

國立中正大學資訊工程學系暨研究所
碩士論文

Department of Computer Science and Information Engineering
National Chung Cheng University
Master Thesis

基於智慧手錶的震動回饋與腕部手勢辨識之
文字訊息打字與閱讀替代方案

**alphaVib: An Alternative Texting Approach
for Smartwatch via Vibration Feedback and Wrist Recognition**

陳士茵

Shih-Yin Chen

指導教授：黃啟富 博士

Advisor: Chi-Fu Huang, Ph.D.

中華民國 一百一十四年 七月

July, 2025

基於智慧手錶的震動回饋與腕部手勢辨識之
文字訊息打字與閱讀替代方案

**alphaVib: An Alternative Texting Approach
for Smartwatch via Vibration Feedback and Wrist Recognition**

研 究 生：陳士茵

Student：Shih-Yin Chen

指導教授：黃啟富

Advisor：Chi-Fu Huang



*A Thesis
Submitted to College of Engineering
National Chung Cheng University
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Master*

*in
Computer Science and Information Engineering*

July 2025
Taiwan, Republic of China

中華民國 一百一十四年 七月

誌謝

本論文得以順利完成，首先由衷感謝指導教授黃啟富教授。老師在我研究的每個階段，不僅以專業知識悉心指導，更以嚴謹的態度引導我克服挑戰。無論是在研究方向上的深入探討，還是面對瓶頸時的引導，老師總能以睿智的見解和耐心的建議，協助我理清思路，找到解決方案。老師的悉心指導，不僅提升了我的學術研究能力，更讓我在研究過程中日漸成熟、自信，並受益匪淺。

此外，我還要誠摯感謝所有遠道而來的口試委員老師們，您們所提供的深入建議與寶貴回饋，使得本研究得以更加完善和精進。

在 MCN Lab 的這段時間裡，尤其感謝實驗室 109 至 113 屆的各位夥伴。在彼此共度的日子裡，共同面對了研究過程中的挑戰與成長。與學長姐、同儕及學弟妹之間的交流，無論是日常討論、心得分享，或是研究見解與建議，都使我在單一思維中得以獲得新的視角與啟發。我的研究生活亦因你們的陪伴與支持而更顯充實。

碩士班期間，我有幸參與 Tai CHI 研討會與 OpenHCI 工作坊。這些寶貴的機會讓我得以與各校研究生交流並分享研究成果，同時從教授與同儕獲得寶貴建議，這些經驗對我意義深遠。藉由這些短暫的相聚交流，我結識了許多優秀同儕，不僅獲得研究啟發，亦在個人生活與志趣上有所成長。此外，除了指導教授的課程，我也選修了程芙茵教授、林國欽教授和黃仁紘教授的課程。這些課程拓展了我的研究視野，受益良多。

感謝家人始終支持我求學與鼓勵我進修，並給予關懷與支持，是我求學路上堅強的後盾。

最後，謝謝所有曾經幫助過我的人，這份論文不僅是我的努力成果，亦承載了每一位支持者的力量。謝謝各位。

陳士茵 謹誌
中正大學資訊工程學系
行動計算與網路實驗室(MCN Lab)
2024 年 10 月 26 日

摘要

隨著智慧手錶的普及，在不便於透過螢幕查看訊息的情境下（例如會議、運動或觀影），如何有效接收文字訊息成為一項迫切需求。然而，智慧手錶的螢幕尺寸小，難以有效閱讀與操作；同時，頻繁取出手機查看訊息不僅動作繁瑣，在特定場合亦可能被視為不恰當行為。儘管現有的非視覺訊息閱讀方式（如語音回饋或觸覺系統）已有所發展，但仍面臨隱私與複雜性等挑戰。本研究提出一種非視覺文字訊息閱讀的替代方案，利用智慧手錶的震動回饋與手腕手勢辨識，設計一系列人機互動過程，使使用者能在無需視覺輔助下接收智慧手錶上的訊息內容。該方法無需客製化裝置，支持單手操作。此外，alphaVib 系統的設計旨在確保普通使用者也能輕易上手。

為實現文字訊息輸入與閱讀的替代方案，本研究提出一種新穎的字母與數字編碼方式。相較於現有國際通用的摩斯電碼，我們依據流行字母歌曲的旋律，將旋律中的休止符作為字母分群標準，設計出一組易於記憶與推導的編碼。alphaVib 系統結合了新式編碼表、智慧手錶的震動感知模組與手腕手勢辨識。其中，震動感知模組依據編碼表輸出特定時長與頻率的震動訊號；手腕手勢辨識則利用智慧手錶內建 IMU 傳感器中的三軸加速度計及陀螺儀數據進行融合，以判斷手腕的轉動動作。alphaVib 系統不僅使使用者能在非視覺情況下閱讀文字訊息，其新式編碼表的學習成本亦顯著低於傳統摩斯電碼。此外，手腕手勢辨識動作設計考量小幅度動作，使其適用於多種日常場景，例如運動、咖啡廳或公車上。

本文透過實驗驗證了 alphaVib 編碼實施的可行性，並探討了使用者在不同姿勢與場景下操作的影響。此外，我們亦對 alphaVib 編碼作為文字訊息輸入的可能性進行了實驗評估。實驗結果顯示，alphaVib 的字母準確度達 83.33%，較傳統摩斯電碼提升 5.86%。在學習成本方面，alphaVib 的平均學習時間相較摩斯電碼減少 87.5%。綜合以上實驗數據，證實本研究提出的替代方案適用於智慧手錶的文字訊息互動情境。

關鍵詞：非視覺、編碼、文字訊息、文字互動、資料融合、腕部手勢辨識、振動感應、智慧型手錶

Abstract

With the widespread adoption of smartwatches, effectively receiving text messages has become a pressing need in scenarios where screen viewing is inconvenient (e.g., meetings, exercising, or watching movies). However, the small screens of smartwatches make reading and operation difficult. Furthermore, frequently retrieving a smartphone for message viewing is cumbersome and inappropriate in specific settings. While existing non-visual message reading methods (such as haptic or voice feedback systems) have emerged, they still face challenges related to privacy and complexity. This study proposes an alternative solution for non-visual text message interaction, utilizing smartwatch vibration feedback and wrist gesture recognition. We design a series of human-computer interaction processes that enable users to receive and input text messages on smartwatches without visual reliance. This method requires no additional customized devices and supports single-handed operation. Moreover, the alphaVib system is designed to be easily accessible for general users.

We propose a novel encoding scheme for letters and numbers to realize this alternative solution for text message input and reading. Compared to the internationally prevalent Morse code, our approach derives from the melodies of popular alphabet songs. We use the musical rests within these melodies as a criterion for clustering letter sets and design an easy encoding to memorize and deduce. The alphaVib system integrates this new encoding table with smartwatch vibration sensing and wrist gesture recognition. The vibration sensing module outputs specific durations and frequencies of vibration signals based on the encoding table. Wrist gesture recognition utilizes the tri-axial accelerometer and gyroscope data from the smartwatches built-in IMU sensor, fusing these values to determine wrist rotation movements.

The alphaVib system not only enables users to input and read text messages non-visually but also demonstrates significantly lower learning costs for its new encoding table compared to traditional Morse code. Furthermore, the wrist gesture recognition movements are designed to

accommodate subtle actions, making them suitable for various daily scenarios such as sports, cafes, or public transport.

This paper experimentally validates the feasibility of alphaVib encoding implementation and investigates the impact of user operation in different postures and scenarios. Additionally, we experimentally evaluate the potential of alphaVib encoding for text message input. Experimental results show that alphaVib achieves an 83.33% letter accuracy, representing a 5.86% improvement over traditional Morse code. Regarding learning cost, the average learning time for alphaVib is reduced by 87.5% compared to Morse code. Based on these experimental data, we confirm that our proposed alternative solution effectively enhances smartwatches text message interaction efficiency.

Keywords: Encoding, Text Message, Text Interaction, Data Fusion, Wrist Gesture Recognition, Vibration Sensing, Smartwatch, Non-Visual

Table of Contents

口試委員會審定書	#
誌謝	ii
摘要	iii
Abstract.....	iv
Table of Contents.....	vi
List of Figures.....	viii
List of Tables	ix
Chapter 1 Introduction.....	1
Chapter 2 Related Works	4
2.1 Challenges and Existing Solutions for Text Interaction on Wearable Devices.....	4
2.2 Smartwatch Applications for Texting	4
2.3 Encoding Design and Gesture Detection.....	5
Chapter 3 System Overview	7
3.1 Research Motivation.....	7
3.2 System Scenario.....	8
3.3 System Architecture.....	9
Chapter 4 System Design.....	12
4.1 alphaVib 編碼架構設計	12
4.1.1 編碼邏輯與設計原則	12
4.1.2 振動編碼與計時機制	13
4.2 腕部手勢識別	14
4.2.1 Data Preprocessing.....	14
4.2.2 Sensor Fusion Method.....	15

4.2.3	Motion Detection	17
4.3	文字互動輸出	18
Chapter 5	Evaluation.....	21
5.1	Experimental Setup.....	21
5.1.1	Apparatus and Prototype	21
5.1.2	受試者..... 錯誤! 尚未定義書籤。	
5.2	Experimental Design and Procedure	24
5.3	Experimental Results.....	26
5.3.1	Overall Performance	27
5.3.2	Comparative Analysis of Learning Performance for Two Encoding Methods	28
5.3.3	Performance Evaluation of Type Word	30
5.3.4	Performance Evaluation of Two Encoding Methods Across Different Postures	31
5.3.5	Performance Evaluation of Two Encoding Methods Across Different Environments	32
5.3.6	Comparative Analysis of User Experience Metrics for Two Encoding Methods.....	33
Chapter 6	Conclusion	35
	Reference	36

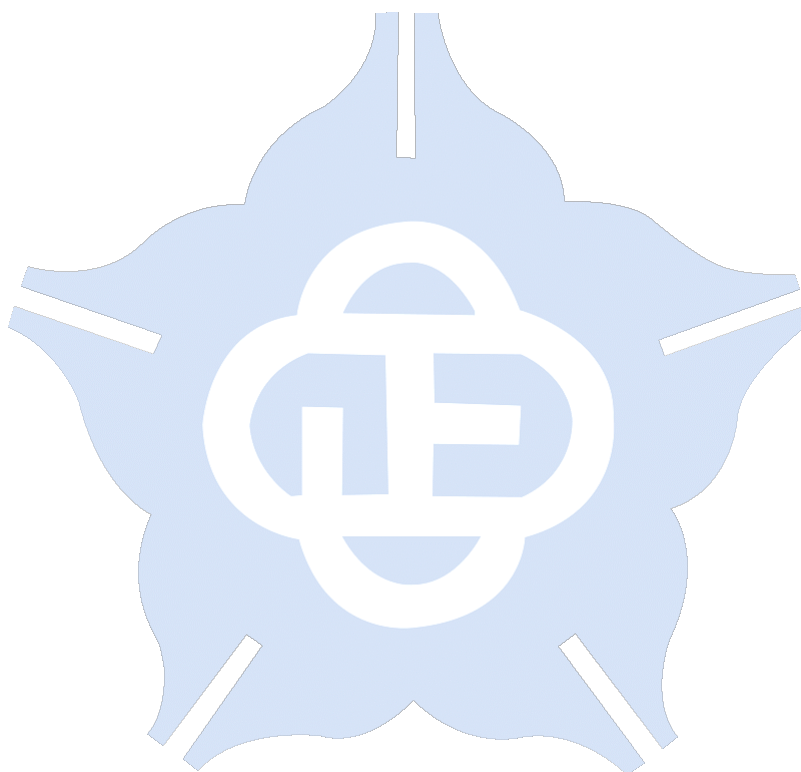
List of Figures

Figure1	系統場景應用與傳統方法之比較示意圖	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.1	實驗架設實景照片	22
Figure 5.2	Comparative Analysis of Learning Curves	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.3	Confusion Matrix for alphaVib Code.....	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.4	Confusion Matrix for Morse Code.....	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.5	Comparison of Response Times for Each Letter in Different Postures	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.6	Comparison of Response Times for Each Letter in Different Environments	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.7	SUS-Based User Ratings.....	錯誤！尚未定義書籤。
Figure 5.8	NASA-TLX-Based User Ratings	錯誤！尚未定義書籤。
Figure A.1	Comparison of Vibration Feedback: AlphaVib Code vs. Morse Code	錯誤！尚未定義書籤。
Figure A.2	Comparison of Vibration and Response Time for Letters	錯誤！尚未定義書籤。
Figure A.3	Comparison of Vibration and Response Time for Numbers	錯誤！尚未定義書籤。

List of Tables

Table B.1 Volunteers habits of reading text messages and wearing smart watches 錯誤！尚未定義書籤。

Table B.2 Personal insights on reading messages in different scenarios 錯誤！尚未定義書籤。



Chapter 1 Introduction

人與人之間，透過通訊往來的方式保持聯絡，是社會社群中人際交往保持聯繫不可或缺的一部分。而通訊軟體或社交軟體已成為現代社會人際交往的重要橋樑，人們普遍透過通訊軟體進行交流與溝通，使其成為日常生活中密不可分的工具，例如：Gmail, Line, Message, Telegram, WhatsApp 等，都會在無時無刻地推播聯絡人的傳送的簡訊通知。特別是在職場環境中，通訊軟體也成為同事間協作與溝通的必要例行公事。許多工作上的即時訊息，其具備緊急與重要性，需要立即確認與回覆處理。然而，大多數的人每日都利用生活瑣碎的時間，來閱讀簡訊訊息，保持聯絡與回應。但是，當等到自己的閒暇之餘，抽時間閱讀訊息時，有可能會耽誤收到重要訊息通知的時效性。又或是我們明確正在等待一封緊急且重要訊息的回應，但礙於身處的場所，不方便拿出智慧手機或智慧手錶瀏覽或回覆訊息，例如重要的會議上、需要手機靜音的電影廳裡，有可能會被視為打擾周邊的人的不禮貌行為，或正在運動跑步沒時間看手機的時候，自己必須一直中斷手邊事情等待瀏覽訊息的不方便。而本研究就是讓人們無論在什麼地方，做什麼事情，例如：特殊場所的會議、電影院，或是運動性質的游泳、跑步等，使用者都可以做到即時的推播訊息接收及回覆。

