

人型機器人之穿戴式體感控制技術 Wearable Somatosensory Technology for Humanoid Robot Control

許煜亮*、張興政、蘇科銘、蕭景元、何儒昇

逢甲大學自動控制工程學系，台中，台灣

* Corresponding Author / E-mail: hsuyf@fcu.edu.tw, TEL: +886-91-916-5963

關鍵字：穿戴式體感技術、人體身體感測網路、即時人體動作追蹤、人形機器人

本論文旨在透過穿戴感測及物聯網技術來加以開發穿戴式體感之人型機器人控制系統，用以即時追蹤人體姿態並藉此操控人型機器人。穿戴式體感之人型機器人控制系統的系統架構包含了：(1)人體身體感測網路、(2)即時人體動作追蹤操控演算法、(3)資訊處理模組、(4)人機協同監控介面及(5)智慧型人型機器人，其透過配戴於人體全身的人體身體感測網路來加以量測使用者上肢及下肢在三維空間中動作時所產生的動作訊號，在電腦端方面則是透過資訊處理模組開發設計多對一的無線射頻傳輸技術來加以接收感測資訊，並傳送至人機協同監控介面進行即時人體動作追蹤操控演算法開發。本論文透過接收即時人體動作追蹤操控演算法之運算結果實現於智慧型人型機器人上肢及下肢之協同控制之目的。最後，經由實驗結果成功地驗證此穿戴式體感之人型機器人控制系統及其相關演算法之有效性。

1. 前言

近年來，為因應工業生產自動化與客製化，德國於2013年正式於漢諾威工業博覽會中提出「工業4.0」，其核心概念是將產業供應鏈聯網化並達到智慧生產，其中可分為4個層面，分別是大數據(Big Data)、物聯網(Internet of Things, IoT)、智慧型機器人(Intelligent Robot, IR)及雲端運算(Cloud Computing)，透過整合智慧感測技術及智慧型計算演算法，來加以達到更高且穩定的生產效率，並藉此節省人力與設備維護的相關支出；因此，以大數據(Big Data)、物聯網(IoT)、智慧型機器人(IR)及雲端運算(Cloud Computing)等技術為基礎的工業4.0已成為目前新興科技的發展趨勢。我國在2015年提出「生產力4.0」，透過開發及整合智慧機械、物聯網、巨量資料處理與雲端運算等相關技術，以提升產業之附加價值，而為維持國際競爭力亦訂定了「五加二」產業創新計劃，「智慧機械」即為五大創新產業政策之一，其目的在於融合物聯網、機械手臂控制、感測技術、大數據處理及雲端運算等技術，並藉此推動產業朝向設備智能化、工廠智慧化與系統虛實化發展，以創造產業下一波的成長新動能。

在智慧感測技術方面，由於近年來微機電製程技術與感測技術的重大突破，使得微型慣性感測器的穩定度大幅提升、體積縮小及價格降低；進而使得以慣性感測器為主的穿戴式裝置之相關產品與應用得以蓬勃發展。根據IDTechEx估測穿戴式科

技裝置產值將由2016年的300億美元成長至2026年的1500億美元。Gartner指出穿戴式裝置產值在2020年將高達515.45億美元。IDC預測穿戴式裝置市場到了2023年出貨量將成長至3.023億台。因為微型慣性感測器的輕量化、小體積、低功耗、低成本及高可靠度等優點，以慣性感測器為主的穿戴式載具已逐漸獲得矚目，且廣泛地應用於人體運動偵測研究上，其相關研究議題如：(1)日常活動量監測、(2)關節活動度量測、(3)步態偵測分析、(4)日常生活動作辨識、(5)運動姿態估測及(6)運動軌跡重建等。另一方面，在智慧型機器人方面，包括庫卡(KUKA)、Asea Brown Boveri (ABB)、發那科(FANUC)及安川電機(YASKAWA)等全球機器人四大家族亦積極投入工業4.0的相關應用，用以結合人機協作與物聯網技術來創造更便利及安全的工作環境。Myria Research研究機構指出2015年全球機器人和自動化產業的產值為640億美元，並以每年30%的年複合成長率快速增加，至2025年總產值高達1.2兆美元。

