|  |
| --- |
| **國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告** |
|  |

低成本穿戴式精確簡易全波段PPG量測裝置研製計畫(II)

報告類別：□進度報告

■成果報告：■完整報告/□精簡報告

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫編號：NSTC111－2221－E－027－042－

執行期間： 110年 8月 1日至111年 7月 31日

執行機構及系所：國立臺北科技大學電機工程系（所）

計畫主持人：張正春

共同主持人：雙和醫院主治醫師 盧柏文

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：張翔峻

碩士班研究生-兼任助理：鍾季甫

大專生-兼任助理：童亮鈞

大專生-兼任助理：陳典璟

大專生-兼任助理：魏承遠

大專生-兼任助理：陳立凡

大專生-兼任助理：陳睿宸

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 \_\_\_ 份：

□執行國際合作與移地研究心得報告

□出席國際學術會議心得報告

□出國參訪及考察心得報告

|  |
| --- |
| 本研究具有政策應用參考價值： ■否 □是，建議提供機關\_\_\_\_\_\_\_  (勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關)  本研究具影響公共利益之重大發現：■否 □是 |

中 華 民 國 113 年 3 月 日

中文摘要

**中文關鍵詞**：全波段光體積描記圖法；微型光譜晶片；類神經網路；生醫訊號量測

光體積描記圖法（Photoplethysmography, PPG）已被廣泛應用於各種可穿戴裝置中，協助人們了解其健康狀況。目前，PPG的測量可以根據光譜使用進行分為單波長（SW）和多波長（MW）方法。由於單波長PPG容易受到運動干擾、接觸壓力、膚色、皮膚表面溫度等測量條件的影響，因此采用多波長PPG是一種有前途的方法，不僅可以提升信號品質，還可以探索額外的生理測量應用。全波段（AW）PPG具有巨大潛力。然而，傳統的PPG傳感器只能支持單一或少數波長的測量，無法實現全波段PPG的測量。在這個計劃中，我們利用創新的光譜感測技術實現全波段PPG，旨在開發一種低成本且便攜的全波段PPG設備，使用芯片級光譜儀。此外，還將研究和開發用於易於存取和準確測量的用戶端平台、帶有人工神經網絡技術的雲應用平台。

Abstract

Photoplethysmography (PPG) has been widely utilized in various wearable devices to assist individuals in understanding their health conditions. Currently, PPG measurements can be categorized into single-wavelength (SW) and multi-wavelength (MW) methods based on spectrum usage. Due to the susceptibility of single-wavelength PPG to disturbances such as motion artifacts, contact pressure, skin tone, and skin surface temperature, the adoption of multi-wavelength PPG is a promising approach. Not only does it enhance signal quality, but it also explores additional physiological measurement applications. The potential of all-wavelength (AW) PPG is anticipated. However, traditional PPG sensors can only support measurements of a single or a few wavelengths, making it impractical for achieving AW-PPG measurements. In this project, we aim to realize AW-PPG using innovative spectrum sensing technology. The goal is to develop a low-cost and portable AW-PPG device, utilizing chip-scale spectrometry. Additionally, research and development will be conducted on user terminal platforms (mobile and desktop) and a cloud application platform with artificial neural network technology for accessible and accurate measurements.

**Keywords**：All-Wavelength Photoplethysmography, Spectrum Microchip, Deep Neural Network, Biomedical Signal Measurement

**目錄**

[一、 前言 1](#_Toc160563772)

[二、 研究目的 1](#_Toc160563773)

[**1)** **研發微型 AW-PPG 量測模組** 1](#_Toc160563774)

[**2)** **設計 AW-PPG 量測控制之手機應用程式** 1](#_Toc160563775)

[**3)** **執行 IRB 試驗** 1](#_Toc160563776)

[**4)** **結合機器學習、深度學習以提升 AW-PPG 血糖量測精準度** 1](#_Toc160563777)

[三、 研究方法 2](#_Toc160563778)

[**1)** **微型 AW-PPG量測模組** 2](#_Toc160563779)