然而，隨著移動裝置的普及，據國際數據公司（IDC）的市場調查[1][2]，2023 年全球穿戴式裝置出貨量達 5.041 億台，預計到 2027 年將增加至 6.294 億台，複合年增長率（CAGR）為 5.0%。目前市面上的穿戴式裝置產品，包括智慧耳機、智慧眼鏡、智慧手環、智慧手錶等，其中，耳機和手錶是最受消費者歡迎的類別。尤其，智慧手錶市佔率，從 2023 年來看佔比為 31%，預計到 2027 年將上升至 32.8%。另外，伴隨科技應用正在提倡將裝置落實於人們生活中的許多用場景，其中關於智慧物聯網技術的應用，例如智慧家庭、智慧醫療等領域。由此可知，配戴智慧手錶的使用者日益漸增，其裝置已經隱然快替代智慧手機，作為人們日常生活中最便攜的裝置，人們除了可以透過智慧手錶作為輔助監測健康數據的管理系統，以及間接控制其他裝置等的操作介面，甚至還可以直接替代智慧手機，即時接電話、瀏覽任何應用軟體的即時通知訊息。

然而，透過智慧手錶接收傳送即時訊息，如果使用者直接操作錶面，由於手錶螢幕窄小有限，使用者會遇到常見的兩個困擾：第一，太長時間用眼睛盯著螢幕造成的眼睛痠痛不適；第二，在小範圍用指尖敲打迷你版的虛擬鍵盤，容易出錯且不方便。然而，

即便現在許多系統有設計罐頭訊息，讓使用者可以快速選擇的候選名單，做到更短時間的回覆，但還是不免有需要使用眼睛與手指操作瀏覽與打字的麻煩行為。

傳統的文字閱讀方法，大多是使用視覺、語音方法，但雙眼長時間的注視螢幕，容易造成眼睛的負擔，或在某些場合不適合使用語音播放，例如：在公眾場合中聽語音，容易受到周遭噪音干擾；又或是在重要場所中戴耳機容易被視為不禮貌行為，例如辦公室、會議進行時。我們的系統只需要安裝在現有的智慧手錶上，即可使用，建置成本低且利用率高，且可以在不能使用語音且不方便使用眼睛瀏覽螢幕閱讀簡訊的任何場景下，也可以單手操做完成即時訊息內容的接收、閱讀及回覆。

為解決上述視覺與語音通訊的限制問題，本研究提出一套基於智慧手錶之文字互動系統，整合觸覺震動輸出與手腕手勢輸入兩大模組。使用者可在無需仰賴螢幕或語音的情境下，透過感知震動節奏以接收文字內容，並以手勢輸入進行互動回應。此設計不僅提升了系統於公共場合或低視覺環境下的可用性，也大幅降低學習門檻與設備安裝的複雜度。如圖 1.2 所示，展示本研究所提出之可穿戴式文字互動系統，其應用場景涵蓋視覺受限環境、噪音干擾情境或不便語音操作的日常使用情境，強調系統的實用性與情境適應性。左圖為傳統視覺 / 語音介面操作情境；右圖展示本系統整合震動輸出與手勢輸入之智慧手錶互動情境，應用於騎乘移動、視障使用者等場域。

本研究提出一套基於智慧手錶的文字互動系統，結合震動輸出與手腕手勢輸入，使用者無需仰賴螢幕或語音，即可接收與回覆訊息。系統以低學習門檻、無需額外硬體的設計，讓使用者能在視覺受限、環境噪音或無法發聲的情況下，輕鬆完成溝通任務。為了更清楚說明本系統的應用價值，以下是一個典型的使用者案例，圖 1.1：Sam 是一位上班族，正在參與重要會議時，又收到一則緊急重要訊息，透過 alphaVib 系統震動輸出，讓他知道這消息是絕對重要的。在不方便拿手機出來操作的情況下，Sam 就可以使用 alphaVib 透過手腕轉動選取字母，並依靠震動確認輸入選項，在完全靜音且不動聲色的情況下，順利完成訊息的即時接收和簡短回覆。此類情境不僅適用於會議，也適用於運動、通勤、公共場合等環境，顯示本系統在多樣場景中的實用性與適應性。

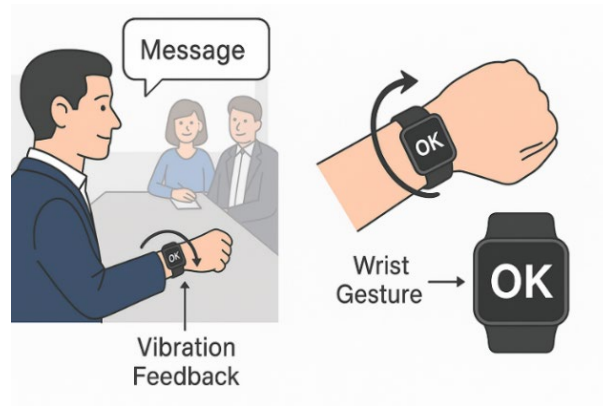


圖 1 系統使用情境

本文提出的貢獻，如下：

- 提出了一種新穎的文字輸入和輸出系統，針對智慧手錶重新設計，將手腕手勢與振動感測技術整合在一起。此系統代表了可穿戴設備介面領域的重大進步。
- 開發並完善了手勢辨識模型，提高了手腕手勢辨識的精確度和穩定性。這項改進對於確保使用者與智慧型裝置的可靠、高效互動至關重要。
- 最後，本研究比較了兩種輸入和輸出方法，包括傳統的莫爾斯電碼和僅振動輸出。從測試參與者收集的回饋進一步豐富了對這些方法的評估。



圖 2 系統場景應用與傳統方法之比較示意圖

本論文的後續章節將依序展開：第二章將回顧相關文獻，探討智慧穿戴裝置做為互動模式閱讀文本訊息的發展與挑戰；第三章將詳細介紹 alphaVib 系統的設計理念、技術架構與實現細節；第四章將展示我們的實驗設計、結果與深入討論，並驗證 alphaVib 在準確性、效率與使用者體驗上的表現；最後，第五章將總結本研究的發現，以及展望未來的研究方向。

Chapter 2 Related Works

本章回顧與非視覺文字閱讀及輸入系統相關的研究成果，包括點字、觸覺與聽覺系統等，並介紹可穿戴裝置在文字閱讀與輸入上的應用方法與挑戰。

2.1 Challenges and Existing Solutions for Text Interaction on Wearable Devices

隨著科技的演進與市場需求的驅動，智慧型穿戴裝置(如智慧手錶、手環及智慧眼鏡等)已成為日常生活中不可或缺的數位伴侶，承擔著健康監測、訊息傳遞及互動控制等多重角色。其中，文字輸入與輸出功能作為人機互動的核心環節，對於提升穿戴式設備的實用性與使用者體驗至關重要。

然而，受限於穿戴裝置的體積、有限的顯示空間以及多樣化的使用情境，傳統的視覺化輸入(如虛擬鍵盤或手寫辨識)及輸出(如螢幕顯示)方式面臨諸多挑戰。這些挑戰包括輸入困難、誤觸頻繁、效率不佳、視覺負擔重以及在特定環境下易受干擾等問題[2][3][4]。因此，近年來許多研究致力於開發更符合小型穿戴設備特性的創新輸入輸出方案，例如語音輸入、觸覺輸出及手勢控制等輔助技術[5]。本節將回顧現有文獻中關於智慧手錶文字輸入與輸出系統的研究，特別關注基於手勢與觸覺的互動設計，並探討編碼設計與手勢偵測技術的發展現況。

2.2 Smartwatch Applications for Texting

智慧手錶上的文字輸入與輸出一直是人機互動領域的研究重點。傳統上，文字輸入多依賴觸控螢幕上的虛擬鍵盤或手寫辨識，但由於螢幕尺寸的限制，這些方法常導致輸入效率低落與誤觸問題[4]。為克服這些限制，研究人員探索了多種替代輸入方案。

其中，基於手腕手勢的文字輸入已成為重要方向。例如，WrisText 系統[6][7][8]透過手腕的旋轉與擺動來控制文字輸入，其將字母群組環繞排列於錶面周圍，使用者僅需

單手揮動手腕即可選取對應字母群，並結合自動補全功能以提升輸入效率。實驗結果顯示，經過短時間練習後，使用者的輸入速度可達約 24.9 字/分鐘，且手勢辨識準確率高，支持多種輸入模式[6][9][10]。另一系統 WristWhirl[9][10]則將手腕作為「搖桿」，實現單手連續輸入，顯著提升了操作的便利性與互動可能性。

除了輸入，文字輸出方面也有顯著進展。當視覺輸出受限時，觸覺與聽覺回饋被廣泛用於輔助用戶獲取文字資訊[4][5][11]。特別針對視覺障礙使用者，Vibrotactile Skin-Reading 系統[11]利用多通道震動裝置，將動態文字資訊以觸覺形式傳遞至皮膚。研究表明，經過訓練後，使用者能夠辨識字母、單字乃至簡單句子，並能透過手勢控制閱讀節奏，如暫停或調整速度。這些研究成果表明，在滿足小型化、低干擾和高效互動需求的背景下，智慧手錶的輸入輸出設計正持續探索多元且實用的解決方案。

2.3 Encoding Design and Gesture Detection

良好的編碼設計能有效降低使用者的認知負擔並提高輸入速度。部分研究將字母分群並環繞排列於錶面邊緣，以減少手腕移動距離與時間（如 WrisText 與 WristWhirl）。此外，結合語言模型的自動補全與錯誤修正機制，也能進一步提升輸入的流暢度與準確率。在非視覺化編碼方案方面，ActiVibe[3]利用智慧手錶的震動馬達設計多種觸覺圖示，讓使用者在不看螢幕的情況下辨識進度或通知，實驗證明在自然情境下震動訊息辨識率可達 88.7% 至 96%。另有研究如 WristWhirl[4]雖然主要側重手勢輸入，但也間接涉及編碼概念。

在手勢偵測方面，多數研究利用智慧手錶內建的加速度計、陀螺儀等慣性傳感器來辨識手腕的旋轉、擺動、點擊等動作[6]。為追求更高靈敏度與穩定性，近年研究亦引入了創新的傳感技術，例如基於光學纖維環共振器的高靈敏壓力傳感器，能即時捕捉手指或皮膚的微小動作，甚至實現高速點字閱讀與輸入[9]。這些技術不僅提升了動作辨識的

準確度，也為視覺受限或特殊場景下的輸入輸出提供了更多可能性。

此外，為減少誤判與延遲，手勢偵測系統通常會設計獨特的編碼結構，明確區分不同手勢指令的界限。例如 WristWhirl[10]採用連續轉動的軌跡來表示輸入，利用不同轉向與速度定義字元或指令；而 Vibrotactile Skin-Reading[11]則引入觸覺控制手勢來啟動、暫停或重啟輸出，讓用戶在閱讀過程中有更多主動控制的空間。

綜觀上述相關研究，儘管已有許多探索性工作證明了手勢與觸覺技術在智慧手錶上的應用潛力，例如 WrisText[6]、WristWhirl[10]、Vibrotactile Skin-Reading[11] 等系統在輸入、輸出與觸覺控制上均達成不錯的成果，但這些現有系統多數仍存在以下局限：

- 需要額外硬體支持（例如 ActiVibe[3]、ThumbText[5]或需特殊指環及壓力感測器[9]）。
- 學習成本相對較高（如 Vibrotactile Skin-Reading 的觸覺編碼需數小時訓練[11]）。
- 無法在不干擾他人且完全不依賴視覺與語音的情境下流暢使用。

相較之下，本研究提出的 alphaVib 系統旨在克服這些挑戰。我們進一步簡化了裝置需求，基於市售現有智慧手錶開發；同時，我們降低了學習門檻，並提出一套整合性的手勢輸入與震動輸出互動系統。本研究的獨特之處在於：成功將文字輸入與閱讀功能結合於同一裝置，且僅需透過一個震動馬達與一種簡單的腕部手勢，搭配低學習成本的編碼方式，便能對應至全部 26 個英文字母及數字。整個操作過程可單手完成，真正實現了在各種情境下的完全雙手自由與非視覺化訊息互動。期望在不增加使用者額外負擔的情況下，提升智慧穿戴設備在人機互動上的實用性與可及性。

Chapter 3 System Overview

本章將介紹本研究所提出的 alphaVib 系統，包括其整體架構、核心元件與操作流程，讓讀者能清楚掌握系統設計與模組間的互動邏輯。 alphaVib 為一款專為智慧手錶平台設計的新型文字互動系統，旨在因應小型觸控螢幕操作不便、特定情境下不適合使用語音等問題。透過整合震動提示與手腕手勢辨識，alphaVib 提供一種無需注視螢幕即可完成文字接收與輸入的創新互動方式。本章內容將先會在 4.1 節提及本研究動機，描述我們為什麼要做此項研究，找受訪者做田野調查，並針對替定場景做進一步的主觀感受探討。之後，我們概述 alphaVib 的系統應用場景，以及整體的系統架構，接著說明其主要模組及處理流程，包括資料前處理、感測訊號處理與輸出入判斷，為後續技術章節奠定基礎。