Olofsson等人[1]將慣性量測單元放置於機械手臂的關節上，藉由擴展式卡爾曼濾波器融合其慣性資訊，來估測其工具位置及機械手臂之運動姿態。Cheng與Oelmann[2]利用兩軸加速度計與單軸陀螺儀來量測剛體之關節角度，並結合剛體運動學來分析其演算法的優劣，相較於市售的光學量測分析儀，他們所提出的關節角度量測方法更加舒適且方便。Motos等人[3]提出一運動學演算法，此方法藉由加速度計所量測人體手臂的五個自由度，及利用磁力計所量測之肩膀位置來估測人體手

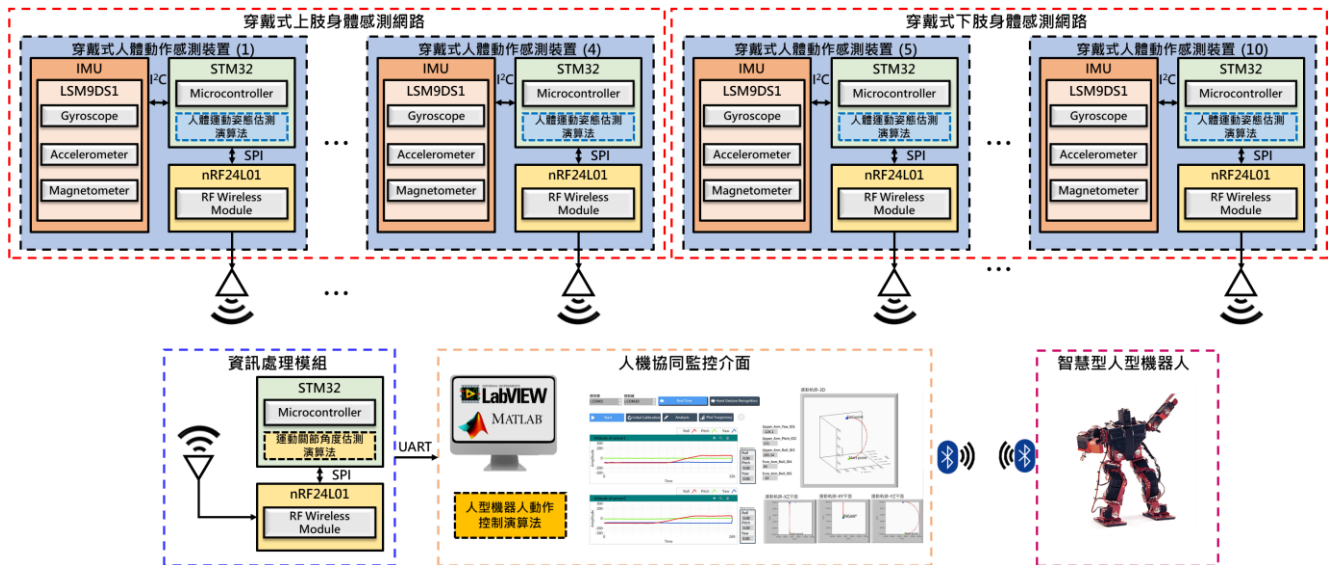


圖1 穿戴式體感之人型機器人控制系統之系統架構圖。

臂關節運動模式並藉此協助病人。此演算法主要是利用廣義偽逆矩陣(Pseudo Inverse)來進行運算，其運算結果適用於肩膀處於靜止與運動時狀態。Gohary等人[4]提出一套結合加速度計、陀螺儀和磁力計感測資訊的無跡式卡爾曼濾波器(Unscented Kalman Filter, UKF)演算法，用以擷取到較準確之運動訊號。Wilson等人[5]提出了一種用於慣性量測的新型感測器融合演算法，此演算法可降低磁傾角的影響，從而改善了作者先前提出的梯度下降演算法之缺點。此新型感測器融合演算法在減少計算時間的同時提高了準確性和穩定性，並且透過實驗融合了慣性和機械肌電圖，以控制機器人手臂的運動並進行抓握的動作，證明了此演算法的功效。Hartley等人[6]開發了接觸輔助不變擴展式卡爾曼濾波器(Contact-Aided Invariant Extended Kalman Filter)，其融合了接觸慣性動力學與正向運動學，以估計姿態、速度及所有當前接觸點，使其能獲得腿式機器人所需的姿態和速度方面等資訊，來加以保持機器人之穩定性並執行步行路徑。