[**2)** **AW-PPG 量測控制之手機應用程式** 2](#_Toc160563780)

[**3)** **IRB 試驗** 3](#_Toc160563781)

[**4)** **結合機器學習、深度學習以提升 AW-PPG 量測精準度** 3](#_Toc160563782)

[四、 研究結果與討論 3](#_Toc160563783)

[五、 結論與展望 4](#_Toc160563784)

[六、 參考文獻 6](#_Toc160563785)

1. 前言

近年來隨著穿戴式裝置的盛行，可偵測生理資訊之穿戴式手錶或是手環已被視為近代文明不可或缺之配備之一，透過穿戴式裝置收集之生理訊息可做為如心跳快慢、血壓高低、心電圖波形、呼吸速率、血氧濃度、運動強度、睡眠深度等等的監測參考，幫助民眾監控身體健康狀況、確立健康促進方向，也期可以提供醫師監控資訊，做為疾病持續追蹤以及藥物治療的處方調整之參考依據。此外，自新冠(COVID-19)疫情爆發以來，個人化的智慧型穿戴式裝置更成為早期偵測新冠肺炎症狀的方法之一，透過穿戴式裝置蒐集之資料結合人工智慧可以有效對比與分析出確診患者，拼湊出新冠肺炎患者的圖型(pattern)，穿戴式裝置可能為警告使用者適時採取檢測的重要方式之一，而心律、血氧、血壓、咳嗽以及體溫的追蹤，可成為新冠肺炎感染與評估的指標之一。

光體積描記圖法(Photoplethysmography, PPG)已被廣泛應用於穿戴裝置以作為心律與血氧的便捷量測方法，已有許多學者[1][2]開始研究透過PPG 感測訊號萃取多項特徵以量測血糖，隨著科技進步，AI 領域議題也被大家所關注著，其中人工神經網路(ANN，Artificial Neural Network)是一種模仿人類大腦的結構和功能的數學模型，用於進行回歸、分類等問題，隨著 NPU 晶片的運算速度及效能提升，神經網路模型層數得以大幅加深，能夠訓練的神經元特徵數也隨之增加，使得神經網路模型有機會獲得更佳的學習結果。基於本計畫第一年的研發成果並將其延續，基於MWPPG的技術開發了全波長光譜感測AW-PPG裝置，本計畫採用全波長光譜感測以及結合機器學習與深度學習的方式，希望能將人工智慧相關的技術引入 AW-PPG 感測相關領域當中，以達到更精準、更穩健的量測結果。

1. 研究目的

本計畫目標為**探討高穩健度、高精確度之 AW-PPG 訊號採集技術**。並且研究如何有效整合低成本且微型之 AW-PPG 感測技術以應用於個人穿戴式裝置上，透過全波段之 PPG 感測訊號，提供簡易且快速檢測之 AW-PPG 感測裝置。

本計畫的目的有以下幾點：

* 1. **研發****微型 AW-PPG 量測模組**

為了能將多波長光譜感測技術應用於血糖量測上，本計畫開發一體積小、價格低、方便攜帶以及涵蓋多個波段的感測裝置，用以採集血液 PPG 資訊以利分析相關生理數據。

* 1. **設計 AW-PPG 量測控制之手機應用程式**

為了控制 AW-PPG 量測裝置及檢視光譜訊號，本計畫利用 Android Studio配合 Java 設計手機應用程式，方便使用者進行 AW-PPG 量測以及檢視數據。

* 1. **執行 IRB 試驗**

為獲得更多數量、更多樣性的 AW-PPG 訊號數據，本計畫團隊使用本計畫開發之 AW-PPG 裝置，與台北醫學大學合作於衛生福利部新國民醫院實際進行人體試驗，收集數據以進行 AI 模型訓練。