3.1 Research Motivation

我們為了深入了解在特定場景下使用視覺閱讀訊息的適宜性以及受訪者的實際感受，本研究邀請了 10 位受試者進行田野調查，其訪談方式為半結構化設計，先做量化問卷，再做質性訪問。而調查內容，包含三個部分，分別是：針對平時的訊息閱讀習慣、不適合視覺閱讀的情境認知，以及在特定靜態場景中的主觀感受進行探討。

首先，調查受試者平時閱讀訊息的習慣。如圖 4.1(a)，結果顯示，多數受試者傾向於使用眼睛閱讀文字訊息，而非依賴語音訊息。這一結果反映出傳統文字訊息依然是日常通訊中主要且普遍的方式。接著，研究進一步詢問受試者認為哪些情境不適合以視覺閱讀訊息。如圖 4.1(b)，受試者普遍提及的場景包含會議、影院以及運動中等情境。這些場景通常伴隨著環境的專注要求、動態干擾或社會禮儀等因素，使得視覺閱讀變得不便或不合適。最後，針對「會議室」與「電影院」這兩個典型的靜態場景，本研究進一步分析受試者在這些情境下的主觀感受。如圖 4.1(c)，結果顯示，多數受試者認為在

這兩個場景中使用手機閱讀訊息普遍被視為「不方便」，其中在會議情境中，更進一步被認為是一種「不禮貌」的行為。

綜合以上調查結果，可以看出傳統文字訊息在某些特定情境下存在使用上的限制。這些發現突顯了現有視覺化訊息傳遞方式的局限性，也進一步激發了我們探索與設計非視覺化訊息傳遞替代方案的動機。

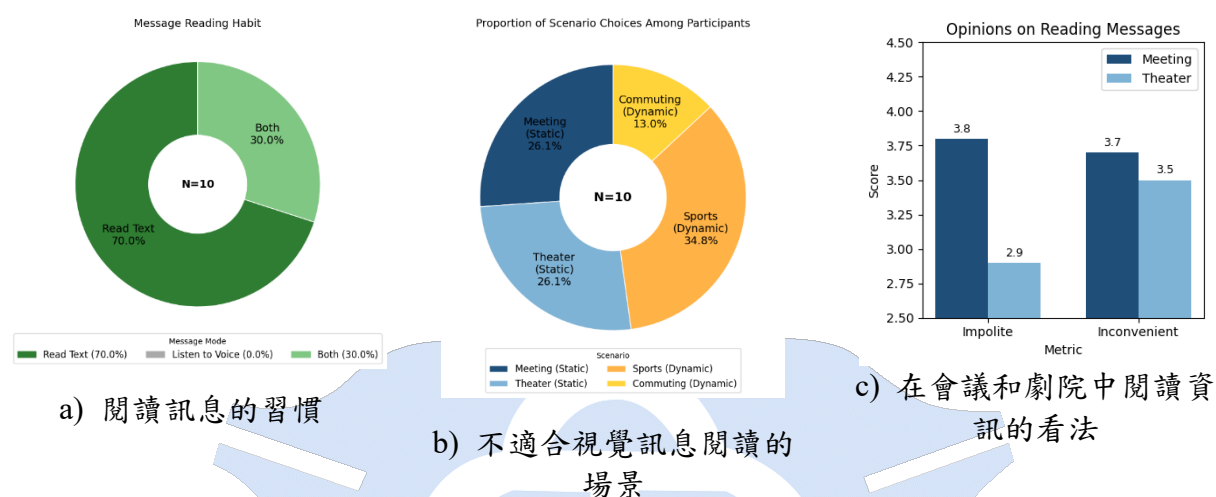


圖 3 田野調查受訪者結果圖

3.2 System Scenario

這裡將說明使用者如何在手錶上進行「訊息閱讀」與「訊息打字」的操作流程。如圖 4.2 中，分別展示了 alphaVib 系統中，訊息「輸出」和「輸入」的整體操作步驟。當使用者進行「訊息閱讀」時，alphaVib 系統負責傳輸文字輸出。我們設計透過手錶的震動馬達輸出，讓使用者可以用皮膚感知，讀取一套震動編碼。而當使用者進行「訊息打字」時，alphaVib 系統負責接收文字輸入。我們設計了一套編碼，分為「短」與「長」兩種字符。使用者透過轉動手腕來輸入，將手腕從旋轉到回正的時間長度與字符對應：時間較短時輸入「短」字符，時間較長時輸入「長」字符。

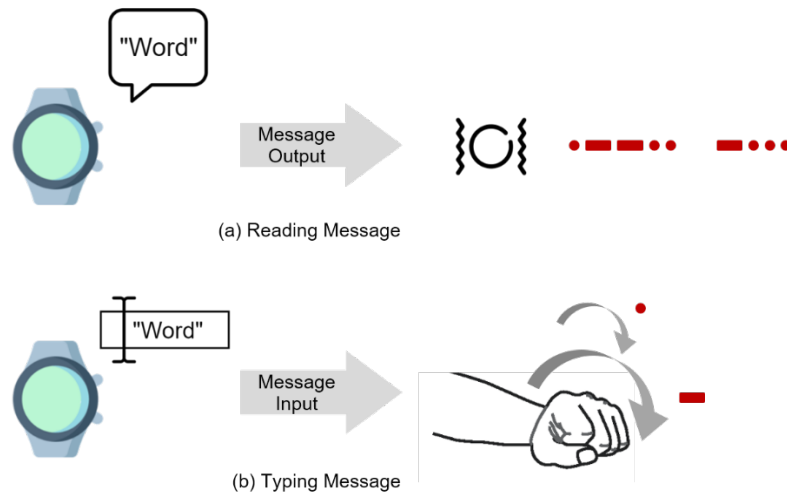


圖 3.4 使用者互動示意圖

3.3 System Architecture

alphaVib 系統的核心設計目標，是在無螢幕的智慧穿戴裝置上，提供一種可透過震動與手勢互動進行文字訊息輸入與輸出的機制。為實現此功能，系統整體功能架構，如圖 4.3 所示，系統整合三大模組：文字處理模組、訊號預處理模組與訊息互動模組。接下來，我們將介紹各模組間以資料流方式相互銜接，並透過事件觸發機制完成封閉式互動回饋流程。

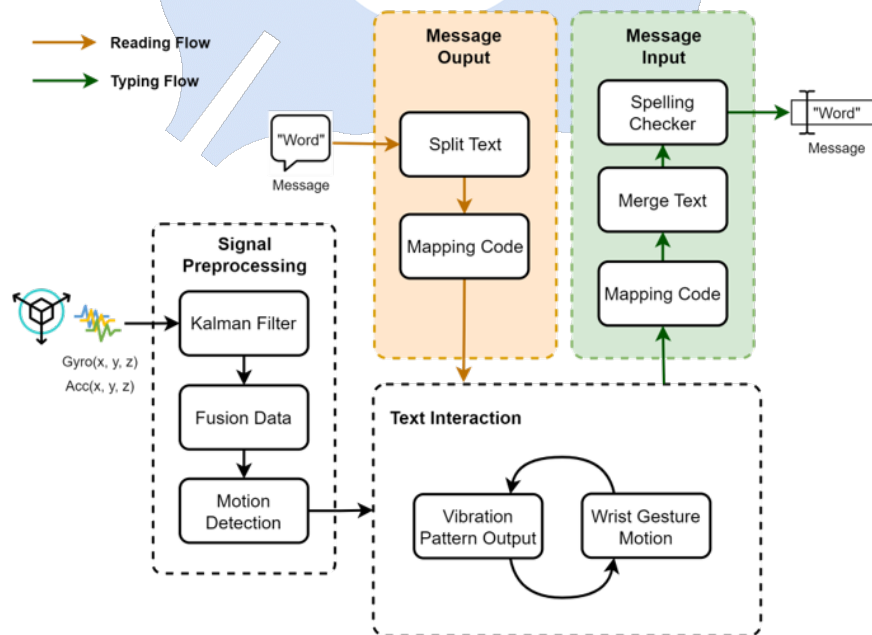


圖 5 alphaVib 系統功能架構圖

(1) 文字處理模組 (Message Processing Module)

此模組負責將文字訊息與我們的 alphaVib 編碼做轉譯與反轉譯，針對個別兩種文字訊息做處理，分別是「訊息輸出」與「訊息輸入」，分別對應於當使用者做「閱讀訊息」與「打字訊息」的動作。 *Message Processing* 的組成為 *Message Output* 和 *Message Input*。 *Message Output* 的部分，將原始文字訊息轉換為我們重新設計的 alphaVib 編碼，其編碼適用震動編碼的格式，之後有助於後續轉成震動模式輸出。 首先，系統透過 *Split Text* 將輸入文字切割為單一字元。 接著，每個字元會經由 *Mapping Code* 對應至一組獨特的 alphaVib 編碼。 最後，會將編碼傳給 *Text Interaction* 模組，透過手錶的震動馬達輸出，提供至 *Text Interaction* 模組進行通知與播放。 另外，*Message Input* 的部分，將 *Text Interaction* 模組輸出的輸入編碼轉換為文字訊息內容，做打字訊息的輸入結果。 首先，每個 alphaVib 編碼會經由 *Mapping Code* 對應至每個字元。 接著，在將每個字元透過 *Merge Text* 合併成完整的文字訊息。 最後，在將文字訊息藉由 *Spelling Checker* 做字典的拼寫糾正之後，作為最終的打字結果。

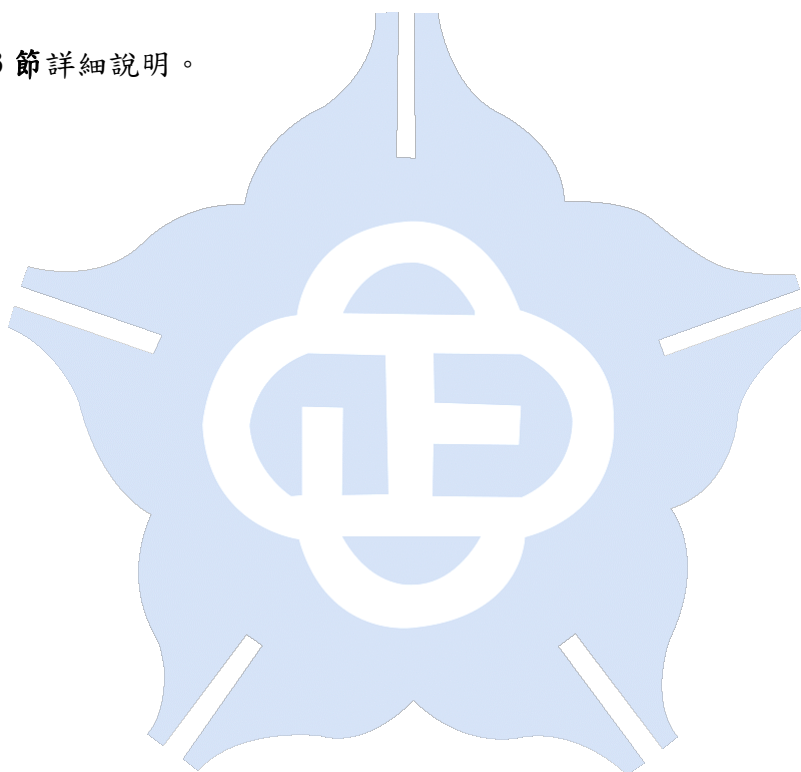
(2) 訊號預處理模組 (Signal Preprocessing Module)

此模組負責將手錶上的感測器，其中加速度計與陀螺儀的原始訊號，做訊號預處理，以便做後續的使用者動作之即時辨識。 為了讓動作辨識提升感測精度與訊號穩定性，我們將 alphaVib 系統整合多重感測來源（加速度、陀螺儀），並應用 *Kalman Filter* 濾除背景雜訊後進行 *Fusion Data* 處理。 經過資料融合與轉動手腕的姿態估算後，系統會執行 *Motion Detection* 機制，判斷手腕旋轉動作，並作為後續 *Text Interaction* 模組中訊息閱讀與打字互動過程的依據。 若動作被判定為「達到臨界值」，即觸發互動提示流程。

(3) 訊息互動模組 (Text Interaction Module)

此模組為系統中的互動核心，負責控制震動模式之分階段播放，並配合感測器回饋

進行動作同步判斷。其中，*Signal Preprocessing* 中 *Motion Detection* 的手勢辨識結果，會做為 *Wrist Gesture Motion* 的依據。而 *Message Processing* 會將 alphaVib 編碼透過 *Vibration Pattern Output* 把編碼透過智慧手錶的震動馬達做輸出。而將互動流程對應於「訊息輸出」與「訊息輸入」，我們來個別講解互動流程。當使用者要閱讀訊息時，系統要輸出文本訊息，手錶會將欲輸出的 alphaVib 編碼拆分成兩個部份，並透過震動模式做逐步輸出，具體的原理與應用會在 4.1 節與 4.3 節詳細說明。而使用者要打字訊息時，系統要輸入文本訊息，使用者會透過轉動手腕的方式做編碼的輸入，具體原理與應用會在 4.2 節與 4.3 節詳細說明。



Chapter 4 System Design

本章著重於系統的不同工作方式，分為三個主要區域。第一部分著重於編碼系統是如何設計。第二部分則著重於如何辨識和分析手腕運動。第三部分「文字互動輸出」解釋了文字的顯示方式以及文字與手腕運動的關係。這些部分共同展示了系統的基本部分及其工作原理。