2. 系統架構

本論文旨在開發一套以穿戴感測及物聯網技術為基礎之穿戴式體感之人型機器人控制系統及其即時人體動作追蹤操控演算法，用以即時追蹤人體姿態並藉此操控智慧型人型機器人之上肢及下肢動作，其包含：**(1)人體身體感測網路**：透過將自行研製之穿戴式人體動作感測裝置配置於人體全身來加以建置人體身體感測網路，進而量測人體肢幹在運動時所產生的動作訊號；**(2)即時人體動作追蹤操控演算法**：包含開發於1)穿戴式人體動作感測裝置中的人體運動姿態估測演算法、2)資訊處理模組中的運動關節角度估測演算法及3)人機協同監控介面中的人型機器人動作控制演算法；**(3)資訊處理模組**：透過無線射頻傳輸模

組以多對一無線傳輸的方式接收人體身體感測網路中經由人體運動姿態估測演算法所運算之人體全身肢幹運動姿態資訊後，利用運動關節角度估測演算法來加以計算人體運動關節角度；**(4)人機協同監控介面**：透過通用異步接收發送器(UART)接收資訊處理模組中經由運動關節角度估測演算法所運算之人體運動關節角度後，利用人型機器人動作控制演算法來加以產生智慧型人型機器人的運動控制指令及其上下肢在三維空間中的移動軌跡，並將其即時顯示於介面上；**(5)智慧型人型機器人**：透過藍牙無線傳輸模組接收人機協同監控介面所傳送之運動控制指令，並加以執行。本論文之穿戴式體感之人型機器人控制系統之系統架構圖如圖1所示。

2.1 人體身體感測網路

為了準確地量測到使用者上下肢在三維空間中運動時所產生的運動訊號，本論文整合STM32F746微控制器、慣性感測器(LSM9DS1)、無線射頻傳輸模組(nRF24L01)及電源供應模組來實現穿戴式人體動作感測裝置，並將其配戴於使用者上下肢中上臂、前臂、大腿、小腿及腳背共10個部位，來加以建置一套人體身體感測網路，用以即時量測人體上下肢在三維空間中運動時所產生的加速度、角速度及磁力訊號。接著，將經由實現於穿戴式人體動作感測裝置中的人體運動姿態估測演算法所計算之人體全身肢幹運動姿態資訊，以多對一無線傳輸的方式傳送至資訊處理模組，進行後續的演算法開發及智慧型人型機器人之控制，如圖1所示。

穿戴式人體動作感測裝置包含了STM32F746微控制器、慣性感測器(LSM9DS1)、無線射頻傳輸模組(nRF24L01)及電源供應模組，其尺寸為直徑35.0 mm及厚度12.0 mm，電路實體圖如圖2所示。以下就穿戴式人體動作感測裝置中的主要元件進行簡述：**(1)微控制器(STM32F746)**：穿戴式人體動作感測裝置採用具有低成本、低耗電、小體積、高性能及浮點運

算等特性之意法半導體公司基於ARM 32-bit Cortex®-M7處理器所開發之STM32F746，作為穿戴式人體動作感測裝置的控制核心；其為一具有32位元且工作時脈可達216 MHz之微控制器；其週邊通訊介面包含4組內部整合電路(I²C)、4組通用同步異步接收發送器(USART)、4組通用異步接收發送器(UART)、4組序列週邊介面(SPI)、2組控制器區域網路(CAN Bus)及82個泛用輸入輸出腳位(GPIO)等多組週邊溝通介面；此外，亦包含320 KB的RAM。STM32F746微控制器在穿戴式人體動作感測裝置中的主要工作任務為整合慣性感測模組、無線射頻傳輸模組及電源管理模組等硬體模組，並進行人體上下肢運動訊號之感測及讀取等工作任務，其可透過I²C溝通介面與慣性感測模組進行人體全身肢幹運動訊號讀取；接著，我們亦透過STM32F746微控制器中的浮點運算功能來加以開發即時人體動作追蹤操控演算法中的人體運動姿態估測演算法，進而獲得人體全身肢幹運動姿態資訊；最後，透過SPI溝通介面與無線射頻傳輸模組進行運動感測訊號及運動姿態資訊之無線傳輸任務。