* 1. **結合機器學習、深度學習以提升 AW-PPG 血糖量測精準度**

訓練數據量多寡，始終是決定模型好壞的關鍵，然而並非所有資料的獲取方式都很簡單，尤其在醫學領域，每筆資料的蒐集更是得來不易，為了解決這些問題，本計畫透過深度學習方法，以利提升 AW-PPG 量測的精準度進而驗證血液資訊量測的準確度。

1. 研究方法
   1. **微型 AW-PPG量測模組**

為了改善上一代的感測裝置，本實驗室於本計畫的第一年，演示了 MW-PPG 便攜式設備的構造並進行了初步評估。展示的設備由四個發光二極體、一個微型光譜儀、一個微控制器、一個低功耗藍牙收發器和一個手機應用程式組成。最大比合併算法 (MRC) 用於合併來自不同波長的 PPG 信號以實現更好的信噪比(S/N)。開發的 MRC-AW-PPG 設備的 PPG 信號與傳統 SW-PPG 設備的 PPG 信號在不同的血壓條件下進行了比較，且觀察到 MRC-AW-PPG 裝置可以提供比傳統 PPG 裝置更穩定的 PPG 信號，結果顯示使用多波長進行下一代非侵入式 PPG 感測的潛在好處。上述之研究成果“Development of a Portable All-Wavelength PPG Sensing Device for Robust Adaptive-Depth Measurement: A Spectrometer Approach with a Hydrostatic Measurement Example”, 已刊登至 Sensors vol. 20, no. 6556, Nov, 2020。

一張含有 文字, 圖表, 螢幕擷取畫面 的圖片

自動產生的描述

圖1. 本研究團隊發表於 Sensors 期刊之 AW-PPG 量測方法

本計畫所設計之 AW-PPG 量測模組如圖 1 所示，其中在光源方面使用 3 組 LED 分別為綠光(波長 515nm)、白光(色溫 6500K)以及紅外光(波長 940nm)，在 AW-PPG 訊號感測端使用 nanoLambda 所開發之微型光譜儀作為接收端感光元件，相較於傳統光譜儀動輒數平方公分，此感測器僅佔有數平方微米，由於其構造並未使用光柵、焦透鏡等精密光學元件，在使用上微小且輕便，AW-PPG量測模組可同時採集包含 400nm、405nm、410nm、……、990nm、995nm、1000nm 共 121 個波長 PPG 訊號，並可同時解析多個波長之 PPG 感測訊號。

* 1. **AW-PPG 量測控制之手機應用程式**

AW-PPG量測控制之手機應用程式，如圖 2 所示。為了控制 AW-PPG 量測裝置及檢視光譜訊號，本研究利用 Android Studio 配合 Java 設計一支手機應用程式。手機端利用藍牙將量測指令傳給 AW-PPG 控制電路板。AW-PPG 控制電路板接收指令後控制光源模塊開關燈以及控制微型光譜感測晶片 NSP32 擷取光譜訊號，並將擷取的光譜訊號回傳給手機端，亦可進行全波段光譜收集，記錄於CSV 檔傳送至雲端進行儲存，提供使用者檢視並分析相關應用，對血液資訊量測進行數值評估。

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 行動電話, 小工具 的圖片

自動產生的描述

圖2. 計畫已開發AW-PPG量測控制之App主畫面

* 1. **IRB 試驗**

本計畫團隊以所開發好之 AW-PPG 裝置實際進行人體試驗，進而驗證血液量測的準確度。結合人工智慧的演算法預測穩健程度與精確度，此外，為了提高收集 AW-PPG 原始訊號之效率與可用性也將持續改善本裝置，提供使用者更好的量測體驗。

一張含有 服裝, 人員, 足部穿著, 男人 的圖片

自動產生的描述

圖 3. 本研究團隊與 IRB 合作醫院之醫師於新國民醫院合影

* 1. **結合機器學習、深度學習以提升 AW-PPG 量測精準度**

透過AW-PPG量測裝置所收集的 121 個特徵作為神經網路模型之輸入，在此神經網路模型架構中，損失函數(Loss function)採用分類交叉熵(Categorical Cross Entropy)，優化器(Optimizer)採用 Adam，基於感測器所使用的綠光、白光及紅外光 3 種 LED 光源，每名受測者擷取30筆PPG 訊號，因每月一次大批採集數據，所以後續以月份作為資料集區別，再分別建立各月份的訓練集、驗證集與測試集方便後續進行三次交叉驗證。