4.1 alphaVib 編碼架構設計

4.1.1 編碼邏輯與設計原則

我們提出一個全新的編碼機制，名為 alphaVib，用以將英文字母（A - Z）與阿拉伯數字（0 - 9）轉換為結構化的符號序列。該序列由兩種基本單元組成：短符號（樣式）「.」和長短符號「-」，這將作為 **b.節** 和 **4.3 節** 手錶馬達震動的訊號依據。

文字集合的設計靈感來自於英文兒歌《ABC 歌曲》（The Alphabet Song）的旋律節奏[6]，根據其自然的語音分段，我們將 26 個英文字母劃分為四組；同時，將 10 個數字（1-9 與 0）獨立構成第五組。這五組對應五種不同的 Group Prefix，作為字元分群與辨識的依據，其中前四個集合的符號模式是依據二進位邏輯 00 - 11 的概念對應編碼長短設計，有助於學習者快速理解與記憶。

而整體編碼機制可區分為兩個主要部分：集合符號（Group Prefix）與位置編碼（Position Code）。集合符號，將所有字符依字母順序劃分為五個集合，每個集合對應一組唯一的符號前綴（如 “..”、“.-”、“-.”、“--”、“...”），用以識別該字符所屬的分類群組。位置編碼，根據字符在其所屬集合中的排序位置，透過模三（mod-3）規則轉換為結構化的符號組合。編碼邏輯為：商數對應長符號「-」的數量，餘數則以短符號「.»補足。最後，將集合符號與位置編碼組合，即構成該字元的完整編碼。

編碼舉例：字母 C 屬於 Set1 「..」中的，為第 3 位，則編碼為「..-」；字母 L 屬於

Set2「.-」，為第 5 位，則編碼為「.- -..」。而將訊息透過此編碼表轉換，作為 alphaVib 系統中用於震動回饋應用。圖 1 說明各集合的設計邏輯與結構，而表 A1 則列出所有字母與數字的完整編碼對應表。

表 1 Mapping of Binary Codes to Group Prefixes and Character Sets

Set Number	Binary	Group Prefix	Character Set
Set 1	00	● ●	A B C D E F G
Set 2	01	● ■	H I J K L M N O P
Set 3	10	■ ●	Q R S T U V
Set 4	11	■ ■	W X Y Z
Set 5	N/A (Digital Independence)	● ● ●	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

4.1.2 振動編碼與計時機制

為實現在無螢幕環境下可辨識的字元震動輸出，alphaVib 系統設計一套以符號為基礎的震動轉譯機制（symbol-to-signal mechanism），結合明確的時間控制規格，使使用者能透過觸覺節奏辨識文字訊息。此機制主要分為兩層：編碼邏輯與震動時序設定，說明如下。

a. Symbol-Based Encoding Logic (基於符號的編碼邏輯)

本系統採取類摩斯碼（Morse-like）設計理念，將字元拆解為兩個階段的震動訊號：其一為群組識別碼（Group Prefix），其二為群內位置碼（Position Code）。每段訊號均由「短符號（.）」與「長符號（-）」組成，用以對應不同的震動節奏，並輔以間隔靜止信號強化辨識。圖 X 示範兩組範例字元的震動轉譯方式：C 對應編碼為 ..-，轉譯為「短、短、（停頓）、長」的震動輸出；L 對應編碼為 .-.-..，則轉譯為「短、長、（停頓）、長、短、短」。此編碼方式可使使用者根據觸覺輸出所感知的節奏與節段結構，逐步判斷所代表的字元內容。

b. Vibration Timing Specification(振動計時規範)

為確保震動訊號具一致性與辨識性，系統定義每一類符號與段落之間的震動時長與間隔。具體設定如表 2 所示。

表 2 Vibration Timing Reference Table

Symbol	Description	Duration(ms)
●	Short vibration	100
■	Long vibration	300
Symbol Gap	Pause between symbols	100
Group/Position Code Gap	Pause between Group Prefix and Position Code	$t > 0$
Latter Gap	Pause between the previous letter and the next letter	1000

透過上述震動時間參數的標準化設定，可有效區隔不同符號與段落之結構，使使用者在操作過程中具備穩定可預測的節奏參照，進一步提升整體輸出訊號之可辨識性與學習效率。圖 X alphaVib 字元震動編碼轉譯示意圖。本圖展示字元 C 與 L 如何對應為由短與長震動所組成的觸覺節奏序列，分別呈現 Group Prefix 與 Position Code 的編碼方式與段落切換規則。

4.2 腕部手勢識別

在本研究的手勢識別設計中，我們基於智慧手錶中「加速度計」與「陀螺儀」的數據，進行手腕動作的檢測與識別。透過這兩種感測器所提供的數據，我們能夠捕捉到手腕運動的變化，並將其作為 IMU 資料前處理與手勢辨識的依據。此設計可讓使用者能有效地達成高精度的手勢識別，為實現文字交互輸出提供穩定而可靠的基礎。

4.2.1 Data Preprocessing

首先，在 IMU 資料前處理階段，我們應用了卡爾曼濾波器（Kalman Filter）來對加速度計和陀螺儀的訊號進行平滑處理與去除雜訊，以減少感測器數據中的隨機雜訊。如

圖 4，是加速度器原始數值去噪前後的對比圖。由此可知，卡爾曼濾波的應用顯著提升了訊號的穩定性與精確度，為後續資料處理步驟提供了可靠的基礎數據。透過此一處理過程，我們能夠確保訊號品質，有效提升整體系統的性能表現。

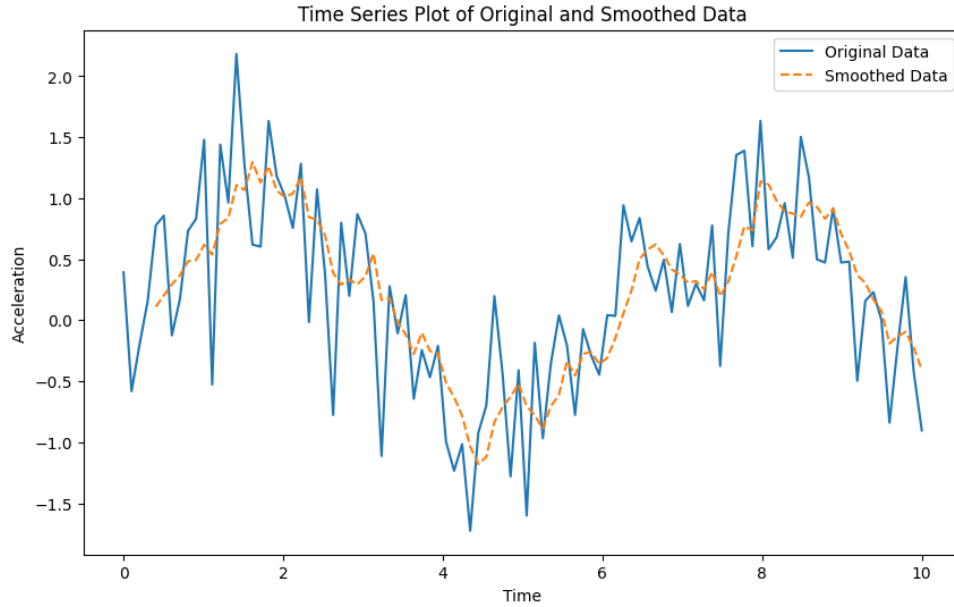


圖 6 加速度資料：原始資料與卡爾曼濾波器

4.2.2 Sensor Fusion Method

為了準確辨識使用者動作，我們將整合加速度計與陀螺儀資料，透過濾波與資料融合技術，估算裝置旋轉角度與角速度，作為偵測動作的依據。首先，感測器所輸出的原始資料進行處理。我們先將加速度計和陀螺儀各別的感測器數據，取有效的訊號。

a. Accelerometer Data Processing

由於原始的加速度資料同時包含重力分量與線性加速度分量。為分離兩者，我們需透過濾波器，對於三軸資料 $i \in \{x, y, z\}$ 進行計算。首先，採用一階低通濾波器來估算重力分量 g_i ，處理公式： $g_i = \alpha \cdot g_i + (1 - \alpha) \cdot a_i$ ，並以高通濾波方式取得線性加速度，處理公式： $a_{linear,i} = a_i - g_i$ 。其中， a_i 為原始加速度資料， α 為濾波權重係數。取得純 $a_{linear,i}$ 粹的線性加速度後，即可用以估算裝置的空間姿態。接著，根據文獻中常用的運動學近似方法，可利用加速度資料計算裝置的傾斜角度（Pitch）與旋轉角（Roll），以

弧度(rad/s)為單位表示，其計算公式如下：

$$\begin{cases} \theta_{accel, roll} = \arctan\left(\frac{a_{linear, y}}{a_{linear, z}}\right) \\ \theta_{accel, pitch} = \arctan\left(\frac{-a_{linear, x}}{\sqrt{a_{linear, y}^2 + a_{linear, z}^2}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

b. Gyroscope Data Processing

陀螺儀可提供裝置在三軸上的角速度資訊(ω_i ，其中 $i \in \{x, y, z\}$)，可用以推估裝置旋轉角度的變化量。然而，陀螺儀在長時間使用下容易產生累積誤差（漂移），因此本研究進一步將其與加速度計資料進行融合，以提升姿態估算的穩定性與準確性。首先，透過記錄當前與前一筆資料的時間戳 $t_{current}$ 與 t_{last} ，計算兩筆資料之間的時間間隔 Δt （單位為秒）主要頻率資料 100 Hz[註]，如下：

$$\Delta t = \frac{t_{current} - t_{last}}{10^9} \quad (2)$$

註：1 秒(s)= 10^9 奈秒(ns)，換句話說 $1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$ 。在 Android 中，時間戳（timestamp）單位確實是奈秒（nanoseconds，即 10^{-9} 秒）——尤其是從感測器（Sensor）API 取得的資料。

接著，根據各軸角速度 ω_i 與時間差 Δt ，估算角度變化量（單位為弧度）：

$$\theta_{gyro, i} += \omega_i \cdot \Delta t \quad (3)$$

c. Complementary Filtering

考量到加速度計在低頻下較穩定、可用於長期姿態估算，而陀螺儀則在短期內反應靈敏、適合即時追蹤，因此本研究採用互補濾波器（complementary filter）進行資料融合。

基於原始公式： $\theta_{fused} = \alpha(\theta_{gyro}) + (1 - \alpha)(\theta_{acc})$ ，融合後的角度資訊 $\theta_{fused, i}$ ，計算如下：

$$\begin{cases} \theta_{fused, x}(t) = \alpha \cdot (\theta_{fused, x}(t-1) + \omega_x \cdot \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{accel, roll}(t) \\ \theta_{fused, y}(t) = \alpha \cdot (\theta_{fused, y}(t-1) + \omega_y \cdot \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{accel, pitch}(t) \\ \theta_{fused, z} = \theta_{gyro, z} \end{cases} \quad (4)$$

其中， α 為權重係數（介於 0 至 1），用以調整對加速度計與陀螺儀資料的依賴程度。

針對在三軸 $i \in \{x, y, z\}$ 上，由融合後的姿態資訊 $\theta_{fused, i}$ ，可進一步估算即時角速度

$\omega_{fused,i}$ ，其計算方式如下：

$$\omega_{fused,i} = \frac{\theta_{fused,i} - \theta_{previous,i}}{\Delta t} \quad (5)$$

為持續追蹤姿態變化，系統需即時更新前一次角度狀態： $\theta_{previous,i} = \theta_{fused,i}$ ，如圖所示，為融合資料示意圖。

