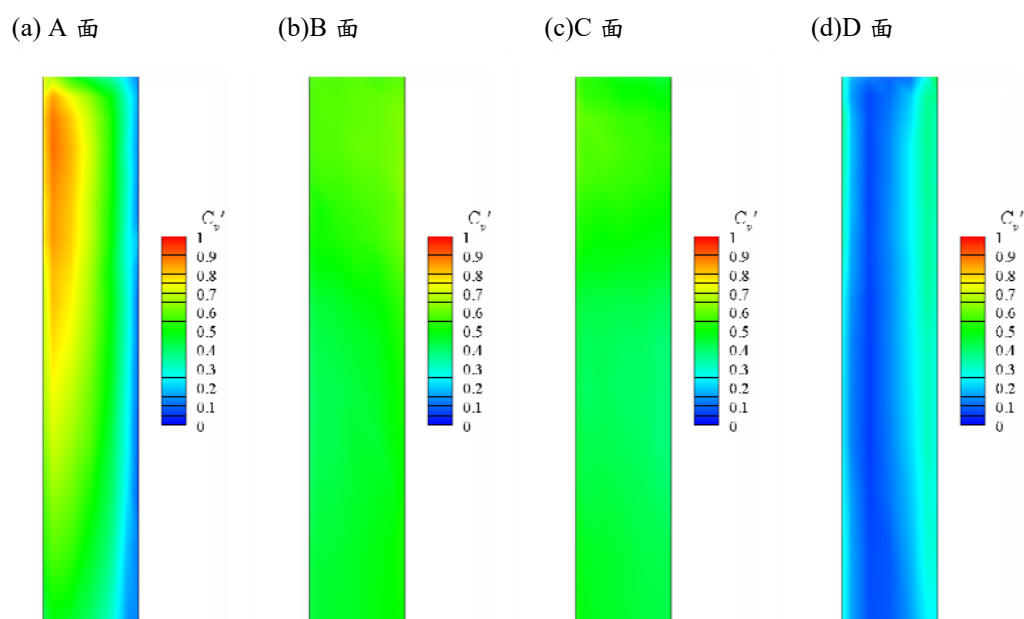


圖 4-12 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=30^\circ$)

資料來源：本研究繪製

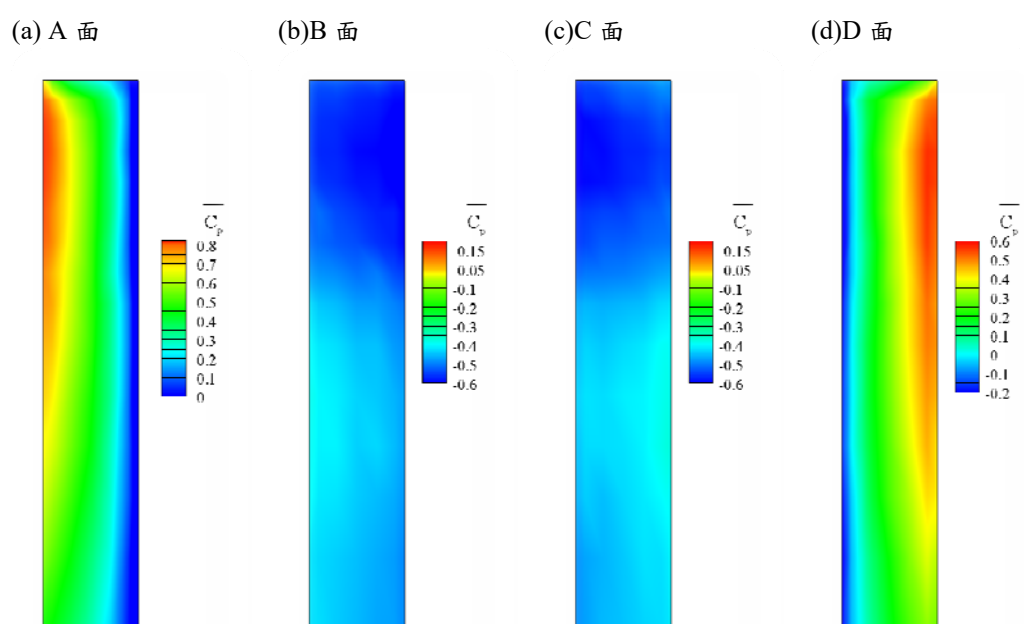


圖 4-13 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=40^\circ$)

資料來源：本研究繪製

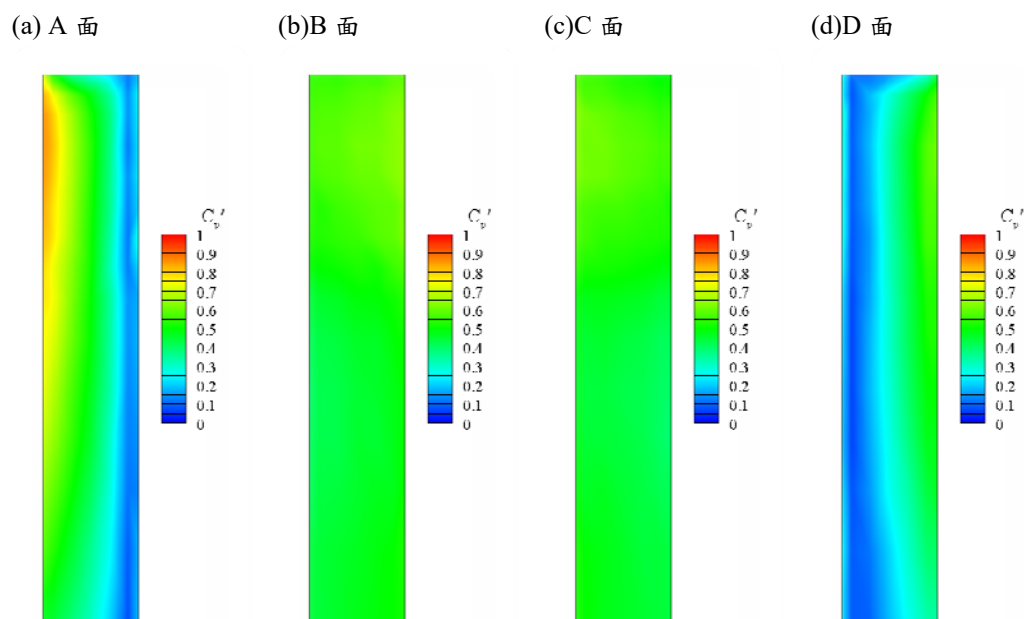


圖 4-14 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=40^\circ$)

資料來源：本研究繪製

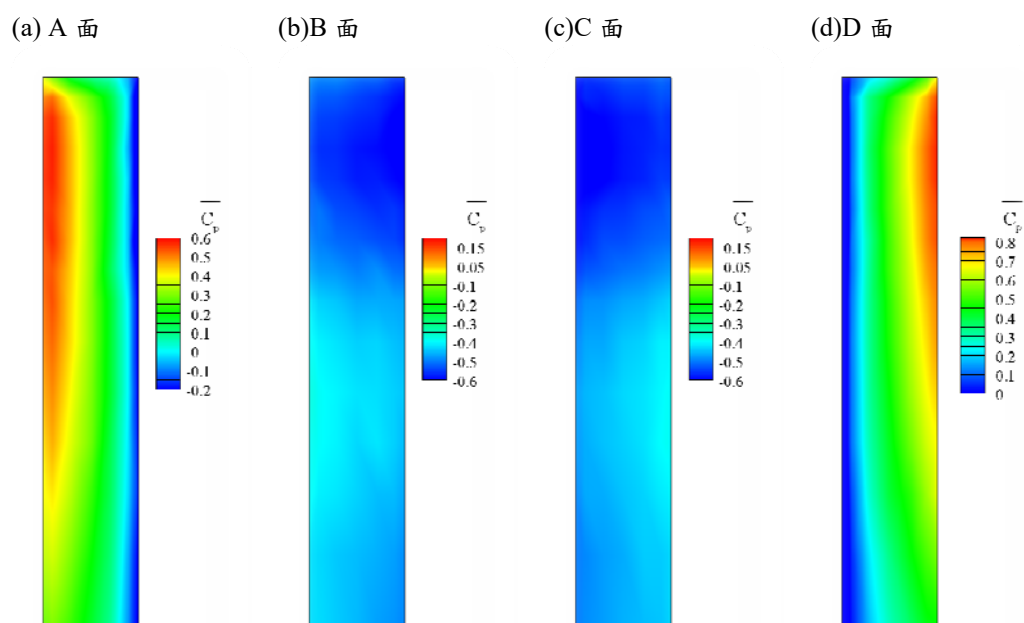
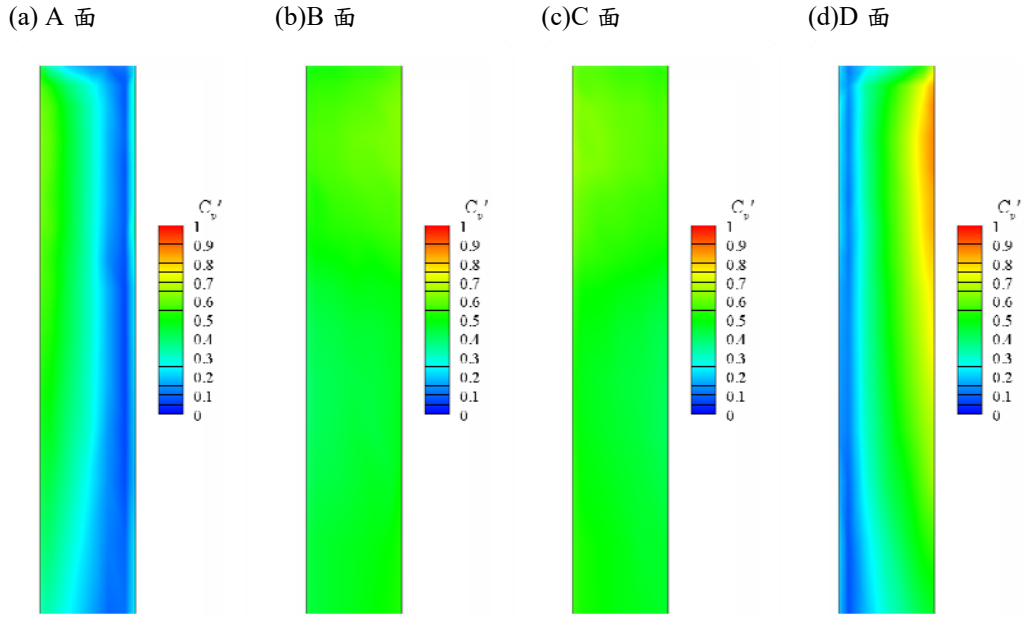


圖 4-15 高寬比 6 建築物之表面平均風壓係數圖($\theta=50^\circ$)

資料來源：本研究繪製

圖 4-16 高寬比 6 建築物之表面擾動風壓係數圖($\theta=50^\circ$)

資料來源：本研究繪製

二、風力結果

風力分析的座標系統，以 $\theta=0^\circ$ 時之座標為例(圖 4-17)，主要鎖定在結構本身的座標系，x 為 A-C 面方向，y 為 B-D 面方向，其風力係數之公式如後：

$$C_{Fx} = \frac{F_x}{0.5\rho U_H^2 DH} \#(4-2)$$

$$C_{Fy} = \frac{F_y}{0.5\rho U_H^2 DH} \#(4-3)$$

$$C_{Mx} = \frac{M_x}{0.5\rho U_H^2 H^2 D} \#(4-4)$$

$$C_{My} = \frac{M_y}{0.5\rho U_H^2 H^2 D} \#(4-5)$$

$$C_{Mz} = \frac{M_z}{0.5\rho U_H^2 H^2 D} \#(4-6)$$

其中， F_x 為 x 方向受力、 F_y 為 y 方向受力。 M_x 、 M_y 、 M_z 分別為 x、y、z 軸向上的扭轉力，以上風力均由表面風壓孔積分而得。

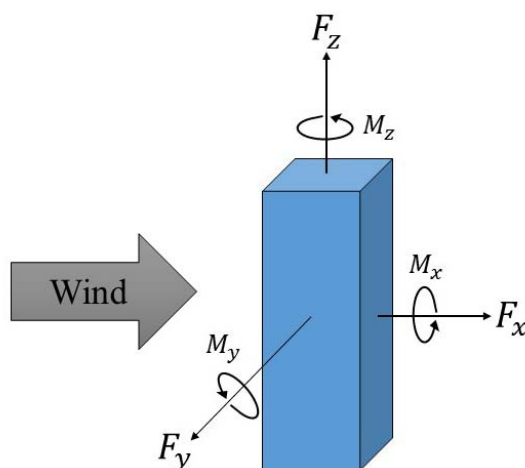


圖 4-17 高層建築風力作用示意圖($\theta=0^\circ$)

資料來源：本研究繪製

圖 4-18 為 $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ 之平均風力係數比較結果，可以發現，在 $\theta=0^\circ$ 時 C_{Fx} 、 C_{My} 有最大值發生，隨著風攻角增加而降低，到了 $\theta=90^\circ$ 時風力係數變為 0。相反的， C_{Fy} 、 C_{Mx} 則是在 $\theta=0^\circ$ 時為 0，隨著風攻角增加而逐步增加，在 $\theta=90^\circ$ 有最大值發生。這是因為本模型為方形對稱斷面，以 A-C 面計算得的風力係數(C_{Fx} 、 C_{My})由順風向轉為橫風向，以 B-D 面計算得的風力係數(C_{Fy} 、 C_{Mx})則由橫風向轉為順風向。相對於其他風力係數，方形斷面的扭轉向風力係數 C_{Mz} 是比較小的，且最大值發生在 $\theta=40^\circ$ - 50° 附近。