(2) 慣性感測模組(LSM9DS1)：慣性感測模組(LSM9DS1)主要用以量測人體全身肢幹在三維空間中運動時所產生的運動訊號(加速度、角速度及磁力訊號)，並透過I²C通訊介面將該訊號傳送至微控制器(STM32F746)，其取樣頻率為50 Hz，共包含了下列3種感測元件：1)加速度計：主要用以量測人體動作時所產生的加速度訊號，其量測範圍可達±16 g，解析度為16 bit/s，靈敏度為0.732 mg/LSB；2)陀螺儀：主要用以量測人體動作時所產生的角速度訊號，其量測範圍可達±2000 °/s，解析度為16 bits，靈敏度為70 mdps/LSB；3)磁力計：主要用以量測人體動作時所產生的磁力強度訊號，其量測範圍可達±16 Gauss，解析度為16 bits，靈敏度為0.58 mGauss/LSB。

(3) 無線射頻傳輸模組(nRF24L01)：無線射頻傳輸模組(nRF24L01)主要透過SPI通訊介面與微控制器(STM32F746)相互傳遞訊號，將微控制器(STM32F746)所量測之人體全身肢幹運動訊號及其人體運動姿態估測演算法所計算而得的人體全身肢幹運動姿態資訊，以多對一無線傳輸的技術傳送至資訊處理模組。該模組除了擁有低耗能之特性外還支援多種低功率底下的工作模式；封裝大小為4.0 mm × 4.0 mm × 0.8 mm，並且具備2.4G Hz ISM頻段以及空中的資料傳輸速率可達2 Mbps。

(4) 電源供應模組：本穿戴式人體動作感測裝置採用鋰電池作為電源供應來源，其尺寸為42.0 mm × 30.0 mm × 2.0 mm，電源容量為360 mAh，可提供3.7 V之電壓源。此外，使用鋰電池充電IC (TP4056)提供鋰電池的充電行為，其IC在充電過程中可輸出500 mA的充電電流，其尺寸為25.0 mm × 19.0 mm × 10.0 mm，其工作溫度介於-10.0 °C~85.0 °C。

2.2 資訊處理模組

本論文在電腦端利用STM32F746微控制器作為資訊處理模組之系統控制核心，其可透過SPI通訊介面與無線射頻傳輸模組溝通，進而透過無線射頻傳輸模組與10個穿戴式人體動作感測裝置進行多對一的無線傳輸，同時收集配戴於人體全身的人體身體感測網路(包含配戴於人體上臂、前臂、大腿、小腿及腳背等10個部位的穿戴式人體動作感測裝置)所傳送之人體全

身肢幹在三維空間中的運動訊號及運動姿態資訊；接著，我們亦透過STM32F746微控制器中的浮點運算功能來加以開發即時人體動作追蹤操控演算法中的運動關節角度估測演算法，進而獲得人體全身運動關節角度(Range of Motion, ROM)；最後，透過通用異步接收發送器(UART)通訊介面將人體全身肢幹運動訊號、運動姿態資訊及運動關節角度傳送至人機協同監控介面中即時顯示。