4.2.3 Motion Detection

根據角速度資料，本系統可偵測使用者是否執行了快速的手腕旋轉動作。若任一軸 $i \in \{x, y, z\}$ 的融合角速度 $\omega_{fused,i}$ 超過預設閾值 φ ，即判定為有效的轉腕事件：

$$|\omega_{fused,i}| > \varphi \quad (6)$$

這種以臨界值為基礎的方法讓系統能夠區分有意的旋轉手勢與輕微或無意的動作，為手勢觸發的互動提供可靠的機制。

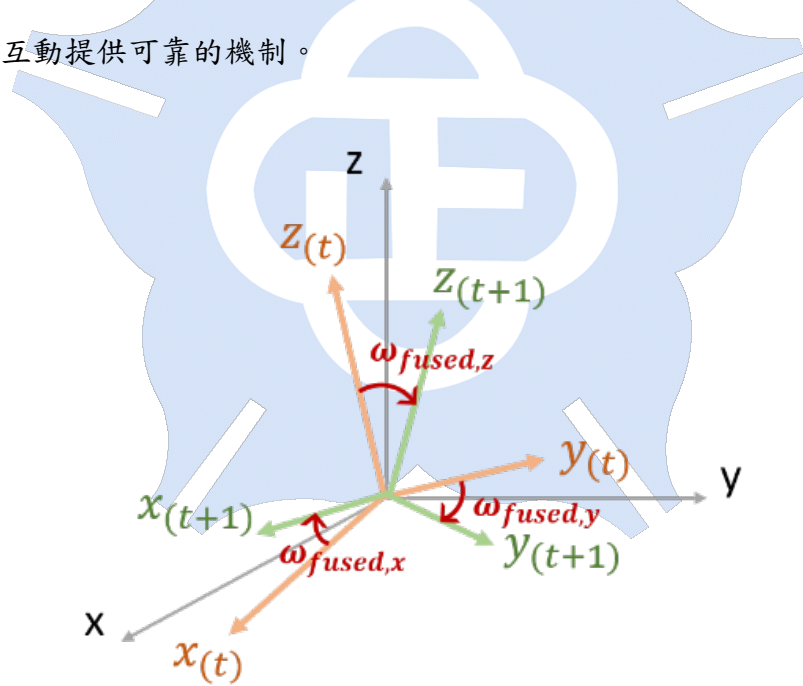


圖 7 融合資料示意圖

如圖，為傳感器的原始資料與數據融合的可視化數據圖，黃色標記為即時手勢動作偵測的事件觸發。

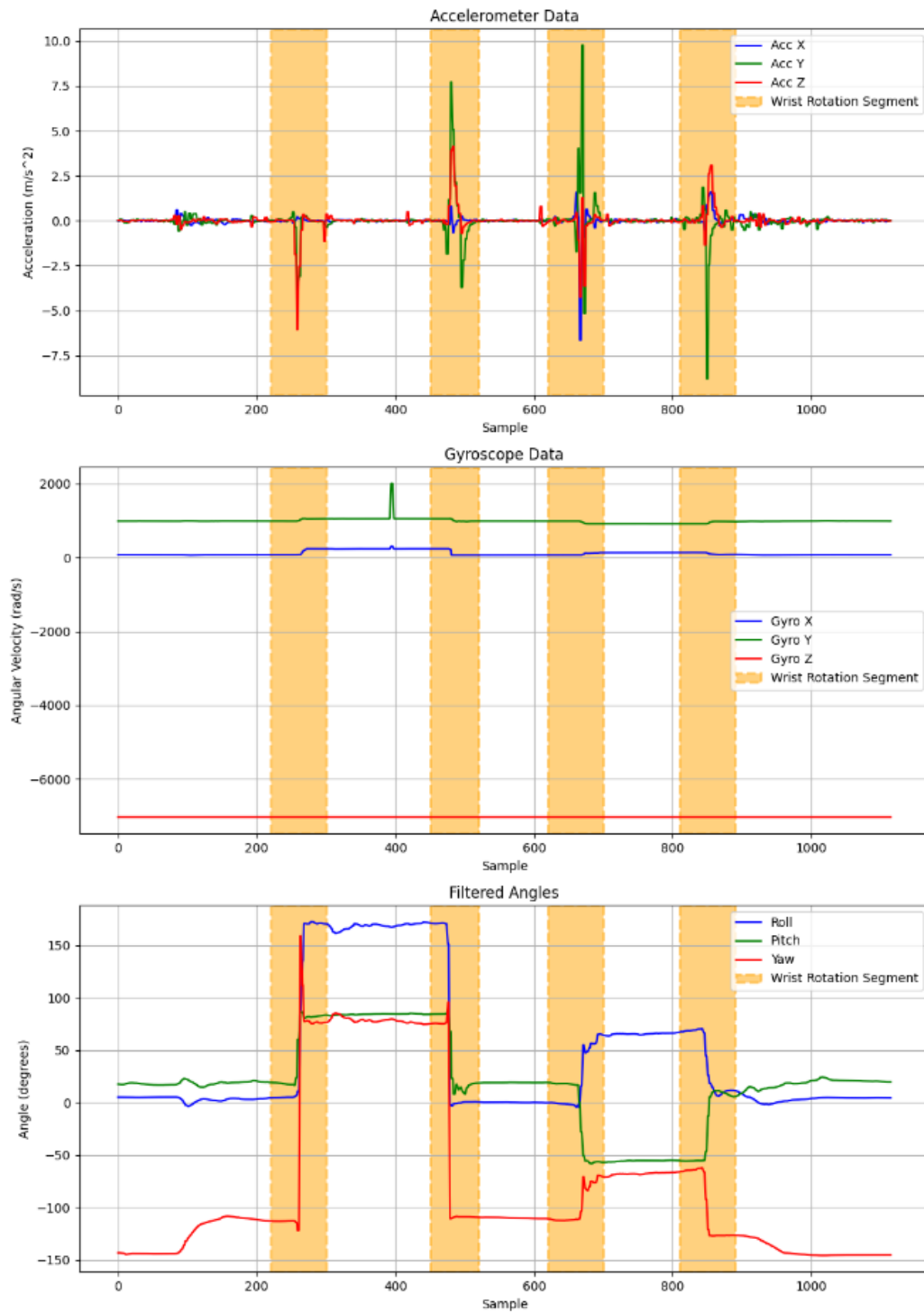


圖 8 透過加速度計和陀螺儀資料融合進行運動偵測

4.3 文字互動輸出

本演算法的核心設計理念，是透過將完整輸入訊息（如一段文字或單詞）先切割為單一字元，再針對每個字元依序轉換為兩段不同層次的震動訊號，並結合使用者的主動

手勢回應，在每輪互動中實現具高辨識度的觸覺提示。整體流程融合了系統主動輸出與使用者被動回饋之控制節奏，兼顧資訊傳遞效率與操作負擔之平衡。在每一輪字元互動中，根據字元輸出，演算法進行以下處理流程：

1. **分群與位置計算：**首先，系統根據預設的分群邏輯，判定輸入字元所屬的群組集合（Group Prefix）與其在群組內的序列位置（Position Code）。群組共分為五組，分別對應不同震動樣式前綴，而位置則透過 EncodePosition()函式依據 mod-3 規則轉換為由「劃」與「點」組成的震動組合。
2. **震動提示子集合：**系統輸出一段短促震動（prefix），提示該字元所屬之群組集合。這是使用者接收資訊的第一層線索，可快速排除非目標集合的字元。
3. **等待使用者動作：**完成初步提示後，系統進入等待狀態，透過感測器監測使用者手腕動作（如旋轉）。此動作被視為使用者已辨識前置提示並要求繼續的明確意圖。演算法在此階段不會自動前進，避免錯誤輸出。在震動群組碼輸出後，系統進入等待狀態，並呼叫 WaitForMotion()函式來監測使用者是否進行了確認手勢。此函式實作對應於第 4.2 節所述之感測器資料融合與動作判定邏輯，透過融合角速度判斷是否超過臨界值以觸發下一步輸出。
4. **震動提示具體位置：**當偵測到使用者動作後，系統依據先前計算的位置編碼，輸出第二段震動訊號（suffix）。此訊號由「劃」與「點」的節奏組合構成，明確提示字元於集合內的實際位置，完成該字元的完整編碼輸出。

上述流程將以迴圈方式依序處理每個字元，直至整段訊息傳遞完畢。整體輸出機制涵蓋 GroupPrefix()、EncodePosition()、PlayVibration()、WaitForMotion()等模組函式，確保震動訊號具備辨識性與節奏一致性，並可透過皮膚感知有效還原文字內容。本演算法設計不僅提升穿戴裝置於低視覺情境下的互動效能，也展現觸覺通訊在資訊輸出上

的應用潛力。圖 7 顯示 alphaVib 系統如何結合震動提示與手勢回饋，完成字元輸出的編碼流程。圖左為震動提示對應的群組模式（Sign Pattern），圖右則顯示使用者手勢的節奏配合（Hand Wave Pattern），展現使用者在無視覺輔助下亦可完成完整互動。

Algorithm 1 alphaVib 系統中單字元震動輸出之演算法

Algorithm 1: alphaVib Word-Level Vibration Encoding

Input: String *word* consisting of characters $c_i \in \{A-Z, 0-9\}$
Result: Sequential vibration output for each character in *word*
Data: $S_1 = \{A, B, C, D, E, F, G\}$
 $S_2 = \{H, I, J, K, L, M, N, O, P\}$
 $S_3 = \{Q, R, S, T, U, V\}$
 $S_4 = \{W, X, Y, Z\}$
 $S_5 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0\}$

```

1 Procedure alphaVib.Word.Output(word):
2   foreach  $c \in \text{word}$  do
3     alphaVib.Character.Output( $c$ );
4     Wait(1000);      // Latter Gap: pause between letters
5 Procedure alphaVib.Character.Output( $c$ ):
6    $set \leftarrow \text{GetCharGroup}(c)$ ;
7    $index \leftarrow \text{GetIndexInGroup}(c)$ ;
8    $prefix \leftarrow \text{GroupPrefix}(set)$ ;
9    $suffix \leftarrow \text{EncodePosition}(index)$ ;
10  PlayVibration( $prefix$ );           // Group code vibration
11  WaitForMotion();                 // Wait for user confirmation
12  PlayVibration( $suffix$ );           // Position code vibration
13 Function GroupPrefix( $set$ ):
14    $mapping \leftarrow \{ S_1: "..", S_2: ".-", S_3: "-.", S_4: "--", S_5: "... \}$ ;
15   return  $mapping[set]$ 
16 Function EncodePosition( $index$ ):
17    $q \leftarrow \lfloor index/3 \rfloor$ ;
18    $r \leftarrow index \bmod 3$ ;
19   return  $"-" \times q + "." \times r$ 

```

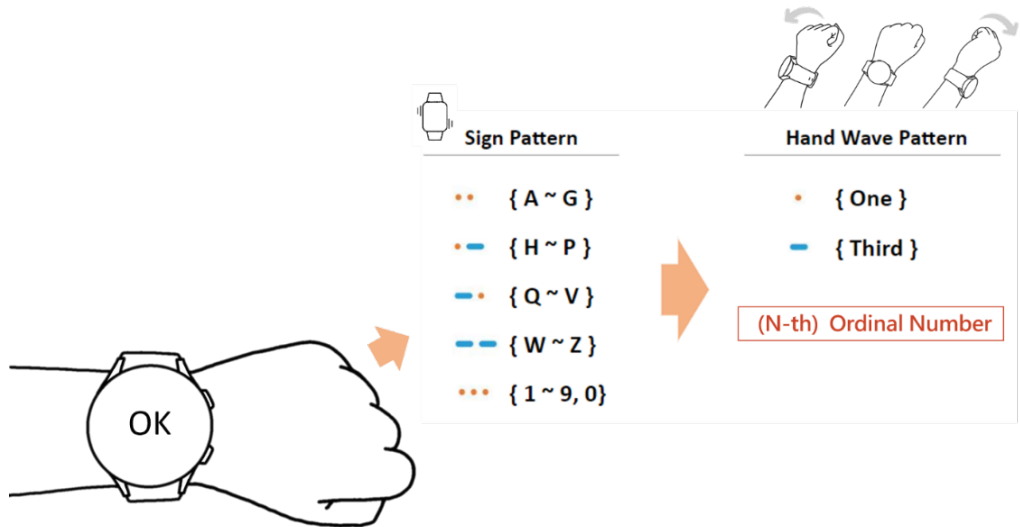


圖 9 透過加速度計和陀螺儀資料融合進行運動偵測

Chapter 5 Evaluation

本章說明系統評估所採用的實驗環境設置及參考的評估指標。實驗環境設計旨在提供受控且一致的測試條件，以排除不必要的外部干擾，並確保不同參與者之間的比較具有可比性。所有測試均在受控的室內空間中進行，研究人員對環境進行了嚴格管理，以最大程度地減少環境噪音、光線變化及其他潛在干擾因素。

在特定測試階段，我們進一步引入了多樣化的環境變數，包括調整背景噪音水平、改變光照條件以及增加參與者的肢體運動程度，以模擬現實生活中的使用情境。實驗中，參與者需要在不同的身體姿勢下（如站立、坐姿、行走、甚至跑步）執行任務，並且在不同環境條件下（例如安靜的辦公室、嘈雜的走廊或室外區域）完成操作，以全面檢驗系統在真實情境中的適應性與穩健性。基於此，本節接下來將依序介紹實驗環境的具體配置與變項設計，並說明本研究採用的關鍵評估指標，包括客觀效能指標與主觀體驗指標，用以評估系統的技術表現與使用者體驗。

5.1 Experimental Setup

5.1.1 Apparatus and Prototype

為了驗證我們提出的 alphaVib 系統在無視覺文字閱讀情境下的效能與使用體驗，本研究開發了一套簡易的測驗系統原型，並在控制與真實環境中進行測試。實驗設置涵蓋硬體設備、軟體架構以及多樣化的測試場景。

硬體部分，包括一台 ASUS VivoBook X571GD 筆記型電腦，配備 Intel® Core™ i7-9750H 處理器 (2.60 GHz)、8 GB 記憶體，運行 64 位元 Microsoft Windows 11 作業系統，用於資料處理與實驗控制。行動裝置採用 Samsung Galaxy A71（型號：SM-A716B/DS）手機和 Samsung Galaxy Watch 7（型號：SM-L310）智慧手錶。Galaxy Watch 7 內建 IMU 傳感器與震動馬達模組，負責記錄手腕動作並向使用者提供觸覺提示。

軟體部分，智慧手錶的應用程式基於 Android Studio（版本：2024.3.2 Canary 8）開發，運行於 Wear OS 5 系統；測試網站原型則採用 VS Code（版本：1.100.3）與 Flask 框架建置，用於顯示編碼規則、訊息提示與記錄輸出。兩者之間透過 WebSocket 協定進行即時通訊。圖中展示的 GUI 示意包含智慧手錶端介面與測試網站端介面：手錶端提供訊息提示、方向確認、重複輸出與靜音選項，網站端則呈現子集合與字母編碼表、即時加速度資料及測試正確率統計（見圖）。