在擾動風力係數部分(圖 4-19)，一般而言，在流場正對建築物時，橫風向風力會有最大的擾動壓力。因此， C_{Fy} 、 C_{Mx} 在 $\theta=0^\circ$ 有最大值發生，同時隨著風攻角增加而降低，並在 $\theta=0^\circ$ 有最小值發生，然後在 $\theta=90^\circ$ 前逐漸回復。與平均風力係數相同， C_{Fx} 、 C_{My} 與 C_{Fy} 、 C_{Mx} 互為對等之結果，在風攻角轉變後可以得到一致的結果。

由平均以及擾動風力係數可以看出，本實驗之量測品質十分良好，

在風攻角變化後的對稱位置的風力係數趨於一致，後續相關數據將作進一步整理，以作為 CFD 模擬驗證工作之基礎。

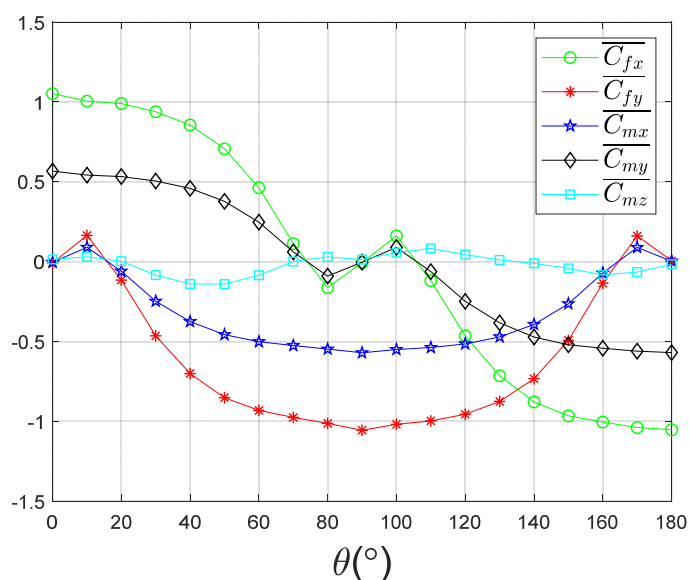


圖 4-18 平均風力係數比較圖

資料來源：本研究繪製

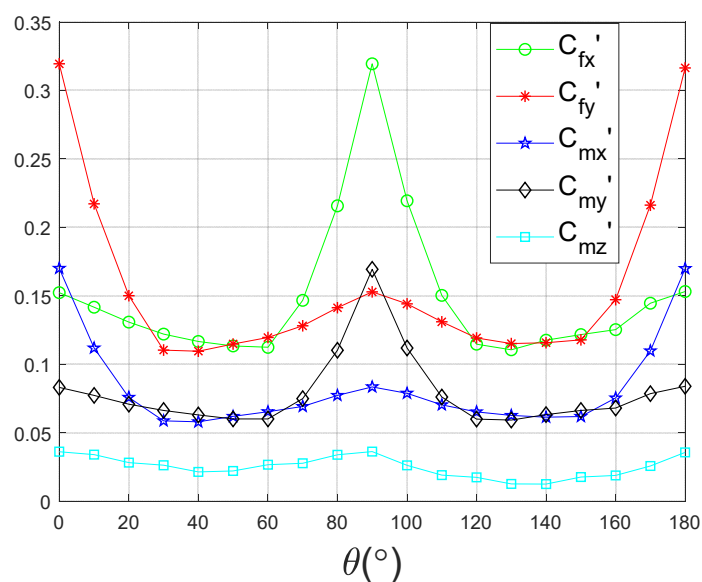


圖 4-19 擾動風力係數比較圖

資料來源：本研究繪製

第二節 CFD 模擬驗證

依據前面高寬比 6 高層建築風洞實驗量測結果，先針對 $\theta=0^\circ$ 的量測結果進行比較。此外，針對傳統之 RFG 以及改良後的 MDSRFG 這 2 種紊流產生法進行比較，據以了解大氣邊層入流條件對於建築物受風力的影響，並進一步驗證數值模擬方法基於 LES model 來預測建築受風力的可靠度。

一、模擬區域及網格

在數值模擬時，比擬實際風洞配置，設定高寬比(H/D ； $D=0.1$ m)為 6 之方形建築於入口下游 $3H$ 位置。柱體後緣至下游出口處距離設定為 $10H$ ， y 方向範圍為 $16D$ ， z 方向則為 $3H$ 。格網設計採用結構化網格，並考量計算效率與精度的平衡狀況下，以及最小格網應小於解析之渦流尺度等問題，在鄰近柱體附近以及地面處等流場變化較劇烈之位置，採行較密之網格設計，反之較遠離固體邊界者則較疏。本研究 x 、 y 與 z 方向最小網格均為 $0.05 D$ ，最大網格為 $0.5D$ ，計算格網總數共 128 萬，相應計算域與格網配置如圖 4-20 所示。

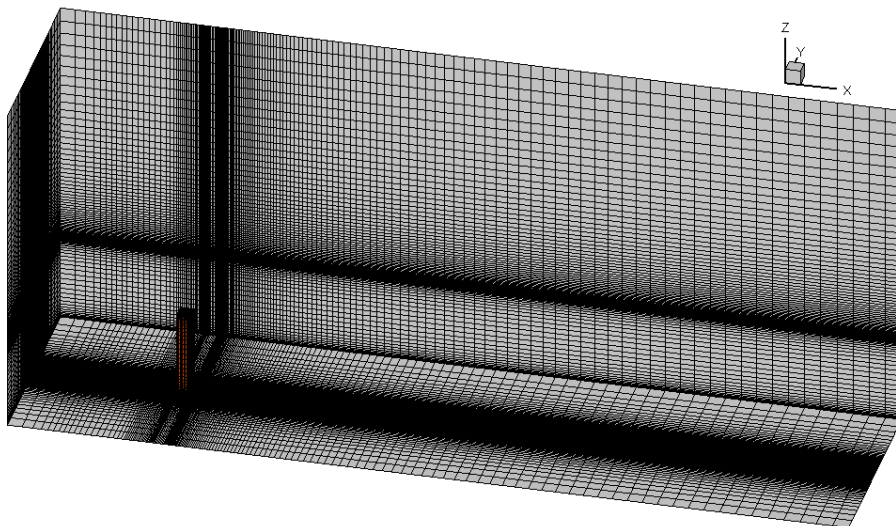


圖 4-20 計算網格圖

資料來源：本研究繪製

二、流場比較

圖 4-21 為 2 種紊流產生法在入流面($x/H=-3$)處的渦度等值圖，可以看出 RFG 法僅在近地表處的渦度因地表剪力的關係有較大值，但在較高位置的渦度值近乎於零。反觀 MDSRG 法結果，近地表因紊流強度較強的關係，也看到較強的渦度能量集中在地表面。紊流能量主要集中在在邊界層半高處($z/\delta=0.5$)附近，更高位置的紊流能量則逐漸消散。

另觀察建築中心 ($y/D=0$)位置的 x - y 切面渦度場圖(圖 4-22)可以發現，RFG 法無法在建築上游位置呈現合理的渦度能量，相較於 MDSRFG 法，所形成的尾流區範圍較小。此外，建築後方的渦流尺度較大，能量也較明顯。而在 MDSRFG 的結果部分，可以看出大氣邊界層的紊流能量自入流產生起，可以維持至建築物區域而沒有明顯的消散，所形成的風場與 RFG 法所呈現的不同。顯見入流邊界層的處理方式，對於 CFD 預測建築附近的風場甚至於風力風壓的評估方面，均會有巨大的影響。

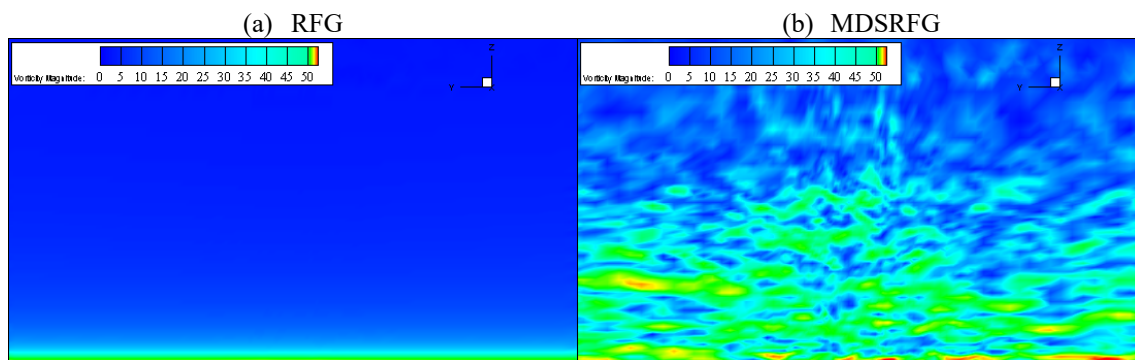


圖 4-21 紊流產生法於入流面之渦度比較圖($x/H=-3$)

資料來源：本研究繪製

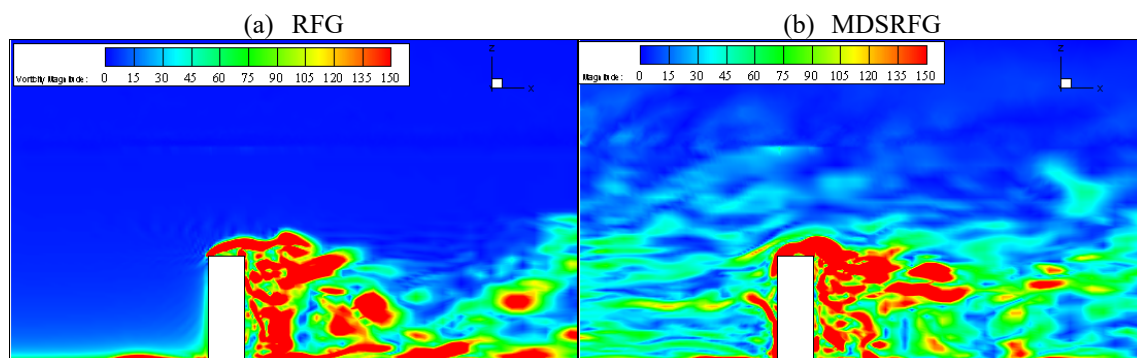


圖 4-22 紊流產生法於建築中心切面之渦度比較圖($y/D=0$)

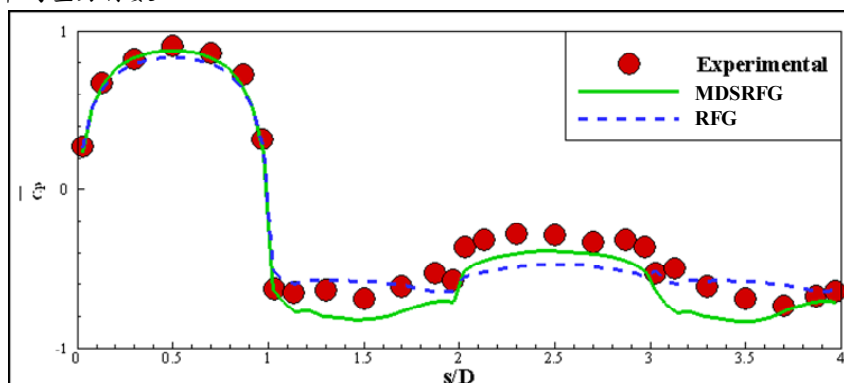
資料來源：本研究繪製

三、風壓係數比較

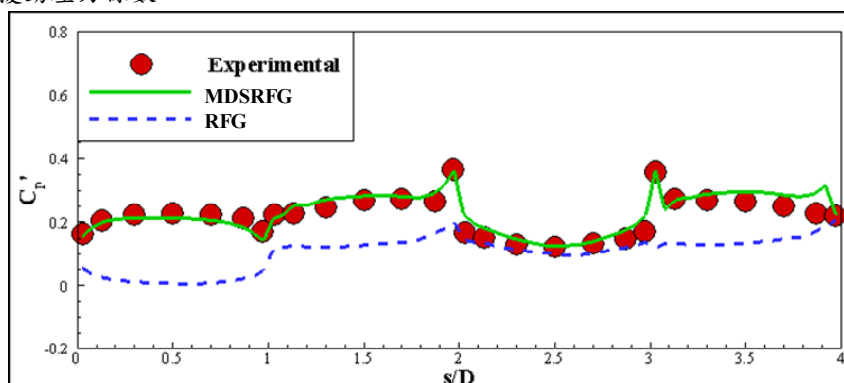
另取建築高 $z=2/3H$ 位置處的表面平均及擾動風壓係數進行比較(圖 4-23)。在平均壓力係數部分，RFG 與 MDSRFG 基本上在迎風面位置($0 < s/D < 1$)與實驗值相當接近，但在側風面位置($1 < s/D < 2$ 、 $3 < s/D < 4$)，2 種方法在負壓值都有低估的狀況。而在背風面($0 < s/D < 1$)RFG 有高估的情形，MDSRFG 法則是有低估的狀況。但整體看來，MDSRFG 法的趨勢與實驗值相當一致，但 RFG 法在側風面與背風面的壓力並沒有顯著的差異。

在擾動壓力係數部分，可以顯示出 MDSRFG 的優勢。無論是在迎風面、側風面、背風面等部分，RFG 法很明顯地低估。主要是因為來流的紊流擾動沒有辦法準確的模擬，並無法合理的模擬出建築表面所受的擾動壓力。尤其是迎風面與側風面，直接受到來流紊流特性所影響，其結果相對是較差的。相對的，MDSRFG 法的來流模擬與風洞實驗所產生的大氣邊界層紊流特性相當一致，使得流場擾動能量能夠傳遞至建築表面，提高迎風面擾動壓力的模擬精度。同樣的，由於來流紊流對於高層建築側面形成的渦流分離現象有一定程度的影響，使得側風面的負壓區擾動也因為來流紊流改變而產生變化。

(a) 平均壓力係數



(b) 擾動壓力係數

圖 4-23 紊流產生法建築表面壓力比較圖($z=2/3H$)