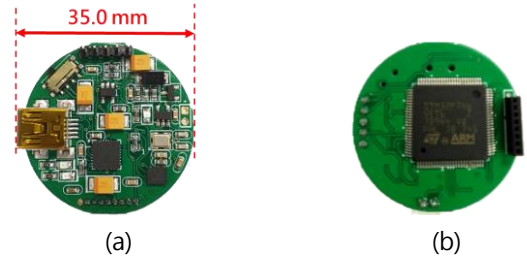


圖2 穿戴式人體動作感測裝置。(a)正面電路實體圖；(b)背面電路實體圖。

2.3 人機協同監控介面

本論文使用LabVIEW 2019來加以開發穿戴式體感之人型機器人控制系統之人機協同監控介面，如圖3所示，其工作任務在於接收(1)配戴於人體各個部位的穿戴式人體動作感測裝置所量測的人體動作訊號；(2)穿戴式人體動作感測裝置中人體運動姿態估測演算法所計算的人體全身肢幹運動姿態資訊及(3)透過資訊處理模組中運動關節角度估測演算法所計算的人體全身運動關節角度後，來加以開發即時人體動作追蹤操控演算法中的人型機器人動作控制演算法，並傳送控制指令至智慧型人型機器人進行人體動作追蹤控制任務；最後，透過正向運動學將智慧型人型機器人之運動軌跡顯示於人機協同監控介面上。在人機協同監控介面設計方面，該介面共包含了：**(1)系統操作區：**使用者可在該操作區選擇系統之序列埠，並按下開始按鈕後，人機協同監控介面便會透過資訊處理模組中的STM32F746微控制器與人體身體感測網路中的穿戴式人體動作感測裝置進行溝通，並接收其所傳送過來的人體全身肢幹運動訊號及運動姿態資訊；此外，亦會接收資訊處理模組所運算之運動關節角度。若使用者按下停止按鈕後，則將會結束感測資料的傳輸工作。**(2)訊號即時顯示區：**當系統持續啟動時，系統會藉由人體身體感測網路接收使用者人體全身肢幹運動訊號及運動姿態資訊，並藉由資訊處理模組所估測之人體各個關節之活動角度，並即時地顯示於該顯示區。**(3)馬達管理區：**透過開發即時人體動作追蹤操控演算法中人型機器人動作控制演算法，即可將人體關節活動角度轉換成控制命令，並透過藍牙無線傳輸模組傳送至智慧型人型機器人的微控制器中，進而控制智慧型人型機器人之各個關節中的馬達轉動角度，並將其加以即時顯示，以提供使用者監控智慧型人型機器人即時狀態。**(4)軌跡圖顯示區：**透過人型機器人動作控制演算法中的正向運動學將智慧型人型機器人之端點(End Point)運動軌跡顯示於人機協同監控介面上。

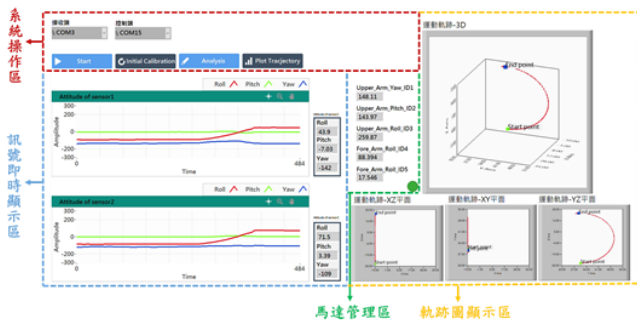


圖3 人機協同監控介面。

2.4 智慧型人型機器人

本論文所使用之智慧型人型機器人為 16 軸自由度之機器人。如圖 4 所示，其機體為鋁合金結構，其高度為 34.0 cm，肩寬度為 19.3 cm，雙手平舉之寬度為 42.0 cm，雙腳張開之寬度為 48.0 cm，關節馬達扭力為 10.8 Kg-cm，以單板電腦 BASIC Commander 為控制核心，內含 8 bit 的 MTP 微控制器，具 16 Channel 伺服機驅動電路及配備 16 個金屬齒輪伺服機，以 BASIC 語言編寫操控程式並符合 CmdBUS 通訊協定架構，可透過藍牙無線傳輸模組與人機協同監控介面進行資料傳輸，用以接收人機協同監控介面中人型機器人動作控制演算法所轉譯的關節馬達控制命令，藉此達到智慧型人型機器人之人體動作追蹤之目的。



圖4 智慧型人型機器人之實體圖。

3. 即時人體動作追蹤操控演算法

本論文之穿戴式體感人型機器人控制系統會透過配戴於人體全身的人體身體感測網路來加以量測使用者上肢及下肢在三維空間中動作時所產生的動作訊號，並開發一套整合人體運動姿態估測演算法、運動關節角度估測演算法及人型機器人動作控制演算法之即時人體動作追蹤操控演算法，以達到智慧型人型機器人之即時人體動作追蹤操控之功能，如圖5所示。**(1)人體運動姿態估測演算法**：該演算法實現於穿戴式人體動作感測裝置中的STM32F746微控制器，其透過感測器訊號收集、校正與低通濾波等訊號前處理及以四元數擴展式卡爾曼濾波器(Quaternion-based Extended Kalman Filter (EKF))為基礎之姿態估測演算法來加以估測人體全身肢幹在三維空間中運動所

產生的運動姿態角度；**(2)運動關節角度估測演算法**：該演算法實現於資訊處理模組中的STM32F746微控制器，其利用人體運動姿態估測演算法所計算之人體運動姿態角度，來加以開發運動關節角度估測演算法，其透過關節相鄰兩邊的肢幹運動姿態來加以計算該關節的運動關節角度，方能控制智慧型人型機器人之關節動作；**(3)人型機器人動作控制演算法**：透過運動關節角度估測演算法獲得人體全身肢幹各個關節的運動角度後，即可輸入至人型機器人動作控制演算法中的正向運動學分析模型，便可進行智慧型人型機器人之即時人體動作追蹤操控。