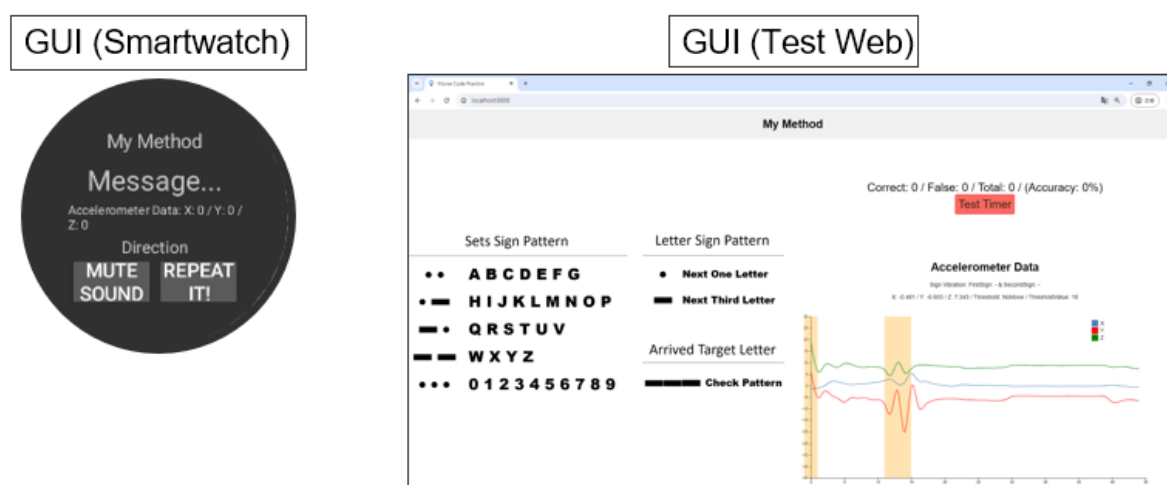


Figure 5.1 實驗架設實景照片

為了在真實情境下驗證系統的效能，本實驗直接選取了三個現實生活中常見的環境進行現場測試，分別為辦公室、咖啡廳與公車。這些環境的聲音壓力水平（SPL）、振動強度（RMS）、參與者姿勢與移動速度等參數均由現場測量獲得，反映出當時的客觀狀態，如表 1 所示。具體而言，辦公室的 SPL 為 47.6 dB，RMS 接近 0，參與者以靜態坐姿或站姿進行任務；咖啡廳的 SPL 為 69.5 dB，參與者以行走姿勢執行任務，移動速度約為 3.5 km/hr；公車的 SPL 為 77.1 dB，RMS 為 0.425，參與者以類似跑步的姿勢完成操作，移動速度約為 5.5 km/hr。根據測得數值，我們進一步將這些環境分類為「安靜」（例如辦公室、安靜步行）與「嘈雜」（例如咖啡廳、公車）兩大類別。

表 1 Experimental Condition Parameters

(a) Categorical Variable

Environment / Pose	Quiet (Spatial State)	Noisy (Spatial State)
Quiet (low SPL)	Office (Sit, Stand)	Office (Walk, Run)
Noisy (high SPL)	Café	Bus

(b) Quantitative variable

Env.	SPL [dB]	RMS [m/s^2]	Pose	Speed [km/hr]
Office	47.6	0	Sit, Stand	0
Cafe'	69.5	0	Walk	3.5
Bus	77.1	0.425	Run	5.5

圖中呈現了這三個真實場景的現場照片，並標註了各自測得的聲音水平與拍攝時間（見表）。在實驗過程中，參與者依序在這些實景環境中完成系統測試，以確保測試結果反映出 alphaVib 在真實世界多樣環境與姿勢條件下的適應性與穩健性。

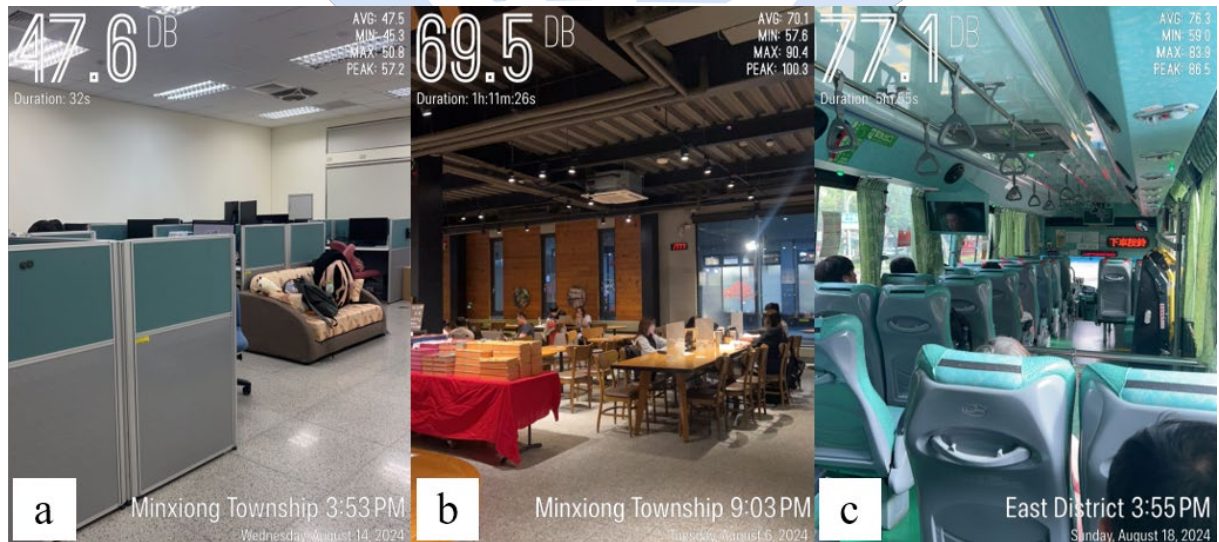


圖 10 不同環境 (a)辦公室 (b)咖啡廳 (c)公車

5.1.2 Participants

本實驗共邀請了 9 名年齡介於 22 至 25 歲之間的志願參與者（其中 5 名男性、

4 名女性)，所有參與者均為碩士層級的學生，且具備 STEM（科學、技術、工程、數學）背景。根據表 3 所示，參與者的慣用手多為右手（其中 8 人為右撇子，1 人為左撇子），而配戴智慧手錶的習慣手則均為左手。所有參與者的職業均為學生，無重大運動或認知障礙，這樣的參與者組成能夠確保受測者在學習新系統和完成實驗任務時具備一定的理解能力和操作能力，同時也反映出目標使用族群的特徵。

表 2 Basic Information of Volunteers

ID	Gender	Age	Dominant Hand	Watch-Wearing Hand	Academic Background	Education Level	Occupation
P1	M	24	Right	Left	STEM	Masters	Student
P2	F	23	Right	Left	STEM	Masters	Student
P3	F	24	Right	Left	STEM	Masters	Student
P4	F	25	Left	Left	STEM	Masters	Student
P5	F	24	Right	Left	STEM	Masters	Student
P6	M	24	Right	Left	STEM	Masters	Student
P7	M	23	Right	Left	STEM	Masters	Student
P8	M	23	Right	Left	STEM	Masters	Student
P9	M	22	Right	Left	STEM	Masters	Student

5.2 Experimental Design and Procedure

本研究旨在驗證一種無螢幕情境下，結合震動與手勢互動的智慧手錶文字接收方案，透過完整的實驗設計與流程，評估系統效能與使用者體驗。實驗步驟、操作方式與介面互動設計如下所述。

每位參與者的總測試時長約為 5 小時，整體實驗流程包括預備、教學、任務執行以及不同情境測試等環節。實驗開始前，研究人員先花費約 15 分鐘向參與者講解實驗的目標與操作要求，並確認參與者對流程充分理解。隨後，參與者在可見條件下進行約 15

分鐘的練習，透過觀察智慧手錶螢幕來熟悉編碼規則與操作方式。正式任務執行分為兩個部分：在可見條件下，參與者可觀看螢幕完成約 15 分鐘的任務；在不可見條件下，參與者則需在無法觀看螢幕的情況下持續操作約 1 小時，以評估系統的非視覺化互動效果。為進一步驗證系統在不同情境下的適應性，實驗設計還包含不同姿勢與不同環境的測試。在不同姿勢測試中，參與者分別以坐姿、站姿、行走與跑步等姿勢完成任務，每種姿勢持續約 15 分鐘；在不同環境測試中，參與者於辦公室、咖啡廳與公車等環境中執行任務，每個環境的測試時間亦約為 15 分鐘。透過這樣完整且多樣化的實驗設計，能夠全面評估系統在各種情境下的效能與使用體驗。

所有測試完成後，參與者填寫問卷評估系統的可用性與工作負荷，包含 SUS(System Usability Scale)、NASA-TLX (Task Load Index) 與 Likert-scale 主觀評估項目，收集他們對系統易用性、舒適度及可靠性的主觀反饋。整體而言，本實驗設計覆蓋了從預備、教學、執行到回饋的完整使用者體驗過程，並透過多樣化的姿勢與環境變數，全面評估回饋機制在不同情境下的有效性與適應性。

Table 1. Overview of Experiment Tasks and Timelines

Phase	Task/Condition	Details	Duration
Orientation and Familiarization	Basic Information Questionnaire	5 questions about participant background	5 min
	Introductory		
	Experimental Process Encoding	Participants encode experimental process	15 min
	Observation Table	50 questions on observation tasks	10 min
	Avoidance Table	70 questions; no chart provided; avoidance decisions	1.5 h
Learning (Office)	Sit	Sitting; Top 3 scores recorded	10 min per

Postures	Stand	30 questions; 6 rounds × 5 questions each	posture
	Walk	30 questions; 6 rounds × 5 questions each	
	Run	30 questions; 6 rounds × 5 questions each	
Different Environments	Office	Sitting; Top 3 scores recorded	15 min per environment
	Cafe'	Sitting; 30 questions; 3 rounds × 10 questions each	
	Bus	Sitting; 30 questions; 3 rounds × 10 questions each	

Note: Duration values are approximate per participant. “no chart” indicates no visual aid was provided.

5.3 Experimental Results

本研究定義了一系列用於評估系統效能與使用者行為的指標，涵蓋客觀量測與主觀感知兩個層面，以全面檢驗非視覺互動方法的技術有效性與使用者體驗。實驗主要關注以下幾個關鍵指標：

- 準確率：指系統或參與者正確辨識訊息或字元的比例，以百分比表示，用於衡量辨識的正確性與可靠度。
- 回應時間：指參與者從接收到訊息到完成回應所需的時間（單位：秒），用於評估互動效率。
- 學習曲線：透過多次試驗中準確率隨時間（或次數）的變化趨勢，反映編碼方法的學習負擔與習得速度。
- 使用者回饋：透過測試後問卷收集參與者對系統的主觀評估，重點涵蓋易用性、舒適度與感知可靠性。問卷包含 SUS（System Usability Scale）和 NASA-TLX（Task Load Index）兩種國際通用量表，以及 Likert-scale 設計的額外項目。

其中，SUS 用於衡量整體可用性，NASA-TLX 則評估使用過程中的心理、身體與

時間負荷、任務表現與挫折感等工作負荷感知。這些指標結合定量數據與主觀評價，能夠從多角度評估 alphaVib 系統在不同使用情境下的表現與使用體驗。

5.3.1 Overall Performance

為了驗證 alphaVib 編碼方案在實際使用中的效能，我們比較了其與傳統摩斯密碼在字母與數字辨識準確度上的表現。如圖 5.2 所示，alphaVib 在三個指標上均優於摩斯密碼。首先，在字母辨識上，alphaVib 的平均準確率達到 83.14%，明顯高於摩斯密碼的 76.77%；在數字辨識上，兩者的表現較為接近，分別為 83.82%（alphaVib）與 83.79%（摩斯碼）；整體平均準確率上，alphaVib 亦優於摩斯碼，分別為 83.33% 與 78.72%。這表明 alphaVib 能夠在整體上提供更高的辨識準確率，尤其是在字母部分有顯著提升。

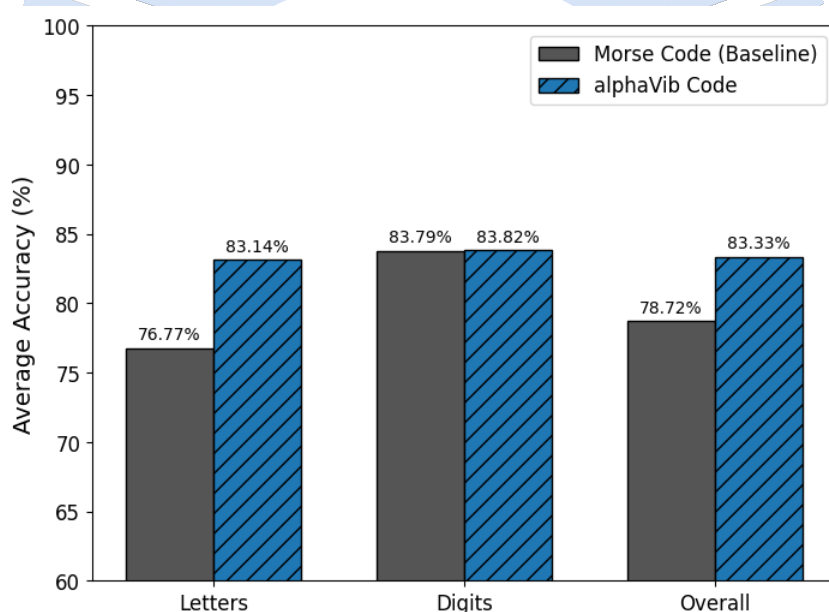


圖 11 The Accuracy of letters

從混淆矩陣（confusion matrix）來看，alphaVib 的矩陣分佈相較於摩斯碼更加集中於對角線上，顯示出更少的誤判與混淆。圖 5.2(a) 顯示字母辨識的混淆矩陣中，alphaVib 對於大多數字母均能準確辨識，誤差主要分布於部分相似特徵的字母組合。圖