資料來源：本研究繪製

四、風力係數比較

將建築表面風壓作面積積分後，可以獲得風力係數，風力係數相關定義請參照公式(4-2)-(4-6)。表 4-1 為風洞實驗量測結果對 2 種紊流產生法的風力係數比較結果。從平均風力係數($\overline{C_{Fx}}$ 、 $\overline{C_{Fy}}$)可以看出，RFG 法有明顯高估的狀況。雖然 MDSRFG 也有類似的情形，但其值會更貼近實驗值一些。

而在順風向的擾動風壓係數部分(C'_{Fx} 、 C'_{My})，RFG 法的結果明顯遠低於實驗值，僅不到實驗值的 30%。MDSRFG 法的模擬結果則可達實驗值的 74%-77%。在橫風向部分(C'_{Fy} 、 C'_{Mx})，基本上 RFG 跟 MDSRFG 法的結果都有高估的現象，但因為 RFG 法的來流紊流能量低，相對擾

動較低，對於側面渦流的形成以及維持完整性是較有利的，因此 RFG 結果會比實驗值要來得大。而 MDSRFG 法在橫風向的風力預測就更貼近實驗值，其誤差不超過 8 %。

在擾動扭轉向風力係數(C'_{Mz})部分，同樣的，RFG 的結果明顯低估，僅有實驗值的 38 %。而在 MDSRFG 法部分，模擬結果可達到實驗值的 71 %，可以清楚看到邊界層入流改變對風力係數的影響。

表 4-1 紊流產生法之風力係數表比較表

	$\overline{C_{Fx}}$	$\overline{C_{My}}$	C'_{Fx}	C'_{Fy}	C'_{Mx}	C'_{My}	C'_{Mz}
實驗值	0.853	0.471	0.203	0.229	0.12	0.111	0.048
RFG (與實驗百分比值)	1.117 (131%)	0.594 (126%)	0.054 (26%)	0.2615 (114%)	0.115 (96%)	0.026 (23%)	0.018 (38%)
MDSRFG (與實驗百分比值)	0.975 (114%)	0.525 (111%)	0.151 (74%)	0.248 (108%)	0.121 (101%)	0.085 (77%)	0.034 (71%)

資料來源：本研究製作

五、風力頻譜比較

在進行建築物耐風設計時，除了風力係數外，結構風載重頻譜對於結構設計至關重要。圖 4-24 至圖 4-26 分別為順風向 x、橫風向 y、垂直向 z 為扭轉軸之風力頻譜，透過與實驗值比較，了解紊流產生法對其之影響。

在 C_{Mx} 風力頻譜部分(圖 4-24)，可以看出因為在建築物 2 側發展的週期性渦流分離現象，使得該頻譜有一個明顯的主頻落在無因次頻率(fD/U_0)等於 0.08 附近。雖然 RFG 的結果在主頻處呈現類似的現象，但其頻譜相對屬於窄頻(narrowband)，能量較為集中且大。但在離開主頻位置的區域後，其能量與實驗值差距較大，明顯低估。而 MDSRFG 法

的模擬結果，除了在低頻區略有低估外，基本上與實驗值相當一致。

在 C_{My} 風力頻譜部分(圖 4-25)，整體看來屬於寬頻(broadband)分布，MDSRFG 結果整體看來與實驗值頗為吻合，僅在中間頻率區域略有低估。RFG 模擬結果則與實驗值差距甚大，雖然趨勢類似但頻譜能量明顯遠低於實驗值，此結果也同時呼應擾動風力低估的結果。

在 C_{Mz} 風力頻譜部分(圖 4-26)，其頻譜有 2 個峰值，分別在無因次頻率為 0.08 以及 0.4，MDSRFG 模擬結果的峰值與實驗值相當接近，惟其頻譜能量略有低估。而 RFG 的結果明顯低估，尤其是在低頻區的能量，與實驗值有相當大的落差。

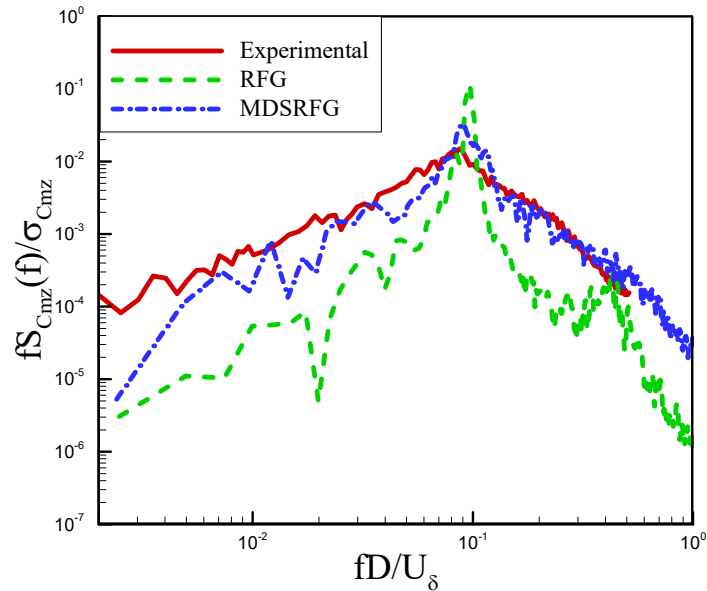


圖 4-24 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{Mx})

資料來源：本研究繪製

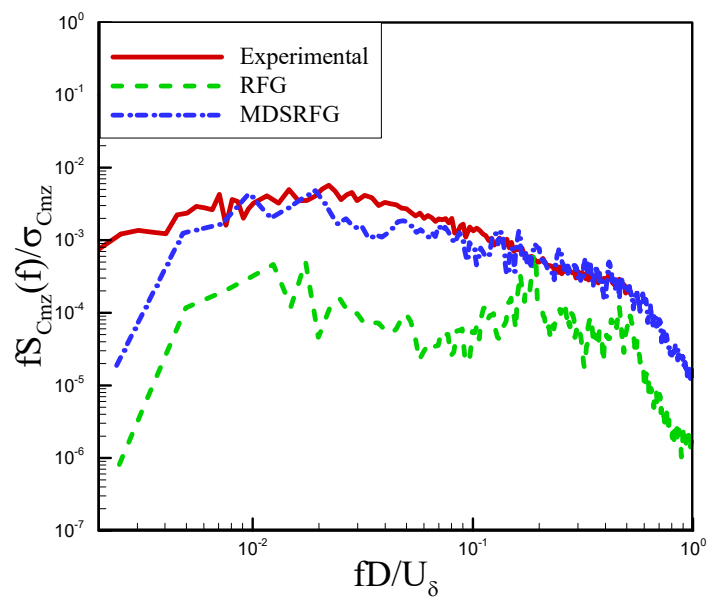


圖 4-25 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{My})

資料來源：本研究繪製

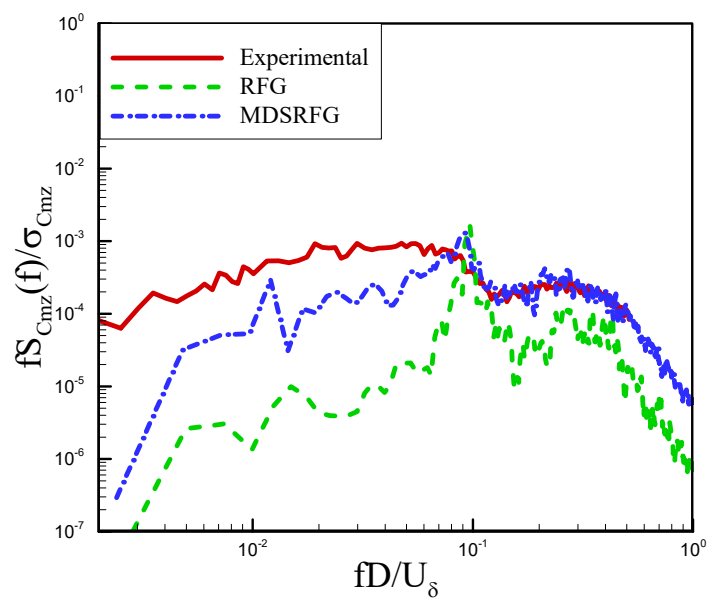


圖 4-26 紊流產生法之風力頻譜比較圖(C_{Mz})

資料來源：本研究繪製

第三節 AR 可視化技術建立

一、VTK 可視化結果

在初步測試階段，本研究採用 VTK 進行 AR 及流場可視化的整合呈現。其步驟為：(1)先透過 ArUco 分析影像，取得目前相機相對於建築的位置；(2)再將相機位姿(Pose)分配給 VTK 內的相機，分析所需載入的資料後進行串流；(3)最後使用 VTK 內建函式繪製壓力等值面、流線等流場常見的觀察模式。

圖 4-27 為利用 VTK 進行建築表面壓力，我們從影片可以看出利用條碼定位後相機追蹤的效果相當不錯，AR 呈現的圖像投射在模型上，在模型或鏡頭移動後也都追蹤得很穩定。圖 4-28 為以 VTK 做切面壓力等值圖之 AR 可視化結果，與前面的結果相同，切面顯示的可以有效投射到實體模型上，但切面等值圖影像會有些不穩定，可能是目前串流處理上尚未優化的原因。

同時檢視流線 VR 可視化結果(圖 4-29)可以發現，周圍流線能夠被顯示出來，但發現非常靠近建築物附近的流線會有穿透建築物的現象。判斷可能是因為流場資料庫，在建築內部空間風速被不合理的內插出來，使得流線位置定位不正確。不過本階段測試主要是測試 AR 模型定位，故暫不處理 VTK 資料格式問題，後續會在 FLTK+OpenGL 時解決此問題。

另在速度向量 AR 可視化部分(圖 4-30)，本段輸入資料為暫態，可以看出在尾流以及建築兩側速度向量隨時間在變動，但是幅度很小。由於外圍風速為均勻且較大，速度箭頭亦較密集，使得流場觀測並不容易。後續可視化選單終將不採用全場的速度量，僅在切面中提供速度向量選項。



圖 4-27 以 VTK 做建築表面壓力 AR 可視化

資料來源：本研究製作

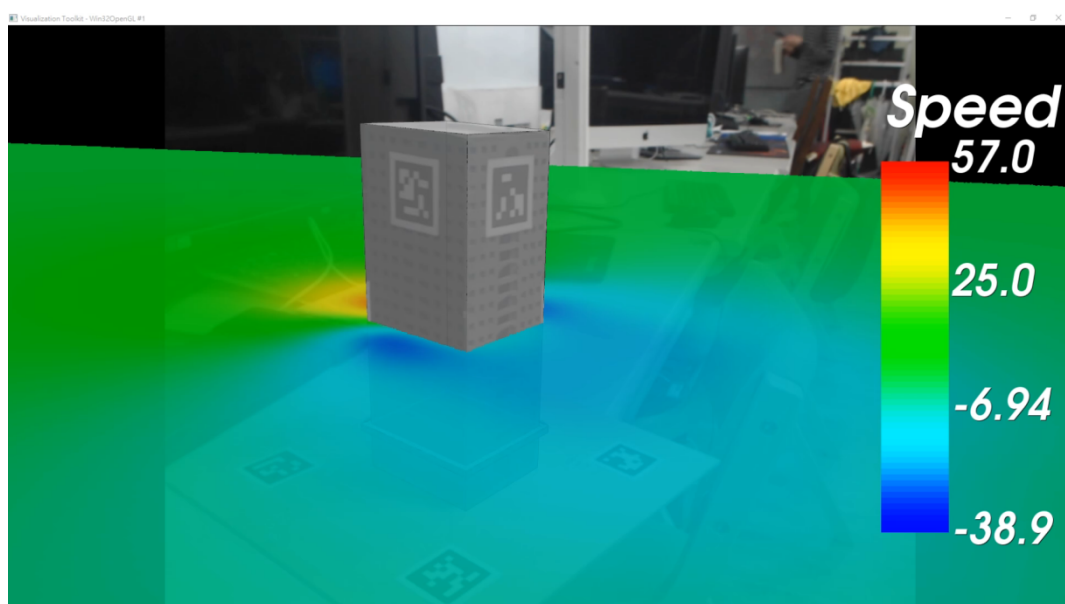


圖 4-28 以 VTK 做切面壓力等值圖之 AR 可視化

資料來源：本研究製作

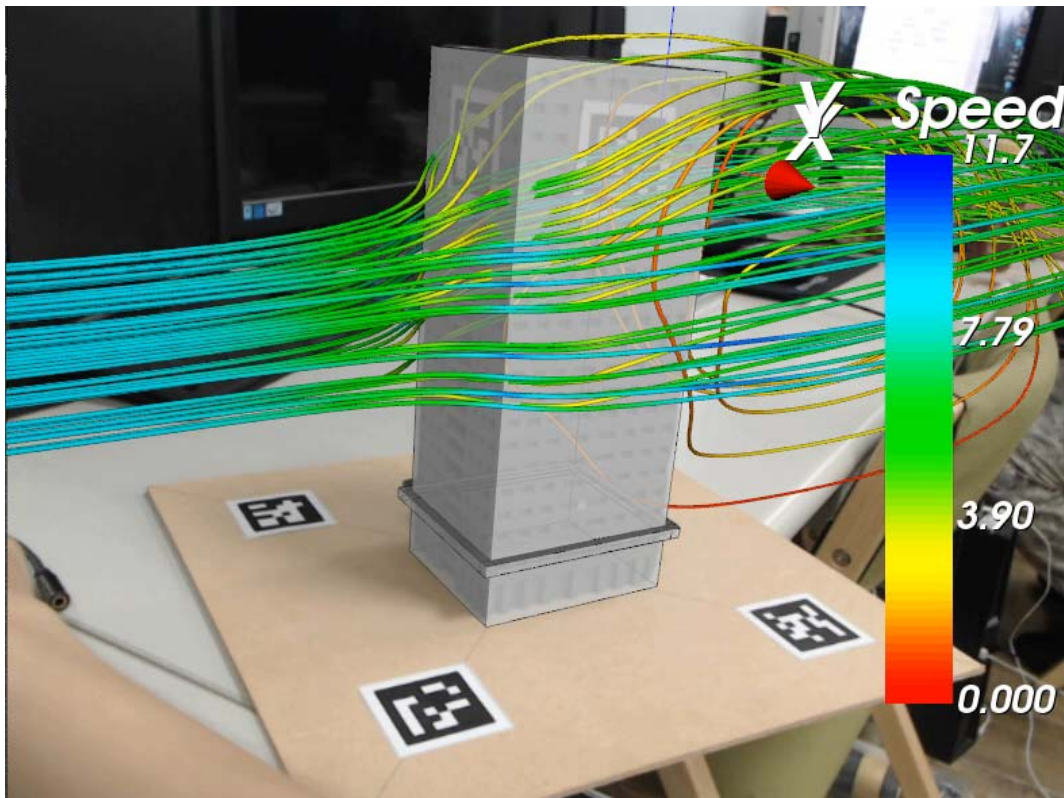


圖 4-29 以 VTK 做建築物周圍之流線 AR 可視化

資料來源：本研究製作



圖 4-30 以 VTK 做建築周圍速度向量 AR 可視化

資料來源：本研究製作

二、FLTK+OpenGL 可視化結果

除了 VTK 測試外，本研究主要針對 FLTK+OpenGL 的 AR 可視化方案架構 AR 可視化技術。FLTK 部分經過測試，目前也能順利於建築表面上繪製平均壓力資料(圖 4-31)，在空間切面上的等值圖亦可以同樣的方式處理，後續測試及建構之工作有：