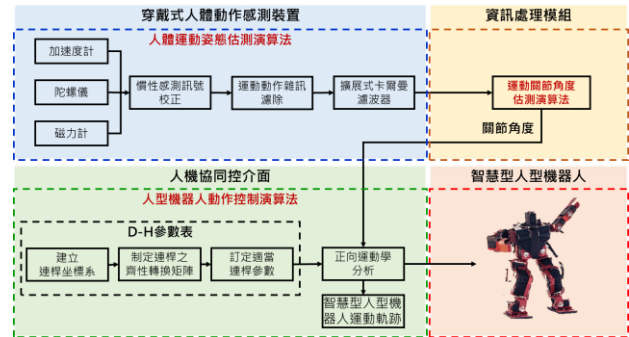


圖5 即時人體動作追蹤操控演算法之流程圖。

3.1 人體運動姿態估測演算法

本論文利用配戴於人體之人體身體感測網路中每顆穿戴式人體動作感測裝置進行人體上下肢各個肢幹的動作訊號之量測，並透過穿戴式人體動作感測裝置中的 STM32F746 微控制器來加以開發一套整合感測資訊融合之人體運動姿態估測演算法，其包含(1)慣性感測訊號收集、(2)慣性感測訊號校正、(3)運動動作雜訊濾除及(4)基於四元數之擴展式卡爾曼濾波器(Quaternion-based EKF)之人體運動姿態估測演算法等流程步驟，詳細說明如下。

3.1.1 慣性感測訊號收集

透過配戴於人體上臂、前臂、大腿、小腿及腳背等 10 個部位的穿戴式人體動作感測裝置來量測使用者在三維空間中運動所產生的加速度、角速度及磁力強度等動作訊號。

3.1.2 慣性感測訊號校正

由於慣性感測器本身特性及其他外界環境因素所影響往往會造成加速度計、陀螺儀及磁力計所量測到的慣性感測訊號會產生量測訊號誤差或訊號漂移，而這些訊號誤差或漂移皆會經由長時間的累積放大，且經過積分程序後造成運動姿態估測的嚴重失真。一般而言，我們可以使用 1)比例因子(scale factor, SF)及 2)偏移量(bias, B)來加以校正慣性感測器。我們採用多方位擺放的校正方法進行感測器校正[7]；我們依次將加速度計及陀螺儀擺放於水平放置的旋轉運動平台上 14 個不同方位，並藉由加速度計在靜止擺放狀況下其三個軸向感測值合力值為重力加速度讀值(1 g)，及在使用旋轉運動平台定速旋轉下陀螺儀之三軸感測值之合力值為等角速度讀值(ω)的物理現象，來加以獲得三軸加速度計及陀螺儀之比例因子(SF_x, SF_y, SF_z)及偏移量

(B_x 、 B_y 、 B_z)。而在校正磁力計時，我們可在一個沒有強力磁場干擾環境下將磁力計在一個固定時間下進行三維空間均勻旋轉，使磁力感測值可涵蓋到三維空間中的各個方位[8]，並將其感測磁力合力等比例正規化為 1 高斯(Gauss)的固定常數[9]。最後，透過最小平方誤差法求解出各感測器之校正矩陣(Q)後，即可透過式(1)來加以校正慣性感測器。

$$\mathbf{S}_c = \mathbf{Q}\mathbf{S}_i \Rightarrow \begin{bmatrix} S_{cx} \\ S_{cy} \\ S_{cz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SF_x & 0 & 0 & B_x \\ 0 & SF_y & 0 & B_y \\ 0 & 0 & SF_z & B_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ix} \\ S_{iy} \\ S_{iz} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中， \mathbf{S}_i 為未校正過之感測值，其可為加速度計讀值 $\mathbf{a}_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}, 1]^T$ ，單位為重力加速度(g)；陀螺儀讀值 $\boldsymbol{\omega}_i = [\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz}, 1]^T$ ，單位為每秒度(°/s)；磁力計讀值 $\mathbf{m}_i = [m_{ix}, m_{iy}, m_{iz}, 1]^T$ ，單位為高斯(Gauss)； \mathbf{S}_c 為經過校正後之感測值，其可為加速度計讀值 $\mathbf{a}_c = [a_{cx}, a_{cy}, a_{cz}]^T$ 、陀螺儀讀值 $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz}]^T$ 及磁力計讀值 $\mathbf{m}_c = [m_{cx}, m_{cy}, m_{cz}]^T$ 。