1. 研究結果與討論

在本文中，我們利用光源經由皮膚反射後，聚集於中心點以利 AW-PPG 感測器之採集，其中在光源方面使用 4 組 LED 分別為綠光(波長 525nm)以及紅外光(波長 940nm)再加上2顆白光(6500K)，四個光源之微型全波段 AW-PPG量測裝置，採集由400nm至1000nm(400、405、410、……、990、995、1000)共121 段光譜訊號，有鑑於人體實驗數據採集的困難，我們在同光源下採集30筆光譜訊號以訓練血液資訊量測模型，實現數據擴增以增加數據採集量，我們將受測者抽血報告的實際數值作為 ground-truth。

各資料集之血糖量測模型架構如表1 所示，利用收集之數據以 75%、5%及 20%比例依序分為訓練數據(Train Data)、驗證數據(Valid Data)及測試數據(Test Data)訓練目標模型以適用於微型全波長AW-PPG量測裝置。

表1. AW-PPG architecture for each datasets

|  |  |
| --- | --- |
| Layer | Operator |
| 1 | FC 121x64 + ReLU |
| 2 | FC 64x32 + ReLU |
| 3 | FC 32x16 + ReLU |
| 4 | FC 16x8 + ReLU |
| 5 | FC 8x16 + ReLU |
| 6 | FC 16x32 + ReLU |
| 7 | FC 32x64 + ReLU |
| 8 | FC 64x2 |

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 繪圖, 字型 的圖片

自動產生的描述

圖4.受測者AW-PPG量測光譜分析圖

在數據測試方面，我們以原先採集之 801 筆數據進行測試，採集的光譜如圖4所示，其中紅色代表實際數值低於正常值，綠色代表實際數值介於正常值區間，藍色則代表實際數值高於正常值。利用這些光譜所建立資料集，進行AI模型訓練後，AI模型的預測準確率約落在70%，從結果顯示利用AW-PPG結合機器學習、深度學習提升血糖預測準確率的可行性。

1. 結論與展望

本計畫開發之微型量測模組採集 AW-PPG 訊號，利用三種光源採集 121 波長之AW-PPG 感測訊號，基於各光源所訓練之血液資訊量測模型，以全波段光譜訊號經由相對應的神經網路模型預測各血液資訊數值，以此方法在血糖預測準確度方面最高可達到70% 之準確率，此外在臨床試驗方面，我們亦額外採集之數據進一步驗證本文所開發。

現今在臨床上量測血液通常需要使用按針這種侵入式的方式，而在非侵入式方面 PPG 訊號已可量測血氧與心律的數值，對於其他血液生理數值其相關性卻是未知的。本計畫未來可持續進行研製全波段(All-wavelength, AW-PPG)感測系統與探討用於血液資訊數值預測的深度學習演算法，有效增加 PPG 感測技術之量測波段以實現全波段感測並同時實現體積小且高取樣頻率之 AW-PPG 感測技術，且實際進入醫院進行生醫訊號的收集量測實驗，得到患者的 AW-PPG 訊號以及血液相關資訊，例如:白血球計數、紅血球計數、血紅素、血比容、平均血球容積、平均紅血球血紅素量、平均紅血球血紅素濃度、血小板計數……等，利用類神經網路架構進行分類預測，以找到AW-PPG 訊號與血液資訊的相關性，同時持續進行人體試驗，期許能在未來提供更準確與更多樣性的生理資訊評估，未來可基於此計畫所累積之研究經驗，更進一步探討AW-PPG 訊號與血液之間相關性，若能成功創新建立一個非侵入式血液監測平台，此關鍵技術勢必帶來龐大的商業與學術價值。