- (1) 在該框架裡實現底層 Octree；
- (2) 流場資料串流以及最佳化；
- (3) 渦度等值面 AR 可視化功能；
- (4) Q 準則等值面 AR 可視化功能；
- (5) 流線 AR 可視化功能。

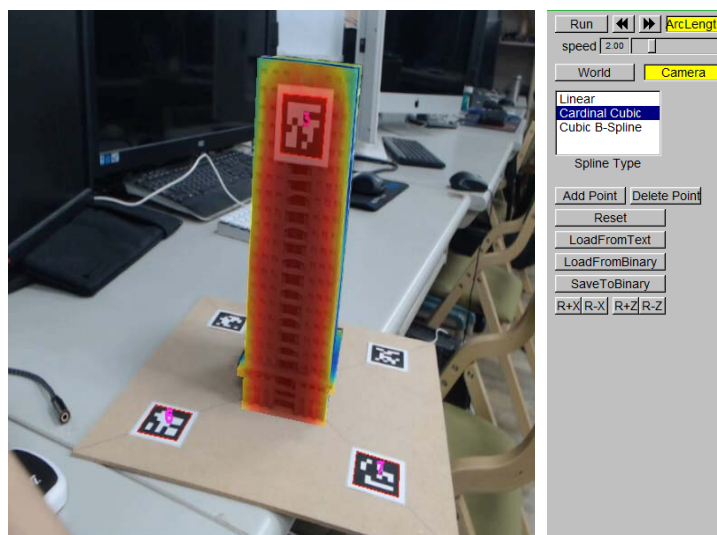


圖 4-31 以 FLTK 繪製建築壓力表面及其 GUI

資料來源：本研究製作

本研究為使用者提供了簡易的顯示結果切換功能與細節調整，在畫面中即時渲染出疊加在鏡頭所照到真實建築模型上的壓力、流線、等值

面等資料。以流線為例，其選單如圖 4-31 所示，先選擇動態流線(dynamic streamline)或穩態流線(steady streamline)，接著決定流線釋放起始範圍、條數等資訊。表面壓力與等值面設定界面亦採用類似方式進行設定，各項功能對應的詳細設定可參考圖 4-32 所示。

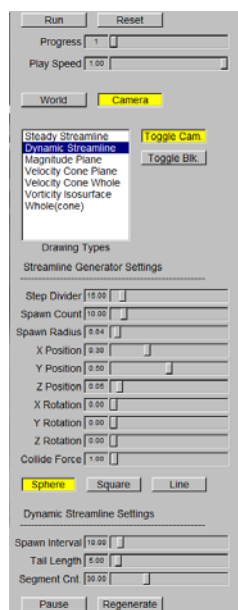


圖 4-32 流線之功能選單示意圖

資料來源：本研究製作

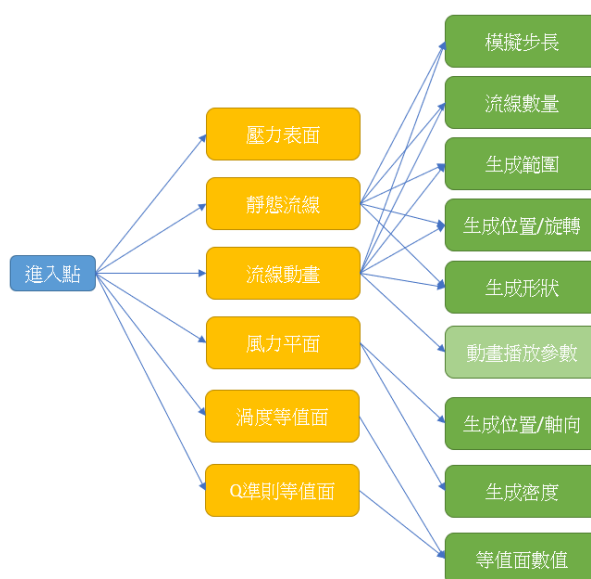


圖 4-33 流線之功能對應參數示意圖

資料來源：本研究製作

(1) 表面及切面等值圖

建築表面風壓以及空間切面等值圖的部分，建築表面風壓透過將建築 3D 位置傳入片元著色器(Fragment Shader)，並在每個片元繪製時，透過在載入之八元樹區塊中即時採樣壓力資料的方式，來繪製表面風壓資料。同樣的方法也應用於切面等值圖部分，採用三線性插值(Trilinear Interpolation)方法，主要是用於在一個 3D 的立方體中，通過給定頂點的數值然後計算立方體中任意其他點的數值的線性插值。圖 4-34 為鏡頭影像與風壓、風速資料的片元整合結果，可以看出表面壓力影像與實體模型位置定位呈現相當吻合，後續將進一步測試態資料載入時的順暢度。

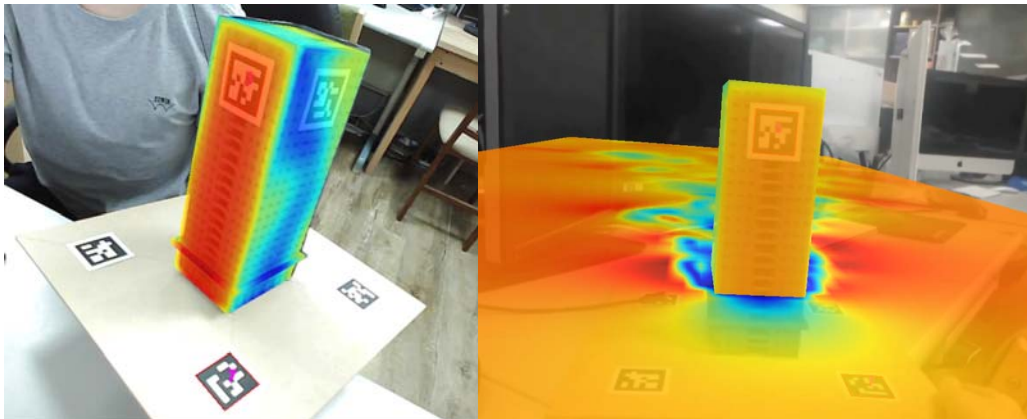


圖 4-34 建築表面壓壓力與切面風速 AR 可視化結果

資料來源：本研究拍攝

(2) 流線

流線的部分，本系統提供了基本的靜態流線模擬和循環的流線動畫繪製，在計算著色器中(Compute Shader)分散計算每條流線在八元樹流場區塊中透過 Runge Kutta 積分出的結果。流線模擬的一個目標是從給定的力計算加速度，速度和位移。它通過對運動方程進行數值積分來實

現。計算運動方程的最簡單的數值積分方法是歐拉方法。而 Runge-Kutta 方法是一種數值積分技術，可以更好地近似運動方程。與以一定間隔計算一個斜率的歐拉方法不同，Runge-Kutta 會計算四個不同的斜率並將其用作加權平均值。

本研究另外也提供了可調整流線起始點形狀、位置、大小、積分步長的選項，如圖 4-35 所示，流線可以清楚的描繪在建築周圍。

在採用非結構系統匯入流場資料庫以建立可視化 AR 影像時，將流場資訊內插至 Octree 區塊因無法明確定義出建築表面及內部格點所在區域，會造成建築內部流場風速非零的狀況，使得流線在積分後，其路徑發生穿過模型的現象。這部分所提出的解決方式為，在預處理時就先將建築內部的風向，依據垂直表面的速度給與反向值，以減少穿模的可能性。此外，後續將加入流線粗細、箭頭等選項，以增進流線的觀察性。

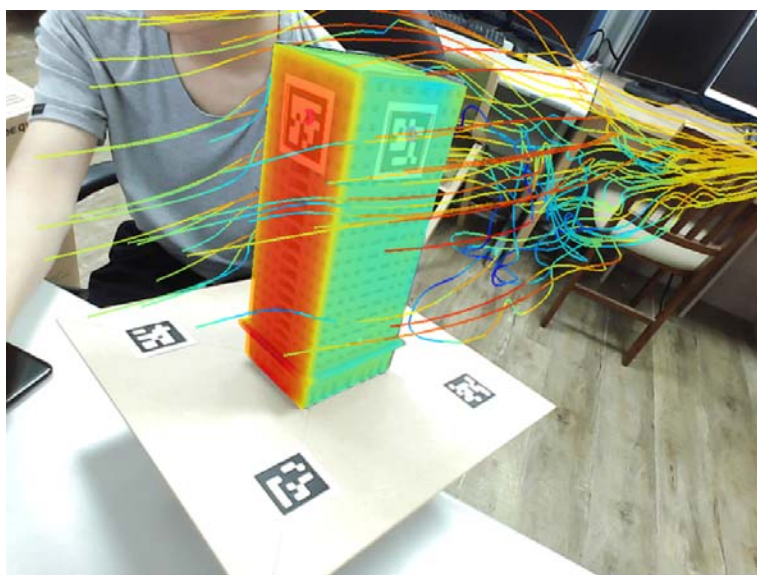


圖 4-35 流線 AR 可視化結果

資料來源：本研究拍攝

(3) 渦度等值面

渦度(Vorticity)等值面是觀察鈍形體周圍渦散現象相當好的指標，此部分採用幾何著色器(Geometry Shader)搭配行進立方法(Marching

Cube)來即時繪製所指定的渦度等值面。演算法的基本思想是逐個處理資料場中的立方體 (element)，分離出與等值面相交的立方體，採用插值計算出等值面與立方體邊的交點。根據立方體每一頂點與等值面的相對位置，將等值面與立方體邊的交點按一定方式連接生成等值面，作為等值面在該立方體內的一個逼近值來表示。

其中，Marching Cubes 的基本假設為沿六面體邊的數據場呈連續性變化。如果一條邊的兩個頂點分別大於或小於等值面的值，則在該條邊上有且僅有一點是這條邊與等值面的交點。直觀地說，就是用許多小正方體去對空間進行切分，然後用小正方體內部的平面來近似表示當前的等值面。小正方體的數量越多，逼近的效果越好，隨之帶來的是計算的代價。

此外，加入了豐式著色法(Phong Shading)來強化使用者的觀看體驗。圖 4-36 為採用渦度為 800 時的等值面，可以看出呈現的效果相當不錯。與流線計算時面對同樣的問題，透過 Octree 區塊所取樣出的渦度值，可能會受建築內部的內插值影響，而造成建築周邊渦度值不準確的問題。這部分後續考慮在匯入資料庫時，直接將渦度值作為參數輸入，以供使用者切換使用以觀測渦流特性。



圖 4-36 渦度等值面可視化結果

資料來源：本研究拍攝

三、程式運作流程

(1) 前處理流程

前處理工作主要透過輸入流場檔案及建築 Obj 檔案，在重新採樣為八元樹後輸出至資料庫，其流程如圖 4-37。

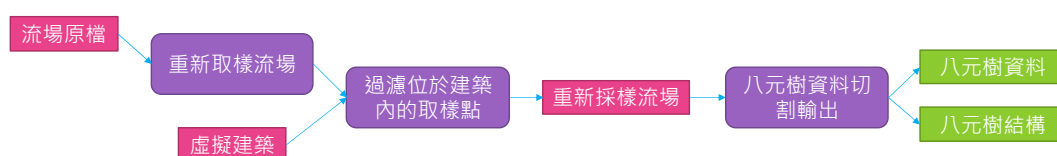


圖 4-37 前處理運作流程

資料來源：本研究製作

(2) 伺服器端流程

伺服器端會讀取資料庫中的流場資料，並透過網路接收請求來回傳對應檔案的區塊資料給客戶端，其流程如圖 4-38。



圖 4-38 伺服器端運作流程

資料來源：本研究製作

(3) AR 校正流程

AR 校正可分為鏡頭校正及標記地圖掃描。在鏡頭校正部分，透過掃描固定排列的標記板來確定相機的外參。另在標記地圖掃描部分，透過掃描自訂的標記分布來輸出參考用的標記地圖，其相關流程如見圖 4-39。