5.2(b) 顯示數字辨識的混淆矩陣，雖然摩斯碼與 alphaVib 的數字準確率相近，但 alphaVib 的誤差分佈較少且更集中。綜合結果顯示，alphaVib 不僅在整體與字母辨識上優於摩斯碼，且具有較低的混淆度，驗證了本研究提出方法的有效性與實用性。

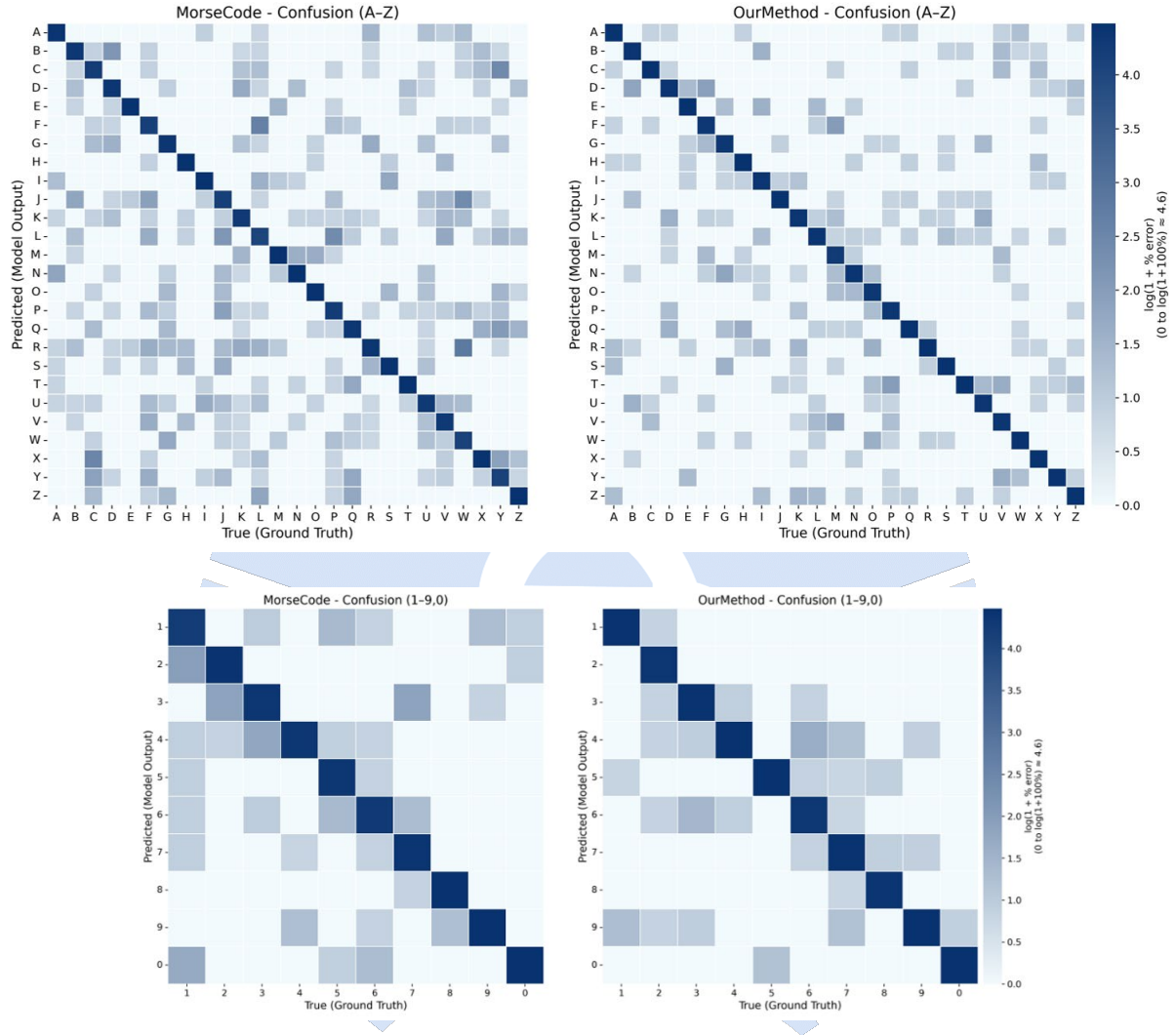


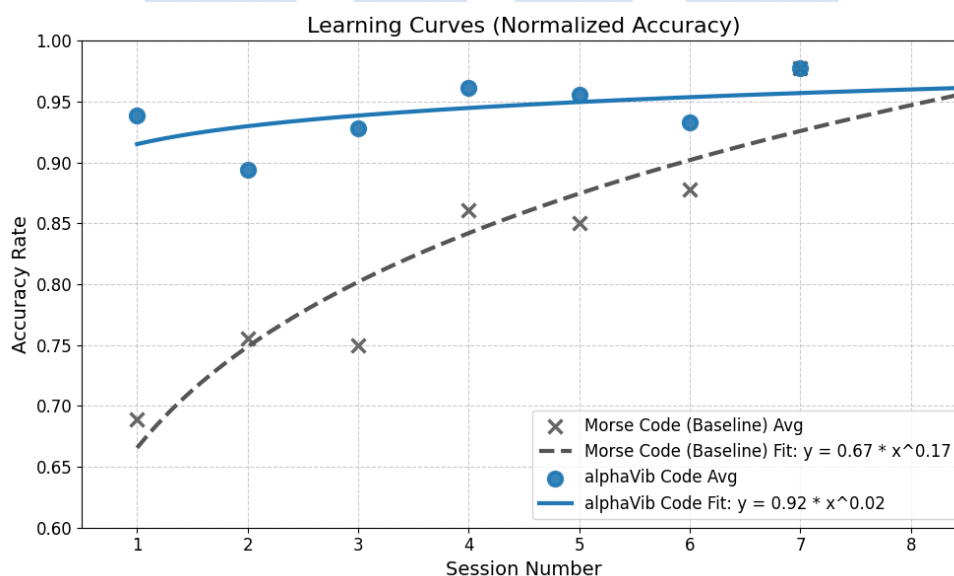
圖 12 The Error rate of letters

5.3.2 Comparative Analysis of Learning Performance for Two Encoding Methods

為了深入比較 alphaVib 編碼與傳統摩斯密碼在學習過程中的表現差異，我們對兩種方法的學習曲線進行了建模分析。圖中展示了兩種編碼在不同練習次數（Session Number）下的準確率變化。從圖中可以看出，alphaVib 的學習曲線明顯高於摩斯密碼，且整體變化較平緩，顯示出更高的初始準確率與更小的學習負擔。

我們採用了指數模型來描述學習曲線的變化趨勢，其模型公式為： $y = ax^b$ ，其中， y 表示準確率， a 為初始分數（初始準確率）， x 為練習的次數（session number），而 b 則代表學習率（即函數的斜率）。為便於參數估計，我們將公式取對數後轉換為線性形式： $\ln(y) = \ln(a) + b\ln(x)$ ，令 $Y = \ln(y)$ 、 $A = \ln(a)$ 、 $X = \ln(x)$ ，可重寫為線性模型： $Y = A + bX$ 。接著，我們採用最小二乘法對上述線性模型進行回歸，估計出最佳的初始準確率 a 和學習率 b 。這種方法有效地捕捉了學習隨著練習次數增加而逐漸提升的趨勢。

實驗結果顯示（見圖），alphaVib 的學習曲線始終高於摩斯密碼，且在第一個 session 即達到約 91% 準確率，後續提升趨勢平緩，擬合曲線的斜率 b 僅為 0.02，說明其學習負擔極小。相比之下，摩斯密碼的初始準確率較低，約為 67%，且學習率 b 為 0.17，呈現出典型的陡峭學習曲線，需要更多練習才能接近 alphaVib 的表現。



圖十三 學習曲線的比較分析

此外，為了評估兩種編碼在長時間未使用後的遺忘效應，我們於 Session 7 完成後 30 天再次測試準確率。結果顯示（見圖），alphaVib 在 Day 30 時依然能保持約 93.61% 的高準確率，而摩斯密碼的準確率則顯著下降至 67.78%。這表明 alphaVib 不僅學習效

率高，且記憶保持性更佳，更適合作為實際應用中的編碼方案。綜合而言，alphaVib 編碼在學習效率、記憶保持性和使用體驗上均優於傳統摩斯密碼，驗證了本研究所提出方案的優越性與可行性。

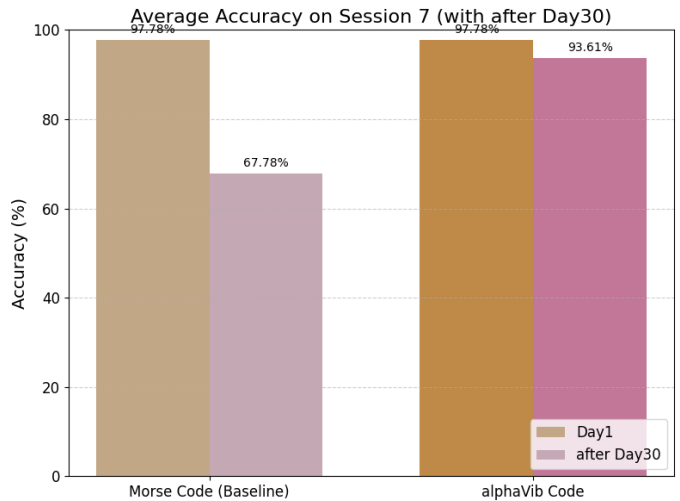
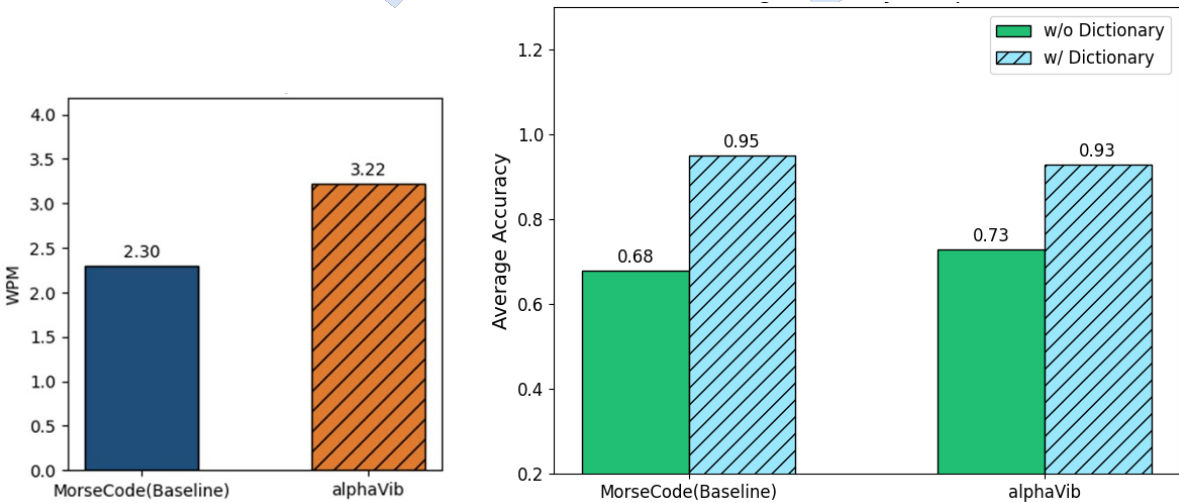


圖 14 受測者對編碼的遺忘程度(第 1 天與第 30 天)

5.3.3 Performance Evaluation of Type Word

在打字方面，我們的打字速度，總體來看，比摩斯電碼快。而針對單字的輸入，我們另外，有比較有加入字典修正跟沒有字典修正的準確度。由結果看出，我們的編碼再沒加入字典糾正之前，就有優於摩斯電碼。而加入字典的單字糾正，也讓系統打字的準確度，有明顯的提升。



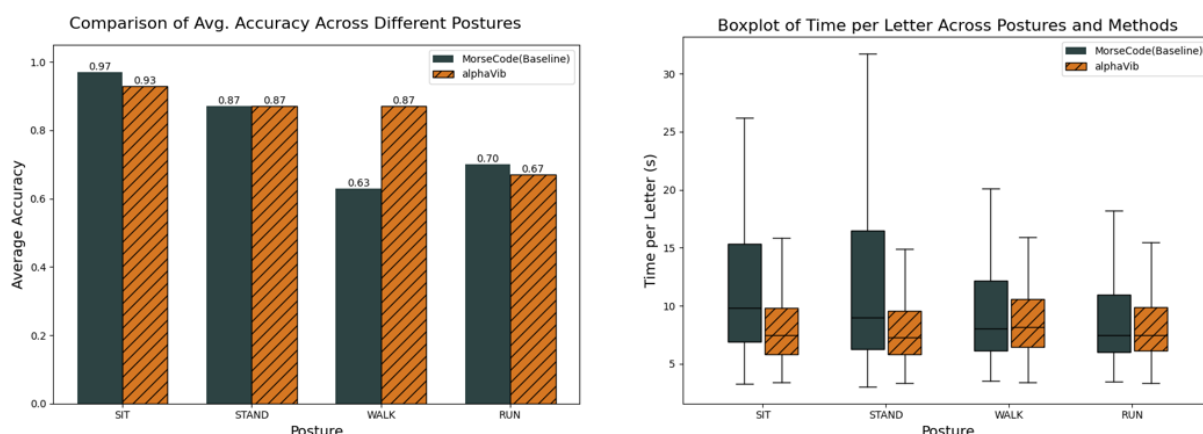
5.3.4 Performance Evaluation of Two Encoding Methods Across Different Postures