1. 參考文獻
2. Yen, Chih-Ta et al. “Non-Invasive Blood Glucose Estimation System Based on a Neural Network with Dual-Wavelength Photoplethysmography and Bioelectrical Impedance Measuring.” Sensors (Basel, Switzerland) vol. 22,12 4452. 12 Jun. 2022, doi:10.3390/s22124452
3. Hina, Aminah, and Wala Saadeh. “Noninvasive Blood Glucose Monitoring Systems Using Near-Infrared Technology-A Review.” Sensors (Basel, Switzerland) vol. 22,13 4855. 27 Jun. 2022, doi:10.3390/s22134855
4. C. C. Chang, C. T. Wu, B. I. Choi and T. J. Fang, “MW-PPG sensor: An on-chip spectrometer approach,” Sensors, vol. 19, no. 17, pp. 3698, 2019.
5. S.-H. Chen, Y.-C. Chuang and C.-C. Chang, “Development of a Portable All-Wavelength PPG Sensing Device for Robust Adaptive-Depth Measurement: A Spectrometer Approach with a Hydrostatic Measurement Example,” Sensors, vol. 20, no. 22, pp. 1-12, Nov. 2020.
6. L. Yan, S. Hu, A. Alzahrani, S. Alharbi and P. Blanos, “A multi-wavelength opto-electronic patch sensor to effectively detect physiological changes against human skin types, ” Biosensors, vol. 7, no. 2, pp. 1-12, June 2017.
7. Y. Zhang et al. “Motion artifact reduction for wrist-worn photoplethysmograph sensors based on different wavelengths,” Sensors, vol. 19, no 3, pp.673, Feb. 2019.
8. Qawqzeh, Yousef K et al. “Classification of Diabetes Using Photoplethysmogram (PPG) Waveform Analysis: Logistic Regression Modeling.” BioMed research international vol. 2020 3764653. 11 Aug. 2020, doi:10.1155/2020/3764653

附件一：專利核准審定書封面

一張含有 文字, 螢幕擷取畫面, 字型, 文件 的圖片

自動產生的描述

**國家科學及技術委員會補助專題研究計畫成果彙整表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **計畫主持人：張正春** | | | | **計畫編號：NSTC 111－2221－E－027－042－** | | | |
| **計畫名稱：低成本穿戴式精確簡易全波段PPG量測裝置研製計畫(II)** | | | | | | | |
| 成果項目 | | | | | 量化 | 單位 | 質化  （說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等） |
| 國  內 | 學術性論文 | 期刊論文 | | | 0 | 篇 | 請附期刊資訊。 |
| 研討會論文 | | | 1 |  |
| 專書 | | | 0 | 本 | 請附專書資訊。 |
| 專書論文 | | | 0 | 章 | 請附專書論文資訊。 |
| 技術報告 | | | 0 | 篇 |  |
| 其他 | | | 0 | 篇 |  |
| 國  外 | 學術性論文 | 期刊論文 | | | 1 | 篇 | 請附期刊資訊。 |
| 研討會論文 | | | 0 |  |
| 專書 | | | 0 | 本 | 請附專書資訊。 |
| 專書論文 | | | 0 | 章 | 請附專書論文資訊。 |
| 技術報告 | | | 0 | 篇 |  |
| 其他 | | | 0 | 篇 |  |
| 參與計畫人力 | 本國籍 | | 大專生 | | 5 | 人次 | 童亮鈞、魏丞遠、陳典璟、陳立凡、陳睿宸 |
| 碩士生 | | 1 | 張翔峻 |
| 博士生 | | 0 |  |
| 專任人員(博士級) | | 0 |  |
| 專任人員(非博士級) | | 0 |  |
| 非本國籍 | | 大專生 | | 0 |  |
| 碩士生 | | 0 |  |
| 博士生 | | 0 |  |
| 專任人員(博士級) | | 0 |  |
| 專任人員(非博士級) | | 0 |  |
| 其他成果  (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。) | | | | | 1. 本計畫成果 已通過一發明專利 | | |