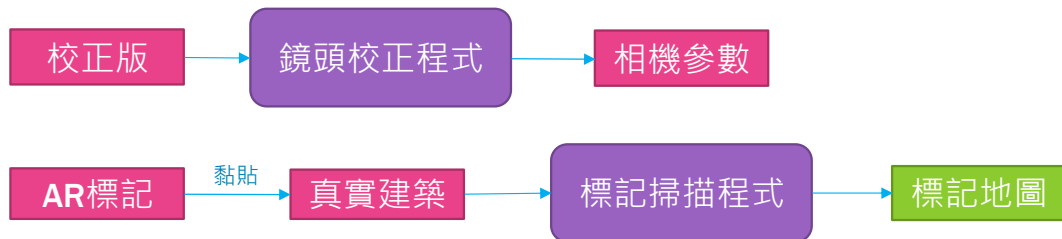


圖 4-39 AR 校正流程

資料來源：本研究製作

(4) 客戶端運作流程

客戶端主要功能為透過讀取標記地圖及相機畫面，計算出目前相機位置，並向伺服器請求尚未載入的區塊，最後將想觀察的流場功能繪製於畫面上，其流程如圖 4-40。

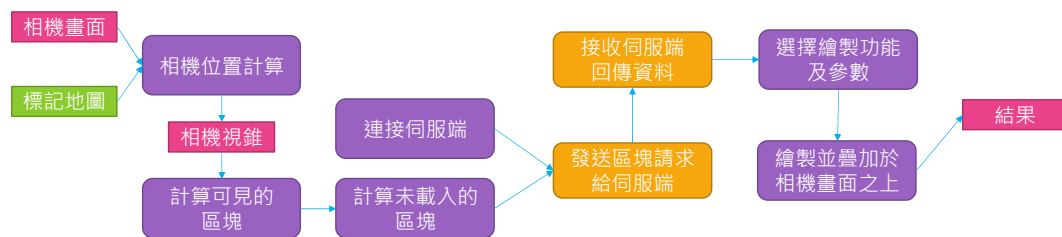


圖 4-40 客戶端運作流程

資料來源：本研究製作

四、系統程式介面

本研究所架構之系統分為 3 大部分，如圖 4-37 所示，分別為風場資料庫建置、伺服器軟體、用戶端軟體。伺服器主設備主要工作包含匯入 CFD 模擬所建置之風場資料庫，透過資料轉換軟體進行插分計算分配空間資訊，以及以格網方式建立所需的影像資訊。利用筆記型電腦作為伺服器設備並建立 WiFi 熱點，透過無線網路傳輸移動設備所需之影像資料。



圖 4-41 系統運作示意圖

資料來源：本研究製作

客戶端設備也就是移動設備如手機、平板，在安裝客戶端 APP 軟體後，利用其相機鏡頭進行模型定位追蹤，在透過選單設定後，向伺服主機提供需求並接收對應之影像資訊，本研究先以 Windows 系統之筆記型電腦做為測試設備。以下將依序針對前處理程式、伺服端程式、測試設備規格、功能選單等進行概要說明。

(1) 前處理程式

為了將原流場資料切割成方便串流使用的八元樹型式，本系統提供了專用的前處理程式，介面如圖 4-38。使用流程如下：

1. 將原流場資料按照(X Y Z Pressure U V W)的文字格式以空格隔開。
2. 輸入前處理程式，指定輸出資料夾後等待處理完畢即可。
3. 分配給伺服端準備串流。其中前處理的過程也能順帶縮減原檔的大小，處理前後的大小結果如表 4-2 所示。



圖 4-42 前處理程式介面

資料來源：本研究製作

表 4-2 資料庫大小比較

	原檔大小	重新採樣 檔案大小	八元樹檔案 大小
平均資料 (1 筆)	675MB	182MB	188MB
瞬時資料 (100 筆)	57.5GB	39.5GB	29.3GB

資料來源：本研究製作

(2) 伺服端程式

本系統在伺服器方面提供了簡便的設定及使用方式，透過 Boost 提供之網路連線函式庫 ASIO 設計。只需要將前處理程式處理完之八元樹檔案放置於指定檔案位子，並指定伺服器的 IP 位置即可使用，其 IP 位址須與伺服器所配置之區網 IP 相同(如圖 4-39)。

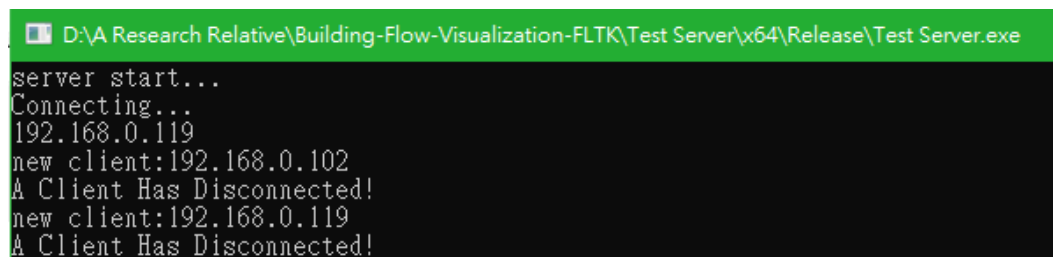


圖 4-43 伺服端介面

資料來源：本研究製作

(3) 測試設備規格

測試資料串流時，本系統採用桌機做為伺服器端及筆電做為客戶端的配置，兩者皆外接一張支援 IEEE 802.11ac 的 USB 無線網路卡，詳細規格如表 4-3。在伺服器端開啟行動熱點後，使用客戶端進行 Wifi 配對連線即可，此時只需要伺服器端的 IP 位置，開啟後處理軟體就可以進行資料的串流與可視化。

表 4-3 測試設備規格

伺服器端	CPU: Intel E3-1231 v3 GPU: Nvidia RTX2080 Ti Storage: Micron MX500 500GB Ram: 32GB DDR3 Wifi: TPLink Archer T9UH with IEEE 802.11ac
客戶端	CPU: Intel I7-4600U GPU: Intel HD Graphics 4400 Storage: SAMSUNG MZNTD256HAGL-000L9 256GB Ram: 8GB DDR3 Wifi: TPLink Archer T2U Plus with IEEE 802.11ac

(4) 功能選單說明

本研究為使用者提供了簡易的顯示結果切換功能與細節調整，在畫面中即時渲染出疊加在鏡頭所照到真實建築模型上的壓力、流線、等值面等資料。以流線為例，其選單如圖 4-32 所示，先選擇動態流線(dynamic streamline)或穩態流線(steady streamline)，接著決定流線釋放起始範圍、條數等資訊。表面壓力與等值面設定界面亦採用類似方式進行設定，各項功能對應的詳細設定流程可參考圖 4-33。

A. 共通功能

Run / Reset：切換瞬時資料的撥放進度 / 重置播放進度。

Progress：瞬時資料的播放進度條，可提供跳轉播放功能。

Play Speed：瞬時資料的播放速度，範圍從 0.01x~0.2x。

World / Camera：可切換查看相機相對於建築的角度、位置。

Toggle Cam / Blk.：切換是否在世界視角顯示視錐、已載入的八元樹。

Drawing Types：功能切換選單。

B. 流線設定

Step Divider：流線模擬的精細程度，值越大越精細，也越消耗效能。

Spawn Count：控制流線生成數量。

Spawn Radius：控制流線生成範圍。

Position：控制流線起始位置。

Rotation：控制流線起始位置旋轉角度。

Sphere / Square / Line：控制流線起始點形狀。

C. 動態流線動畫控制

(1) Visible / Invisible Length：控制流線可見比例。

(2) Animate Speed：控制線段前進速度。

D. 空間切面面設定

(1) XYZ Axis：控制切面軸向。

(2) Offset：切面在這個軸向的位置。

E. 渦度等值面設定

(1) Isosurface：控制要顯示的渦度等值面數值。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究綜合研究成果，並檢視預期成果效益後，可歸納以下幾點結論：

- (1) 在 AR 可視化技術建構部分，客戶端鏡頭追蹤採用標記式追蹤方法進行模型定位，並成功套用至不同型態之建築模型，並可對應至不同平台之客戶端設備。
- (2) 測試 VTK 可視化工具組後發現，雖其提供許多可視化工具，但並非全然符合本計畫所規劃之可視化選項，且系統龐大，可能會造成後續製作之移動設備 APP 過於龐大的問題。加上流線定位上有技術問題需要克服，故本系統採用 FLTK+OpenGL 之 AR 可視化解決方案，朝向客製化方式將 APP 做精簡處理。
- (3) 在 CFD 模擬驗證方面，本研究針對高寬比 6 之高層建築風壓實驗資料進行比對。在以 LES model 為紊流模式的暫態模擬中，採用合適的紊流來流，方可模擬出合於風洞實驗的風力、風壓結果。否則在預估設計風力上，可能會發生低估的狀況。
- (4) 在流場資料庫匯入部分，為因應不同 CFD 軟體所產出之資料，伺服器資料讀入格式主要以 ASCII 純文字檔作為輸入格式，輸入資訊主要為空間資料(x、y、z)、速度資料(u、v、w)以及壓力(p)，不需做特定排列順序。
- (5) 為因應龐大的流場資料無法全部存放於記憶體中的問題，採用了 Octree 的結構進行資料串流。其具有同時兼顧切割空間，及快速定位鄰近點的功用。在運行時可透過鏡頭可見之範圍及距離，來決定動態透過硬碟或網路傳輸呈現所需之精細程度的資料，也同時節省了查找整筆資料造成運作過於緩慢的困擾。解決圖像傳輸資料過大的問題，提供使用者良好的體驗。

- (6) 為提供使用者簡易的顯示結果切換功能與細節調整，在畫面中即時渲染出疊加在鏡頭所照到真實建築模型上的壓力、流線、等值面等資料，採用對應之函數模組，呈現良好的即時動態效果。

第三節 建議

建議一

立即可行建議：應用 AR 可視化系統提升風洞實驗室技術以及服務

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣科技大學台灣建築科技中心、社團法人中華民國風工程學會

除了本計畫完成後，除移交 3 組 AR 模型以及對應之風場資料庫外，後續本團隊可透過教育訓練，協助本所實驗室同仁完成自行建構 AR 可視化模型。包含實體模型建立、數位模型建立、CFD 模擬資料庫建立以及匯入，乃至於伺服器與移動設備端的連線配對等完整流程。除有利於本所風洞實驗室之技術層面提升外，亦可提供相關服務，增加檢測案之誘因。

此外，對於國內風工程之推廣教育，提供一良好之工具以及平台。讓使用者透過本程式系統，建立各類 3D AR 模型。建議可針對建築業界、大專院校或教育相關產業進行推廣，讓建築風工程教育除觸及更廣，並向下扎根，採用更具親和力且友善的教具，協助教育或建築從業人員說明風害現象，讓風工程知識更普及以提高國人對風災的重視。

建議二

中長期建議：AR 可視化技術精進

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣科技大學台灣建築科技中心、台灣科技大學資訊工程學系

本年度計畫先以標記式追蹤方法進行 AR 模型定位，完善整體 AR 可視化之技術面問題。但對於實體模型本身，二維條碼標記的存在具有其突兀感。建議未來採用色彩標記式追蹤進行開發，或是可以針對模型的特定記號進行追蹤，以自然的方式整合實體模型定位。

將本年度開發之 AR 可視化技術做延伸，套用至實體建築之 AR 可視化技術，並開發建築特徵標記追蹤技術。除了建築外流場之外，亦可建立實體建築室內通風 AR 可視化技術，將其納入建築資訊模型的一環，以強化視覺化之技術。

附錄一 採購評選會議意見回應

項次	審查委員意見	研究團隊回應
1	本研究除了探討風場可視化外，對建築物在風場內之受風反應及表面風力大小分佈可視化之應用情形，請再說明。	本研究目前鎖定於 AR 建築為不可動之狀況進行流場可視化，暫不考慮受風反應之流固耦合現象。而建築表面風壓部分，在規劃之後處理選單已被納入。
2	利用 CFD 透過風洞試驗比對，再和擴增實境結合呈現瞬時風場之可視化結果實用且可行，希望對風工程具有推廣及應用價值。	感謝委員肯定。
3	風洞實驗的 CFD 模擬，可提供完整逐時之空間中各項物理資訊，但在模擬過程中，LES 大渦模擬之運算結果有可能與風洞實驗結果有所差距，是否需修正？修正至何種程度才可滿意？請說明	目前大渦模擬是國際計算風工程界肯定可以有效並合理計算出結構受風特性的紊流模型，本研究團隊亦採用本模式發表多項研究成果，並進行相關分析後發現，風力風壓的誤差可以控制在 20% 以內，風場則可控制在 10% 以內。 誠然，CFD 模擬的準確與否與相關參數的設定有直接關係，本研究將參考國際上之 CFD 模擬準則，如 AIJ(日本)及 COST(歐盟)，針對模擬參數進行探討以及建議。
4	利用 CFD 模擬建置之風場資訊，透過 AR 虛擬實境軟體整合至實體建築模型，招標文件中要求建立 3 種 AR 專用之建築模型，其中代表性建築群貴團隊預定以何建築群為標的？研究計畫並未敘明？是否依招標文件建議以台北 101 大樓附近建築群為標的？至於大跨度屋蓋建築(大巨蛋)預定採用何建築？	本研究擬定 3 種 AR 專用建築模型分別為：(1)高寬比為 6 之典型方形高層建築；(2)大跨度屋蓋建築部分選定大巨蛋為標的；(3)國內代表性建築群選定以台北 101 大樓為中心，480 公尺見方範圍內之建築群。