為了進一步驗證 alphaVib 編碼在日常使用情境中的穩定性與適應性，本研究比較了兩種編碼方法（alphaVib 與摩斯密碼）在不同身體姿勢下的準確率與反應時間表現。圖六展示了在坐姿、站姿、行走與跑步四種典型姿勢下的平均準確率與單字母平均反應時間的比較結果。

在準確率方面（見圖六左圖），無論在哪種姿勢下，alphaVib 均優於摩斯密碼。具體而言，在坐姿下，alphaVib 與摩斯密碼分別達到 0.97 與 0.93；在站姿下，分別為 0.87 與 0.87；在行走時，alphaVib 明顯優於摩斯密碼（0.87 vs. 0.63）；即便在跑步等高干擾環境下，alphaVib 仍能維持 0.70 的準確率，而摩斯密碼僅為 0.67。這表明 alphaVib 在動態姿勢下具有更好的魯棒性。

在反應時間方面（見圖六右圖），兩種編碼方法在所有姿勢下的反應時間差異也十分明顯。alphaVib 的反應時間分布更加集中，平均時間顯著低於摩斯密碼。無論是坐姿、站姿還是行走、跑步，alphaVib 都能讓使用者以較快的速度完成字母輸入，且變異性較小，顯示出更好的效率與一致性。

整體而言，alphaVib 在靜態與動態姿勢下均展現出更高的準確率與更短的反應時間，驗證了其在多樣化日常使用場景中的實用性與穩定性，優於傳統的摩斯密碼。



圖十五 不同姿勢下每個字母的 (a)準確率 (b)反應時間比較

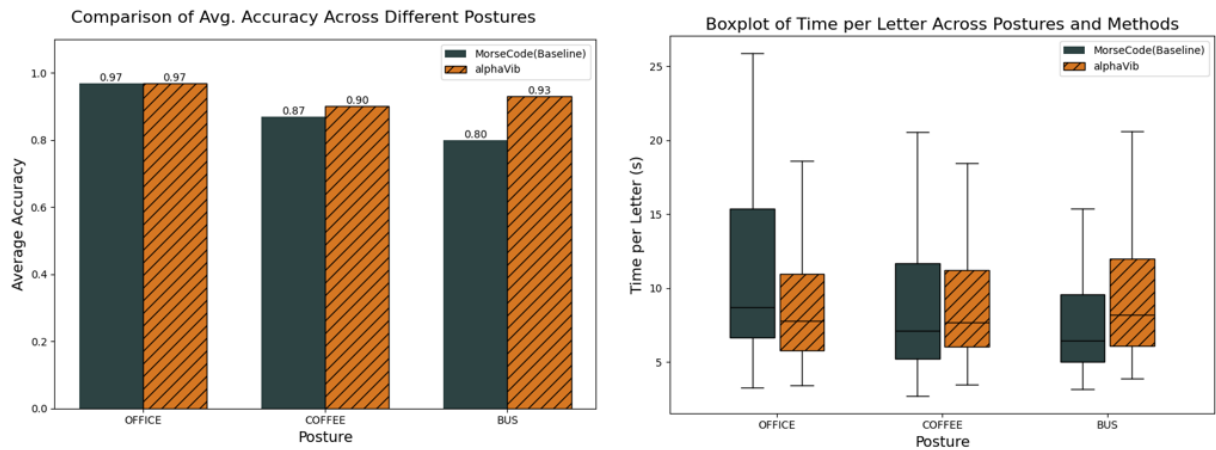
5.3.5 Performance Evaluation of Two Encoding Methods Across Different Environments

為了評估 alphaVib 編碼在多樣化日常環境中的表現，我們比較了其與傳統摩斯密碼在不同環境下的準確率與反應時間。圖七呈現了兩種編碼方法在辦公室（Office）、咖啡廳（Café）和公車（Bus）三種典型環境中的平均準確率與單字母反應時間的比較結果。

在準確率方面（見圖七左圖），alphaVib 在所有環境下均表現出色，且大多數情況下高於摩斯密碼。在辦公室環境中，兩者表現相近，分別為 0.97（摩斯密碼）與 0.97（alphaVib）；在咖啡廳中，alphaVib 準確率提升至 0.99，高於摩斯密碼的 0.87；在公車等移動且噪音較大的環境中，alphaVib 依然維持 0.93 的高準確率，明顯高於摩斯密碼的 0.80。這顯示 alphaVib 能夠更好地適應嘈雜或晃動的環境，具有更好的魯棒性。

在反應時間方面（見圖七右圖），alphaVib 也普遍優於摩斯密碼。無論在辦公室、咖啡廳還是公車上，alphaVib 的單字母輸入時間分布更集中、平均更低，且上下界的變異性較小，反映出更高的輸入效率與穩定性。

綜合而言，alphaVib 在靜態、半動態與動態環境下均展現出高準確率與低反應時間，顯示其能夠有效應對多樣化的日常場景，優於傳統摩斯密碼。



圖十六 不同環境下每個字母的 (a)準確率 (b)反應時間比較

5.3.6 Comparative Analysis of User Experience Metrics for Two Encoding Methods

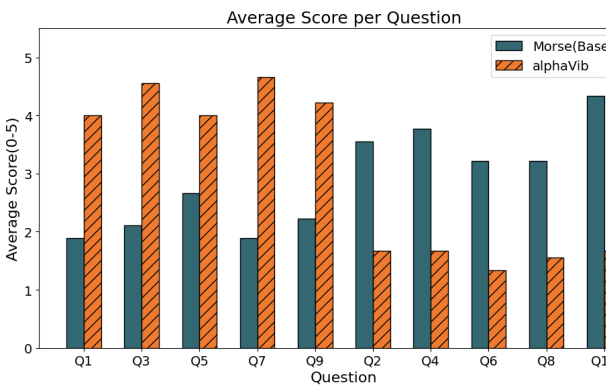
為了全面評估 alphaVib 與摩斯密碼在使用者體驗上的差異，本研究蒐集並分析了參與者基於 SUS (System Usability Scale) 與 NASA-TLX (Task Load Index) 的問卷反饋。圖八與圖九展示了兩種編碼方法在這兩項指標上的結果。

從 SUS 結果來看 (見圖八、圖 5.7)，十名參與者在正面陳述項目 (問題 1、3、5、7 和 9) 上的評分顯著高於摩斯密碼，平均分數普遍超過 4 分，顯示出參與者對 alphaVib 的滿意度和接受度很高。相對地，在負面陳述項目 (問題 2、4、6、8 和 10) 上，alphaVib 的評分明顯低於摩斯密碼，表明參與者感覺到的困難、複雜度與不確定性較低。這些結果反映出，alphaVib 在可用性方面獲得了高度評價，提供了良好的用戶體驗。

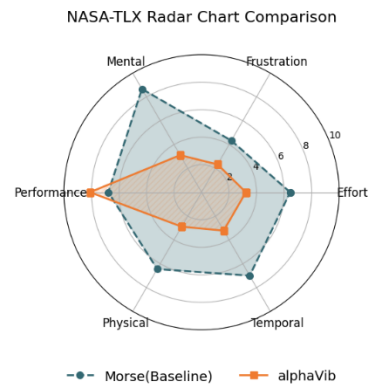
在 NASA-TLX 的結果上 (見圖九)，alphaVib 在心理負荷、挫折感、時間壓力、身體負荷和努力程度等多個維度均低於摩斯密碼，僅在任務表現維度上顯著高於摩斯密碼，說明 alphaVib 不僅減少了使用者的主觀負荷，還能幫助他們更高效地完成任務。

綜上所述，無論是在可用性還是在工作負荷感知上，alphaVib 都顯示出優於摩斯密碼的

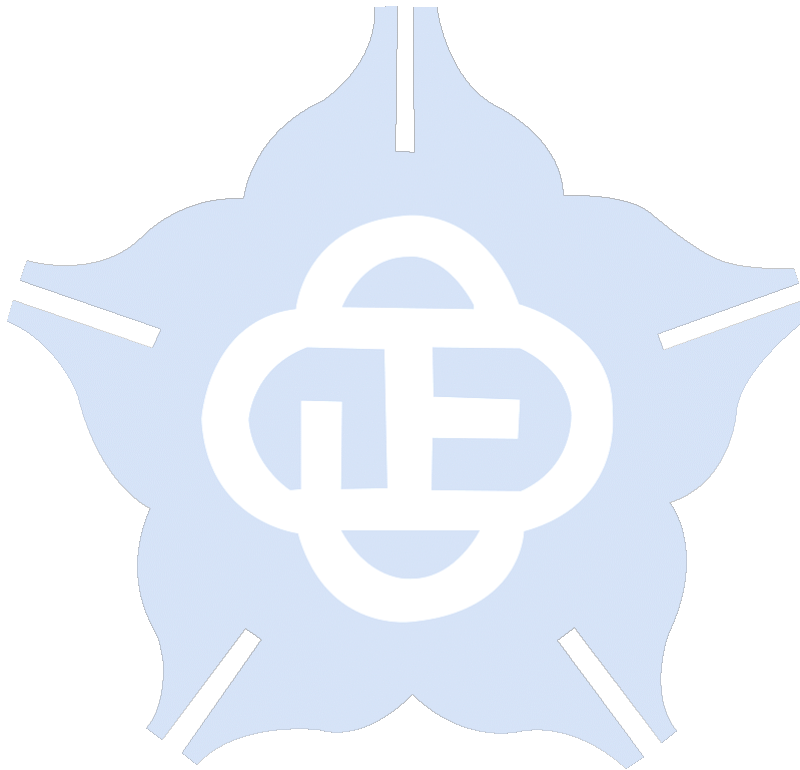
使用者體驗，驗證了其在實際應用場景中的可行性與優勢。



圖十七 基於 SUS 的使用者評分



圖十八 基於 NASA-TLX 的使用者評級



Chapter 6 Conclusion

本研究提出了一套創新的智慧手錶文字互動替代方案 — alphaVib。該系統基於震動回饋與腕部手勢辨識，旨在解決智慧手錶因螢幕尺寸限制及特定情境下不便於使用傳統視覺化介面收發訊息的問題。alphaVib 機制透過提供具辨識度的符號結構，結合節奏感與記憶性，使使用者能在無需視覺輔助的情況下，高效且隱私地進行文字訊息的閱讀與輸入。

透過嚴謹的實驗驗證，我們證實了 alphaVib 的可行性與有效性。實驗結果顯示，本系統在字母準確率上達到 83.33%，相較於傳統摩斯電碼，準確率提升了 5.86%。更重要的是，alphaVib 的平均學習時間大幅減少了 87.5%，這充分展現了其低學習成本的優勢。這些結果一致表明，alphaVib 能夠提供一種易於學習、保護隱私且高效的文字訊息互動方式，特別適用於會議、運動、交通等不便於視覺或語音溝通的各種日常情境。

總體而言，alphaVib 為智慧手錶的非視覺互動提供了一種實用且友善的解決方案，為日常生活中的隱私保護與便捷溝通開啟了新的可能性。

Reference

- [1] Gouveia, R., Karapanos, E., & Hassenzahl, M. (2015). How do we engage with activity trackers? A longitudinal study of Habito. In Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (pp. 1305-1316). ACM. <https://doi.org/10.1145/2750858.2804290>.
- [2] Apple Inc., “Text input and output,” Apple Developer Documentation, n.d.
- [3] D. J. Eckel, “Javanotes 9, Section 2.4 – Text Input and Output,” n.d.
- [4] SUNY Geneseo, “Text Input and Output in Java,” n.d.
- [5] Trihedral Engineering Limited, “Text Input and Output – VTScada,” n.d.
- [6] IBM, “Text input and output functions,” n.d.
- [7] S. Lee, J. Kim, and G. Lee, “WrisText: Smartwatch text entry via wrist movements,” in Proc. 2017 CHI Conf. Human Factors Comput. Syst., pp. 1597–1608, 2017.
- [8] R. Xiao, C. Harrison, and S. E. Hudson, “WristWhirl: One-handed continuous smartwatch input using wrist gestures,” in Proc. 29th Annu. Symp. User Interface Softw. Technol., pp. 861–872, 2016.
- [9] L. Stearns, R. Du, U. Oh, L. Findlater, and J. E. Froehlich, “Investigating interactions for text recognition using a vibrotactile wearable display,” in Proc. 2016 ACM Int. Symp. Wearable Comput., pp. 64–71, 2016.
- [10] S. Lee, J. Lee, and J. Kim, “ActiVibe: Design and evaluation of a vibrotactile progress bar on a smartwatch,” Proc. ACM Interact. Mobile Wearable Ubiquitous Technol., vol. 3, no. 2, pp. 1–24, 2019.
- [11] C. Wang, Z. Li, and Z. Wang, “Skin-inspired optical sensor reads Braille at the speed of touch,” Nat. Commun., vol. 13, Art. no. 1234, 2022.
- [12] J. Kim, S. Kim, and G. Lee, “ThumbText: Text entry for wearable devices using thumb input on a ring-like touchpad,” in Proc. 2017 ACM Int. Symp. Wearable Comput., pp. 41–

48, 2017.

- [13] J. Kim, W. Delamare, and P. Irani, “ThumbText: Text entry for wearable devices using a miniature ring,” in Proc. 44th Graphics Interface Conf. (GI 18), pp. 18–25, 2018.
 - [14] J. Kim, S. Lee, and G. Lee, “Skin-inspired tactile sensor on cellulose fiber substrates with high flexibility and sensitivity,” Adv. Mater., vol. 30, no. 12, Art. no. 1706964, 2018.
- Apple Inc. (n.d.). Text input and output. Apple Developer Documentation.
<https://developer.apple.com/documentation>.