5	貴團隊於評選項目「創意或自由回饋項目」於服務建議書內並未特別列出，是否以 OpenFOAM 軟體在 128 核心以內的分散計算(招標文件未要求)，以呈現良好的線性加速效果為回饋項目？	本研究有關「創意或自由回饋項目」部分，除了採用 OpenFOAM 於高速電腦中心進行高效平行運算，讓 CFD 模擬工作時程縮短。另在 AR 模型的相機追蹤技術上進行技術拓展，提供穩定及精確的模型追蹤技術，以及圖形資料傳輸至客戶端的資料串流技術。
6	本案經費 130 萬元，而貴團隊經費列 132 萬元，是否應再調整？	會依規定調整預算至 130 萬元。
7	以 3 種 AR 建築模型模擬案例，若能增加或後續擴充，可提供更準確數值供工程實務界參考。	本研究提供 3 組 AR 專用模型，並進行相關模型實驗與 CFD 資料庫建置。亦提供完整伺服端與客戶端軟體以及使用說明書，後續使用者可以依需求建置 AR 模型，擴充更多的案例提供工程實務界參考。
8	請說明 CFD 模擬與風洞試驗間誤差管控問題。	本研究團隊採用 LES 方法進行 CFD 模擬，與風洞實驗量測結果比對分析並發表多項研究成果，也發現 CFD 模擬的準確與否與相關參數的設定有直接關係。因此，除了風洞實驗結果的比對之外，另將參考國際上之 CFD 模擬準則，針對模擬參數進行探討以及建議。詳細內容會在後續研究成果中補充說明。
9	本研究將針對 3 組建築模型進行 CFD 模擬，模擬結果如何確認其正確性，是否會與其他現場量測或實驗結果做比較，請說明。	本研究所建立的 3 組 AR 模型將於建研所風洞實驗室進行試驗，並與 CFD 模擬結果進行比對分析。另參考國際上之 CFD 模擬準則，針對模擬參數進行探討以及建議。

10	本研究建立之後處理資訊，除供 unity 遊戲引擎使用，是否也可供其他軟體使用，以擴大應用成果。	本計畫所規畫之可視化工具並不限定 unity 遊戲引擎，所開發之軟體套件將內嵌對應之可視化引擎，提供完整之應用功能。
11	簡報中提及可用所開發之 App 讓民眾觀看模擬結果，目前將呈現的資料內容除流場外，是否包括壓力、切面速度和渦度等，請說明。	本研究提供之後處理資訊，規劃除流場之流線、渦度等值面、切面速度和壓力以及建築表面壓力等資訊，之後計畫進行後，亦可依據需求加入。
12	日本株式會社於 107 年即研發風環境 VR 可視化系統，廠商可著予考量整體成果呈現是否朝該系統模式來建置。	感謝委員建議，AR 與 VR 在本質上雖有些類似，但相對 AR 環境開發，VR 的虛實整合技術難度是較高的。日本株式會社的風環境 VR 可視化系統對於本研究應有相當大的參考價值，本團隊將蒐集其系統資訊，並參考其介面選單作為本系統開發之範本。
13	請針對標記追蹤法再詳加說明。	基於標記的追蹤法需要識別特定標記，如擴增實境工具組 (ARToolkit)、擴增實境戳 (ARTag)、同心圓戳 (Concentric Circles Tags, C2 Tags)、容投影戳 (Projective Invariant Tag, Pi-Tag)，及可校方格碼 (Error-correcting Grid Codes) 以估算相機相對於其所屬平面的姿態，詳細內容以及所採用之方法將於後續研究成果中說明。
14	伺服端及客戶端軟體之類別為何？	為求資料讀取與傳輸的穩定性，伺服端軟體採用 linux 版本開發。客戶端軟體則求跨平台支援，因此會開發 android 以及 IOS 版本提供使用。
15	請提出本技術服務的成本、人力及收費，目前客戶端（政府、審查委員會、申請者）詳細資料與分析。	本技術服務目前重點在 CFD 資料庫的建置，需要專業人員操作以及高速運算設備，相關成本需要進一步估算。目標客戶目前鎖

		定建築業界、都市設計審議委員會、教育工作者等。另將蒐集相關資訊，了解客戶群需求以及願意付出之成本後說明。
16	風場模擬之建築物模型請用 BIM 建置，再結合unity 及相關 AR 軟體。	由於 BIM 軟體如 Revit、Tekla 等系統龐大，所涵蓋之資訊眾多。本研究擬採用最小化開發，提供獨立軟體以供使用。建築物模型建置不限制 CAE 軟體，只要該軟體可以提供對應的 3D 模型即可匯入。
17	CFD 和風洞試驗容許誤差應釐定一定合理範圍，以昭公信。	本研究團隊採用 LES 方法進行 CFD 模擬，與風洞實驗量測結果比對分析並發表多項研究成果，也發現 CFD 模擬的準確與否與相關參數的設定有直接關係。因此，除了風洞實驗結果的比對之外，另將參考國際上之 CFD 模擬準則，針對模擬參數進行探討以及建議。

附錄二 第一次專家座談會意見與回應

委員	審查意見	研究團隊回應
蕭葆義 教授	1. 本研究在紊流模型部分選用 LES，與目前常見之 RANS 之差異為何？選用的原因？ 2. 在匯入伺服端資料庫時，輸出格式應適用於各種不同 CFD 軟體，並提供通用且標準化格式。 3. 建議在本研究中提出計算風工程相應之 CFD 模擬準則，並予以推廣。 4. AR 定位方式在產業界是否有標準？ 5. 本研究由 CFD 資料與 AR 擴增實境結合，再進化至科普教育，值得肯定。	1. 紊流模型的理論十分複雜，但簡單來說，LES 是基於空間平均的假設，RANS 是基於空間以及時間的假設。因此，RANS 的計算時間較短，但在流場及風力的預測上在某些特定流況中會有缺陷，且無法獲得擾動速度以及極值。LES 相對耗費的時間較長，但相對於直接模擬 (DNS)，是目前模擬建築風力極值的可實現模型。在本研究中，動於風洞實驗的大氣邊界層流場下 2. 初步擬定以 ASCII 格式匯入，輸入各節點之空間座標 x、y、z，物理資訊包含速度 u、v、w 以及壓力 p。匯入時不需針對節點做特定排列，另於伺服軟體裝進行空間值內插，應可適用於各類模擬軟體。 3. 本人於建研所先前的研究案中，針對以 RANS model 之風環境模擬，整理相關準則。本年度擬參考先前成果，加入 LES model 的建議。 4. 定位方式標準主要在方便性及準確性上做取捨，依應用不同會採用不同的技術標準。

		5. 感謝肯定。
李宗霖 教授	1. 本研究在相機鏡頭觀察中結合 AR 技術，類似建築繪圖中加入渲染效果，以呈現流場運動之結果。 2. RFG 與 MDSRFG 模擬驗證中，風壓分布比較之點過大，請修正。 3. 本研究在不同移動設備中，如何處理相機解析度不同的問題，是否對於鏡頭追蹤造成影響？	1. 誠如委員說明，AR 是將鏡頭中實際影像加入渲染效果，以呈現流場可視化。 2. 將修正比較圖。 3. 標記追蹤主要採用特徵點偵測。在校正完標記位置後，相機解析度基本上不會影響鏡頭追蹤。
林文欽 教授	1. 在鏡頭追蹤技術上，是否可以考慮移除二維條碼，採用內嵌式信號進行模型定位？ 2. 建議資料儲存部分可以採用精簡方式，減少儲存量，不足部分用內插補足資料即可。 3. 透過本技術開發，建議未來可以在實場量測、風洞實驗、CFD 三方技術整合，進行圖像虛實整合研究。 4. 本研究所呈現之模擬時間步長是多少？ 5. 請補充風洞試驗之縮尺以及對應之實場尺寸。 6. AR 資料庫除了以 OpenFoam 之格式匯入外，應擴充對應至其他軟體。	1. 現已有研究如何使用自訂色彩格式的標記，以配合建築整體觀感。另在內嵌式信號或模型本體特徵偵測部分，可列為後續研究方向。 2. 目前的資料會切分成不同精細度的區塊存儲於伺服器，管理上可以決定最後要捨棄多精細的資料。 3. 感謝委員寶貴建議，整合實場量測、CFD、風洞實驗為風工程界相當重要且需要資源龐大，期盼未來能有建研所支持來持續推動研究。 4. 在目前影像動畫呈現方面，60 FPS 已能提供相當好的體驗。實驗尺度之 CFD 模擬需要解析高頻率且小尺度的紊流，瞬態模擬時間步長為 0.0001 秒。在部分輸出的情況下，製作動畫輸出約為 100 FPS。 5. 高寬比 6 之建築模型實驗之

		實驗縮尺為 1/270，邊界層厚度為 1.3 m，在開闊地況的入流情形下，指數為 0.15。相關資訊後續將補充於研究報告中。 6. 初步擬定以 ASCII 格式匯入，輸入各節點之空間座標 x、y、z，物理資訊包含速度 u、v、w 以及壓力 p。匯入時不需針對節點做特定排列，另於伺服軟體裝進行空間值內插，應可適用於各類模擬軟體。
王文安 教授	1. 相對於開源套裝軟體，商用軟體在模擬精度上應較高，且開源軟體可能在某些審查狀況下不被承認，應注意此問題。 2. 如 CFD 模擬驗證結果不如預期，應如何修正？ 3. AR 模型選定應著重在行人風環境的檢視，因此周遭建築應被完整建置，於此狀況下模型定位技術是否能有完善的解決方案？ 4. 101 大樓周遭模擬範圍的選定為 1.5 km²，其原因為何？	1. 感謝委員提醒，誠然，專用型商用軟體以及泛用型開源軟體各有其優缺點。OpenFoam 是目前國際上使用相當高的 CFD 軟體，其缺點主要是缺乏 GUI 介面，學習門檻較高。正因為其開源的特性，許多開發者、學者擴充其功能並發表在社群中，並定期改版。除提供新功能外，在眾人合力除錯下，使得開源軟體更新較商業軟體快之外，也使得其運作愈趨於穩定且快速。且本研究所應用開發之紊流產生法，也可整合至其邊界條件中。加上在高速運算的支援下，選用本軟體可解決本研所需完成之技術。 2. 鎖定 101 大樓在 1/500 的縮尺下，高度約為 1 公尺的風洞模型下。因建研所風洞第一測試段寬度為 4 公尺，故針對實場 1.5 km² 之範圍在風洞為 3 m²，以符合風洞實驗設

		定。
林士勛 教授	1. 建築表面粗糙度是否會影響模擬實際建築的流場與風力比較結果？ 2. 質點追蹤之流場可視化模擬，質點是否會影響流場？	1. 基本上在縮尺模擬(包含CFD、風洞實驗)中，會將實際建築中為小細節做出步簡化。雖然表面粗糙度會影響氣流運動，但基本上粗糙表面會增加流體動能的耗散，使得光滑表面的模擬結果較為保守，其結果對於工程評估是正面的。 2. 本研究所採用徑線的概念來實現質點可視化技術，在解出的瞬間流場中，持續追蹤某空間位置釋放出的質點路徑，因此對於流場步會造成影響。
陳建忠 組長	1. 目前採用二維條碼定位實體 3D 模型，是否能考量開發在無特定外觀記號下，呈現鏡頭追蹤技術？ 2. 本研究除了深度研究外，同時考慮廣度部分，也就是科普部分同時開發，以增加本研究的亮點。 3. 增加模擬個案大巨蛋、101 大樓興建時之風環境、風力評估之背景說明。	1. 無特定外觀記號鏡頭追蹤需採用其他技術，目前非記號追蹤技術研究發展仍不純熟，容易有追蹤不穩定的問題。 2. 感謝建議，本研究在 CFD 紊流產生法以及風洞實驗驗證中，加強技術開發。此外相機追蹤技術以及 FLTK、影像順暢傳輸的開發部分，也是研究深度需要加強的部分。另在 APP 開發到科普應用部分，也是本研究需要加強的重點。 3. 將收集相關資料，加強背景說明。

郭建源 副研究員	1. 建議 APP 軟體之操作介面要有一定的美感。 2. 操作介面的選項以及名詞定義要有普遍性，讓一般民眾容易上手。 3. APP 軟體容量建議不要太大，避免下載流量問題。	1. 本團隊會儘力呈現 APP 之美感。 2. 相關名詞除學術定義外，會在 APP 中加入普及之說明，以利使用者了解。 3. 遵示辦理。
----------	--	--

附錄三 期中審查會意見與回應

委員	審查意見	研究團隊回應
紀志旻 委員	1. 本案開發之 AR 應用程式 (App) 為通用或僅供貴所風洞使用? 客戶端的介面, 屬於專用介面還是通用介面? 需要輸入何種資料? 2. AR 可視化輸出介面, 應顯示物理量單位。 3. 建議後續研究加入複雜路徑的模型, 例如造型遮陽或貫穿通道。	1. 本研究開發 windows 介面之軟體, 不局限於建研所風洞實驗室。客戶端介面為利用 FLTK 專屬開發出之介面, 並可利用各類型 CFD 軟體產出流場資料後匯入伺服器端。 2. 感謝建議, 將於介面中呈現。 3. 後續將建立信義區之建築群模型, 以提供複雜路徑之 AR 可視化效果。
劉玉雯 教授	1. 建築物表面材料及粗糙度是否影響模擬建物的流場? 2. 本計畫開發之應用程式 (App), 其資料庫容量及儲存技術, 請詳細說明。	1. 建材表面粗糙度會造成突出尺度相等之渦流, 進而影響流場變化。所幸其尺度相對於建築量體為極小之尺度, 對於整體流場變化影響有限, 且對於風環境流場或建築風壓力會形成能量損耗, 以平滑方式模擬之結果會略為保守。 2. 感謝建議, 將於期末報告中加入相關資訊。
賴映宇 技師	1. 建議可思考風洞試驗及各 CFD 模擬軟體整合至 APP 的可能性。	1. 本系統可適用各類 CFD 軟體輸出資料, 風洞實驗資料如果可以獲得整場資料, 亦可加以應用。
蔡明修 教授	1. 為因應龐大的流場資料無法全部存放於記憶體中的問題, 此研究採用了遊戲引擎技術 Octree 的結構	1. 感謝肯定。 2. 3D 模型定位方式目前採用 QRCode 方案, 未來定位之演算法將朝向彩繪玻璃或建築

	進行資料串流。具同時兼顧切割空間，及快速定位鄰近點功用，是一重要突破。 2. 虛擬 3D 模型定位之機制應可透過演算法之方式再簡化，以降低使用者之技術門檻。 3. AR 應用於流場展示之技術，國際上已陸續發展，請說明本計畫之技術與相關應用之主要區隔與創新之處。 4. 本計畫以計算流體力學及大型風洞實驗之相關使用者為主要分析對象，透過詳細之系統分析(system analysis)方式釐清使用者對 AR 視覺化之真實系統需求(requirements)。建議後續可針對使用者需求進行關鍵功能的開發，增加此研究的附加價值。 5. AR 與 VR 在工程上應有其不同之應用情境。對工程之特性而言，AR 之強項應在於能將虛擬之資訊帶到工程案場，讓工程人員可以方便在真實空間中，套疊工程資訊。建議可以本計畫之技術基礎，進一步探討此技術在大型實際風場之實際應用。	特徵方式進行。 3. 目前國際上 AR 應用於流場展示之技術主要鎖定在平面標記點追蹤，實體模型並不存在的狀況，投放流場影像呈現。本研究採用之 3D 模型追蹤技術，相較於前述之方法難度更高，且讓使用者有更完整的虛實整合感受。 4. 感謝建議，初步架構之系統操作流程會與建研所相關人員討論，針對使用者需求進行關鍵功能的開發。 5. 感謝建議，後續研究將朝此方向進行，應用至實尺寸之風場觀測。
王宇睿 總經理	1. 本研究主要開發流場可視化應用程式(App)，使用性是關鍵重點，採 QR code 定位之必要性如何？是否可採其他定位技術。	1. 本其研究先以建構整體系統架構來進行開發，故先以 QR code 定位方式來追蹤模型。未來將朝彩繪玻璃或建築特徵點進行追蹤定位開發，目

	2. 大量處理資料,AR 展現動態流線等情況下,須確保使用者不斷移動及變換視角時,程式仍可正常運作。 3. 本案僅著重 AR,VR 應用之可行性如何。	前不在本年工作範圍內。 2. 本系統採用遊戲引擎技術 Octree 的結構進行資料串流。具同時兼顧切割空間,及快速定位鄰近點功用,應能解決此問題。 3. VR 雖然可帶來更為沉浸的體驗,其缺點為需要戴上眼罩且範圍受限,而且價格較高。AR 的應用相對較為普遍,且在人手一機的狀況下,更為容易上手,故本研究採 AR 方式進行開發。
陳建忠 組長	1. 誰會使用此應用程式(App)?如果是分析或實驗上似乎不需要?如是實務設計上也未見有需求,風環境屬於本所實驗,客戶端是誰? 2. 請依所務會議之指示,研究案應說明社會需求與實務應用情形。 3. 可視化好像多此一舉。 4. 請作一份可讓研究團隊外人員瞭解之文件。	1. 本程式提供研究者一個平台,讓風工程研究或評估專家可以透過本平台展現並說明分析評估結果。客戶端指的是本系統中使用者所使用的顯示設備,如平板電腦、手機等。 2. 遵示辦理。 3. 由於風無法直接觀察其特性,透過可視化可提供完整資訊,可進一步了解建築強風或受風破壞之機制,尋求有效的解決對策。 4. 將在成果報告中擬訂相關使用手冊,讓本系統能夠有效應用。
王安強 副所長	1. 這個案子產生出來的應用程式(App)是個案或通案?如為通案可申請專利權;若是個案,對於行銷本所風洞實驗室亦有實質幫助。 2. 報告中的 3 個案例,是基於什麼背景或考量做選	1. 本驗開發出的系統軟體,可套用至自行建置之 CFD 模擬結果以及對應之實體模型,應是屬於通案。如需協助申請專利,本團隊樂意配合。 2. 3 種案例主要考量不同的建築形態形成之流場特性

	擇?	
陳總經理郁潔	1. 整合 AR 技術及 CFD 模擬已呈現風洞流場可視化，提供專屬應用程式(APP)與配套之建築模型。 2. 應用大渦流模式(LES)及高速運算技術於建築風環境及風力風壓模擬中，提升我國 CFD 模擬技術與國際接軌。 3. 相鄰建築物之互制效應與長週期建築物(柔性結構)氣彈互制振動行為是否可以 CFD 模擬並由 AR 呈現?	1. 感謝肯定。 2. 感謝肯定。 3. 目前 AR 可視化技術應用於固定模型之狀況，如要應用至氣彈互制行為，需對應實體模型與模擬資料庫對應之位移，有一定之難度，但可納入未來研究之目標。

附錄三 期末審查會意見與回應

委員	審查意見	研究團隊回應
陳若華教授	1. 本計畫研究成果對於風工程推廣及建立風場性質影像具有很大的助益，甚具貢獻度。 2. 建議進一步探討更多型式之結構物(如橋梁或橋板)之氣動反應。 3. 可否應用於人行風場或大尺度的污染物濃度擴散？建議考量。	1. 感謝肯定。 2. 本研究建構一個整合實體模型與 CFD 可視化的平台，使用者可以自行建立 AR 模型資料庫，後續亦可應用於更多型式的結構物。 3. 行人風場需要整合 CFD 模擬結果與氣象資料，以計算出評估區間，而汙染擴散模擬需要有汙染物的濃度值。只要載入資料提供相關資訊，本系統均可顯示相關資訊。
陳郁潔總經理	1. 於實務上執行 CFD 模擬並整合 AR 技術所花費的時間估計為何？風洞試驗執行 CFD 模擬約需時 1.5 個月，是否能配合時間點同時提出結果？ 2. 流場可視化技術應用於非矩形幾何建築，其結果及演示效能是否相同？	1. 本研究之模擬時程為 3 個案例所需的時間，以及模擬驗證、測試、比較等工作，中間包含數據處理及轉換之時間。如以示範建築建立流場資料庫，由模型建置到模擬資料庫建置完成，僅需 1 周時間，對於應用端應屬可接受範圍。 2. 本研究所規劃的 3 組 AR 模型，包含大巨蛋以及信義區建築模型群，均屬於非矩形之幾何建築，其操作效果亦相當流暢。
陳啟中建築師	1. 建議提供 101 大樓及大巨蛋立體環境評估、結構設計風洞試驗之資料比較。 2. 未來可朝向與 3D 列印模	1. 本研究現階段先以 AR 可是化平台為主，CFD 模擬驗證初步針對方形高層建築來進行。未來可提出相關研究，針對既有之風洞評估結果做

	型、BIM 軟體結合，擴大其使用性。	CFD 模擬比對，確認 CFD 模擬參數以及開發數值風洞技術。 2. 本研究之大巨蛋模型乃採用 3D 列印，後續可採用委員建議將 AR 可視化成果與 BIM 軟體結合，擴展使用範圍。
蔡明修教授	1. 本研究報告之 AR 應用於流場可視化技術揭露較少(如：資料架構、格式等相關資訊)，建議專章說明。 2. 關於 AR app 之可用作業系統平台(如：ios、android)適用性，建議補充說明。 3. 研究成果不宜以服務之方向進行推廣，建議以演算法分享、開放軟體之方向進行，使本計畫研究成果成為後續研究、應用之基礎。	1. 感謝建議，成果報告將加強說明 AR 流場可視化技術，並以專章說明。 2. 成果報告將補充說明各平台之硬體適用性，以及軟體適用版本。 3. 初步構想為建研所或本團隊以本軟體提供相關服務，在演算法分享、開放軟體部分，擬於報告書說明流程，並提供所採用的函式庫以及相關連結方式來分享。
陳建忠組長	1. 請說明本研究案之效益，及後續可發展之研究方向。	1. 本研究對於國內風工程之推廣教育，提供一良好之工具以及平台。讓使用者透過本程式系統，建立各類 3D AR 模型。建議可針對建築業界、大專院校或教育相關產業進行推廣，讓建築風工程教育除觸及更廣，並向下扎根，採用更具親和力且友善的教具，協助教育或建築從業人員說明風害現象，讓風工程知識更普及以提高國人對風災的重視。 2. 未來可採用色彩標記式追蹤進行開發，或是可以針對模型的特定記號進行追蹤，以自然的方式整合實體模型定

		位。可將開發之 AR 可視化技術做延伸，套用至實體建築之 AR 可視化技術，並開發建築特徵標記追蹤技術。除了建築外流場之外，亦可建立實體建築室內通風 AR 可視化技術，將其納入建築資訊模型的一環，以強化視覺化之技術。
王安強副所 長	1. 本研究成果對於應用上及實驗室檢測展示方面有相當助益，請評估申請專利之可行性。	1. 將與所內有經驗單位研究申請專利的可行性。

附錄五 軟體安裝及操作手冊

在 BuildingFlowVisualization 系統軟體中，會附上 5 個資料夾，分別為：

1. ArucoCalibration- 相機校正程式；
2. Markermapper- 標記地圖掃描程式；
3. Preprocessor- 預處理程式；
4. Server- 伺服器端軟體；
5. Client- 客戶端軟體。

其中，1-4 項安裝於伺服器端硬體，第 5 項安裝於客戶端硬體。

一、規格需求

伺服器建議規格：

Disk：SSD 512GB 以上

CPU：I7 4770 以上

Ram：16G 以上

Wifi：支援 IEEE 802.11ac 以上的無線網卡

GPU：無特殊要求

鏡頭：1280x960 以上 60FPS

客戶端建議規格：

Disk：無特殊要求

CPU：I5 4500 以上

Ram：8G 以上

整合擴增實境 AR 及 CFD 以建構風洞實驗室流場可視化技術研究

Wifi：支援 IEEE 802.11ac 以上的無線網卡

GPU：Intel® UHD Graphics 630 以上

鏡頭：1280x960 以上 60FPS 以上

二、軟體使用說明

1. ArucoCalibration 相機校正程式



圖 a5-1 相機校正程式

功能說明：

在使用新設備拍攝前都需要校正一次相機參數。

使用方法：

- (1)印出或在另一個螢幕開啟 `aruco_calibration_grid_board_a4.pdf`，並開啟 `cmd`(命令提示字元)。
- (2)輸入指令: `aruco_calibration.exe live:0 markerset-cam.yml -s 0.045`。
- (3)按 `a` 開始截圖，至少需要十張不同視角的相片，拍攝完後按 `ESC` 離開即完成相機參數校正。

參數說明：

`live:0`：相機編號

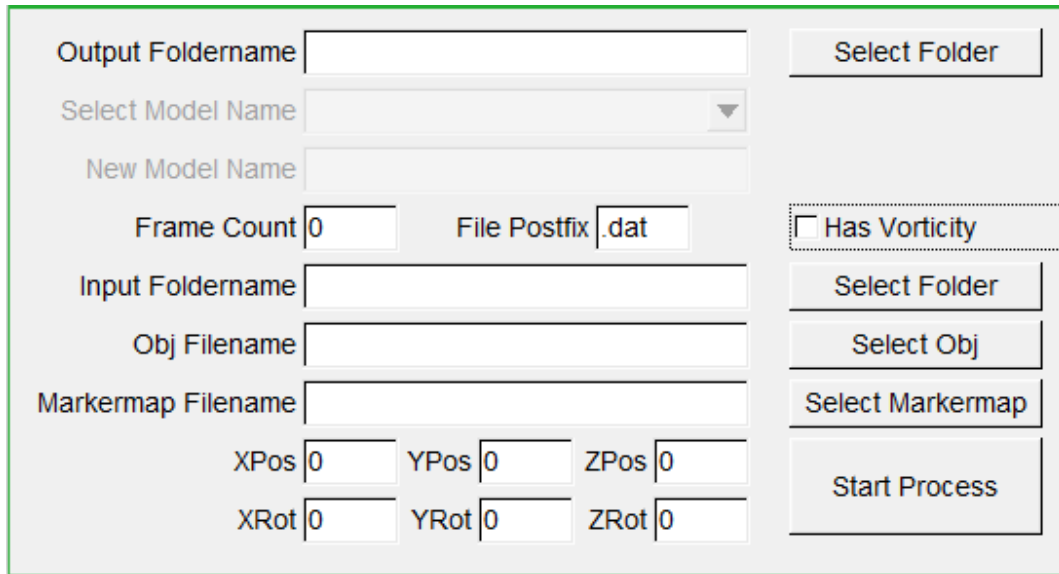
markerset-cam.yml：輸入檔名

-s：標記真實世界尺寸(公尺)，不計入白邊。如-s 0.08 標記為 0.08 公尺。

-ref 0：參考點，掃描出來的模型位置會以此 Marker 作為原點。

-d ARUCO_MIP_36h12 -noshow：不須更動。

2. Preprocessor 預處理程式



The screenshot shows a software interface for a preprocessor. It includes the following elements:

- Output Foldername**: A text input field with a **Select Folder** button next to it.
- Select Model Name**: A dropdown menu.
- New Model Name**: A text input field.
- Frame Count**: A text input field with the value '0'.
- File Postfix**: A text input field with the value '.dat'.
- Has Vorticity**: A checkbox that is currently unchecked.
- Input Foldername**: A text input field with a **Select Folder** button next to it.
- Obj Filename**: A text input field with a **Select Obj** button next to it.
- Markermap Filename**: A text input field with a **Select Markermap** button next to it.
- Position and Rotation Fields**: A grid of text input fields for XPos, YPos, ZPos, XRot, YRot, and ZRot, all currently set to '0'.
- Start Process**: A large button at the bottom right.

圖 a5-2 程式介面

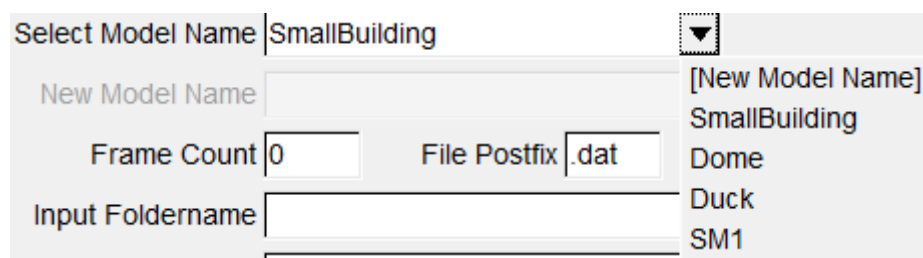
功能說明：

輸入點集必須是結構化排列的形式，並去除標頭檔資訊只留下數字資訊，每筆點資料使用換行隔開，可支援 7 個數字(X Y Z Pressure I J K) 或 8 個數字(X Y Z Pressure Vorticity I J K)的排列。

使用方法：

- (1) Output Foldername(資料庫輸出的路徑)：此欄位必選，可任意指定空資料夾進行存放，第一次選擇時會建立 database 文件，往後 Server 進行讀取的時候會依照 database 文件的存在與否判斷是否為正確資料庫路徑。
- (2) Select Model Name(選擇實體模型名稱)：若資料庫存在，在選擇資料庫後會讀取資料庫內的模型名稱並列出，可選擇現有模型或新建模

型專案名稱。



- (3) New Model Name(新建實體模型名稱)：若處理的資料為新模型則可以指定新專案名稱儲存。
- (4) Frame Count(資料筆數)：資料編號從 1 開始計算，若有 10 筆資料則輸入 10(ex:Input Foldername 為 Fire，則資料編號為 Fire1、Fire2、Fire3...Fire10)
- (5) File Postfix(資料副檔名)：資料的副檔名，如果輸出資料有副檔名則輸入在此欄位，若無則留空即可。
- (6) Has Vorticity(是否包含渦度資料)：若無包含渦度資料則不須勾選此格子，為相容性所需。
- (7) Input Foldername(輸入資料路徑)：資料夾名稱必須與資料相同(ex:Fire/ Fire1、Fire2、Fire3...Fire10)
- (8) Obj Filename(虛擬模型檔案)：需要與實體建築對應的虛擬模型檔案來切割流場資料。
- (9) Markermap Filename(標記地圖檔案)：已掃描完畢的標記地圖。
- (10) XPos...XRot...等(偏移參數)：若模擬資料時有進行旋轉或位移可在此進行調整，一般情況下不需調整。

3. Server 伺服端連線程式

```
server start...
Please type server ip:
140.118.127.50
Setting up server...
Starting server from ip: 140.118.127.50
...
Finding database...
Enter database path:
D:\A Research Relative\Stream Data Cut File
Database Found!
Server Starting!
```

圖 a5-3 伺服器端程式介面

功能說明：

輸入伺服器 IP 及資料庫所在路徑即可運行 Server。

4. Client 客戶端程式

A. 共通功能

- (1) Run / Reset：切換瞬時資料的撥放進度 / 重置播放進度。
- (2) Progress：瞬時資料的播放進度條，可提供跳轉播放功能。
- (3) Play Speed：瞬時資料的播放速度，範圍從 0.01x~0.2x。
- (4) World / Camera：可切換查看相機相對於建築的角度、位置。
- (5) Toggle Cam / Blk.：切換是否在世界視角顯示視錐、已載入的八元樹。
- (6) Drawing Types：功能切換選單。

B. 流線設定

- (1) Step Divider：流線模擬的精細程度，值越大越精細，也越消耗效能。
- (2) Spawn Count：控制流線生成數量。
- (3) Spawn Radius：控制流線生成範圍。
- (4) Position：控制流線起始位置。

- (5) Rotation：控制流線起始位置旋轉角度。
- (6) Collide Force：控制流線進入建築物的容許程度，值越大則向外推力越大。
- (7) Sphere / Square / Line：控制流線起始點形狀。

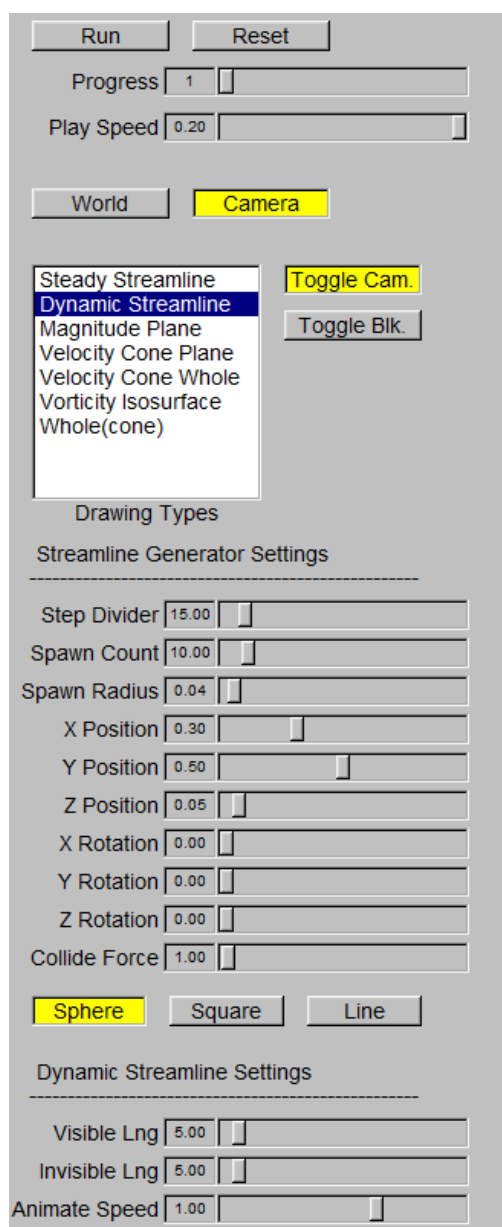


圖 a5-4 流線之功能選單示意圖

C.動態流線動畫控制

(1) Visible / Invisible Length：控制流線可見比例。

(2) Animate Speed：控制線段前進速度。

D.切面設定

(1) XYZ Axis：控制切面軸向。

(2) Offset：切面在這個軸向的位置。

E.渦度等值面設定

(1) Isosurface：控制要顯示的渦度等值面數值

F.切換模型設定

(1) Switch Model Adjustment：調整建築相對於參考標記的位移。

(2) Update adjustment to server：上傳調整完的參考到伺服器。

(3) Select Camera：選擇前/後鏡頭。

(4) Select Model To Watch：選擇想觀看的建築。

(5) Select Stream Data：選擇想觀看的流場資料。

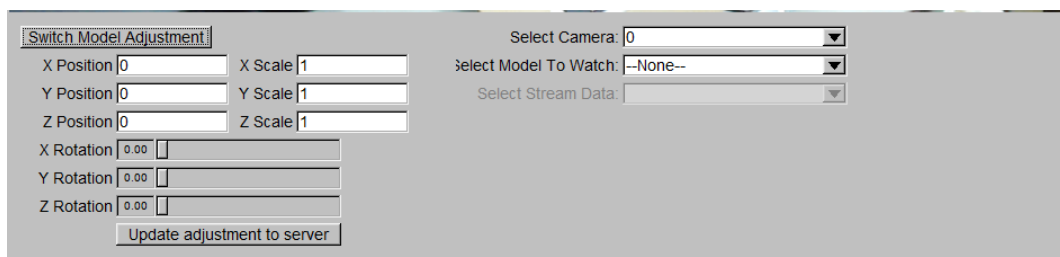


圖 a5-6 切換模型設定示意圖

整合擴增實境 AR 及 CFD 以建構風洞實驗室流場可視化技術研究

參考文獻

1. 中華民國風工程學會，1997，「風工程理論與應用」，科技圖書。
2. 朱佳仁，2006，「風工程概論」，科技圖書。
3. 劉文欽，2006，「建置本所風洞之煙流可視化技術」，內政部建築研究所自行研究報告
4. Cermak, J. E. and Arya, S. P. S. 1970, Problems of atmospheric shear flow and their laboratory simulation. *Boundary Layer Meteorology*, I, pp.40-60.
5. Davenport, A.G. and Isyumov, N., 1967, The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading, *Proceedings of International Research Seminar, Wind Effects on Buildings and Structures*, pp.210-230.
6. ESDU, 1982, Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part I mean-hourly wind speeds. ESDU Data Item NO.8026, Engineering Sciences Data Unit, London, 51P.
7. Wang, X. 2007. "Using augmented reality to plan virtual construction work site," *Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 501-512.
8. MacIntyre, B., Hill, A., Rouzati, H., Gandy, M. and Davidson, B. 2011. "The argon arweb browser and standards-based ar application environment," in 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 65-74, Oct 2011.
9. Gee, A. P., Webb, M., Escamilla-Ambrosio, J., Mayol-Cuevas, W. and Calway, A. 2011. "A topometric system for wide area augmented reality," *Computers & Graphics*, vol. 35, no. 4, pp. 854-868.
10. Li, W. K., Nee, A. Y. C. and Ong, S. K., "A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation.", *Multimodal Technol. Interact*, 2017.1.17.
11. Zhou, F., Duh, H. B. L. and Billinghurst, M., Sep. 15-18 2008. "Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR." In M. A. Livingston, O. Bimber, and H. Saito, editors, *ISMAR' 08: Proc. 7th International Symp. on Mixed and Augmented Reality*, pp. 193–202, Cambridge, UK, IEEE CS Press. IS.

12. The VTK User's Guide 11th Edition, Kitware, Inc.
<http://www.kitware.com>.
13. Bruno, F., Caruso, F., De Napoli, L. and Muzzupappa, M. 2005. "Visualization of Industrial Engineering Data," *Journal of Visualization*, 9(3): 319-329.
14. Li, W. K. Nee, A. Y. C. and Ong, S. K. 2017. "A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation," *Multimodal Technologies Interact*, 1(3), 17-38.
15. Yao, J. W., Lin, Y. F., Zhao, Y., Yan, C., Li C. L. and Yuan, P. F. 2018. "Augmented Reality Technology based Wind Environment Visualization," *Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, Vol. 1, 369-377.
16. Heuveline, V., Ritterbusch, S. and Ronnås, S. 2011. "Augmented Reality for Urban Simulation Visualization," In *Proceedings of the first international conference on advanced communications and computation*, Barcelona, Spain, 23–28.
17. Kim, M., Yi, S. K., Jung, D. Y., Park, S. J. and Seo, D. W. 2018. "Augmented-Reality Visualization of Aerodynamics Simulation in Sustainable Cloud Computing," *Sustainability*, 10(5), 1362-1375
18. Kato, H. and Billinghurst, M. 1999. "Marker Tracking and Hmd Calibration for A Videobased Augmented Reality Conferencing System," In *Proceedings of the 2Nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, IWAR 99*, pp. 85-94.
19. Fiala, M. 2010. "Designing highly reliable ducial markers," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 1317-1324.
20. Calvet, L., Gurdjos, P. and Charvillat, V. 2012. "Camera tracking based on circular point factorization," in *ICPR 12*, pp. 2128-2131.
21. Bergamasco, F., Albarelli, A. and Torsello, A. 2011. "Image-space marker detection and recognition using projective invariants," in *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)*, 2011 International Conference on, pp. 381-388.
22. Garrido-Jurado, S., Salinas, R. M. N., Madrid-Cuevas, F. and Marin-Jimenez, M. 2014. "Automatic generation and detection of highly

- reliable fiducial markers under occlusion," *Pattern Recognition*, vol. 47, no. 6, pp. 2280-2292.
23. Irwin, H. P. A. H., 1981, "A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds". *J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, pp.219-239.
24. Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with primitive equations. *Month Weather Review* 91(3), 99-164.
25. Smirnov, R., Shi, S., Celik, I., 2001, "Random flow generation technique for large eddy simulations and particle-dynamics modeling," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, 359–371.
26. Castro, H. G., Paz, R. R., and Sonzogni, V. E. 2011, "Generation of Turbulence Inlet Velocity Conditions for Large Eddy Simulation," *Mecánica Computacional*, Vol. XXX, 2275–2288.
27. Davenport, A. G. 1968, "The dependence of wind load upon Meteorological Parameter," in *Proceedings of the International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures*, University of Toronto Press, Toronto, pp. 19-82.
28. Garrido-Jurado, R., Muñoz, S., Madrid-Cuevas, F. J. and Marín-Jiménez, M. J., 2014, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion", *Pattern Recognit*, Vol. 47(6), pp. 2280-2292.
29. Chae, S., Seo, J. H., Yang, Y. S. and Han, T. F., 2016, "ColorCodeAR: Large identifiable ColorCode-based augmented reality system." In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2016; pp. 2598–2602.
30. Nguyen, M., Tran, H., Le, H. and Yan, W. Q., 2017, "A Tile Based Colour

- Picture with Hidden QR Code for Augmented Reality and Beyond.” In: Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. VRST '17, ACM, New York, NY, USA, pp. 8:1–8:4, 2017.
31. 李政其，2017，「傻瓜運鏡：虛擬拍立得掌鏡系統」，國立台灣科技大學資訊工程研究所碩士論文。
 32. Li, C. C., Lai, Y. C., Syu, N. S., Guo, H. N., Todorov, N. and Yao, C. Y. 2017. “EZCam: WYSWYG Camera Manipulator for Path Design,” IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology, vol. 27, no. 8, pp. 1632-1646.
 33. Madgwick, S., Harrison, A. and Vaidyanathan, A. 2011. “Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm,” 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland.
 34. Google. 2015. Google cardboard. <https://arvr.google.com/cardboard/>
 35. Costantini, F., Gibson, D., Melcher, M., Schlosser, A., Spitzak B. and Sweet M., FLTK 1.3.5 Programming Manual, <https://www.fltk.org/doc-1.3/index.html>.
 36. Huang, S. H., Li, Q. S. and Wu, J. R., 2010, “A General Inflow Turbulence Generator for Large Eddy Simulation,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Vol.98, 600-617.
 37. Li, Y. C., Cheng, C. M., Lo, Y. L. and Zheng, D. Q., 2015, “Simulation of turbulent flows around a prism in suburban terrain inflow based on random flow generation method simulation,” Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamic, Vol. 146, 51-58.
 38. Schroeder, W., Martin, and K., Lorensen, B. 2107. “The visualization toolkit an object-oriented approach to 3d graphics,” 4rd eds., Kitware, ISBN 978-1-930934-19-1.