3.1.3 運動動作雜訊濾除

當使用者透過人體身體感測網路量測上下肢在三維空間中的運動訊號，其所量測到的訊號包含了上下肢動作訊號、高頻雜訊及動作雜訊(例如：身體不自主的顫抖)；因此，為了能準確地量測到使用者在運動時所產生的動作訊號，校正過後的慣性感測訊號仍需要經由低通濾波器來降低慣性感測訊號中的高頻雜訊及動作雜訊。由於人體上下肢的運動動作頻率為 8-12 Hz [10]；因此，我們便可將移動平均濾波器的截止頻率設為 12 Hz，來加以濾除上下肢動作訊號中的高頻雜訊及動作雜訊[11]，進而獲得濾波後的加速度、角速度及磁力訊號，移動平均濾波器如式(2)所示。

$$S_s[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_c[n-i], \quad (2)$$

其中， $S_c[n]$ 為校正後之感測值； $S_s[n]$ 為濾波後之感測值，其可為加速度計讀值 $\mathbf{a}_s = [a_{sx}, a_{sy}, a_{sz}]^T$ 、陀螺儀讀值 $\boldsymbol{\omega}_s = [\omega_{sx}, \omega_{sy}, \omega_{sz}]^T$ 及磁力計讀值 $\mathbf{m}_s = [m_{sx}, m_{sy}, m_{sz}]^T$ ； N 為濾波點數。

3.1.4 基於四元數之擴展式卡爾曼濾波器

姿態估測的過程中通常都是利用陀螺儀所量測到的角速度值經由一次積分所獲得的姿態角度進行姿態估測；但也因為牽涉角速度訊號的積分程序，使其姿態估測誤差將會因為角速度值的訊號誤差隨著時間增加而快速地累積，進而造成重建軌跡的嚴重失真。因此，本論文將使用基於四元數之擴展式卡爾曼濾波器(Quaternion-based EKF)來加以融合加速度計、陀螺儀及磁力計的感測值來進行全身肢幹運動姿態估測，以降低透過陀螺儀積分進行姿態估測時的積分誤差，進而獲得準確的人體運動姿態，如圖 6 所示。擴展式卡爾曼濾波器(EKF)是透過狀態預測與狀態更新兩個步驟[12], [13]求得其最佳估測狀態，其利用陀螺儀量測之角速度進行擴展式卡爾曼濾波器之狀態預測，

加速度計量測之加速度與磁力計量測之磁力訊號則用於擴展式卡爾曼濾波器之狀態更新[14]。

1) 狀態預測：

我們將以四元數表示之姿態定義為狀態轉移方程式之狀態變數(\mathbf{x})，利用陀螺儀現在時間點(t)所感測之角速度($\boldsymbol{\omega}_t$)及上一個時間點($t-1$)更新後之姿態角($\hat{\mathbf{x}}_{t-1}$)建立一狀態轉移方程式，如式(3)所示。

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \mathbf{B}_{t-1} \delta \boldsymbol{\omega}_t, \quad (3)$$

其中， $\hat{\mathbf{x}}_t = [\hat{q}_{0,t}, \hat{q}_{1,t}, \hat{q}_{2,t}, \hat{q}_{3,t}]^T$ 為現在時間點預測之狀態變數；

$\mathbf{A}_t = \mathbf{I}_{4 \times 4} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\omega}_t) \Delta t$ 為現在時間點的狀態轉移矩陣； $\mathbf{B}_{t-1} =$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1}}{\partial \delta \boldsymbol{\omega}_t} = \frac{1}{2} \Delta t \begin{bmatrix} -q'_{1,t-1} & -q'_{2,t-1} & -q'_{3,t-1} \\ q'_{0,t-1} & -q'_{3,t-1} & q'_{2,t-1} \\ q'_{3,t-1} & q'_{0,t-1} & -q'_{1,t-1} \\ -q'_{2,t-1} & q'_{1,t-1} & q'_{0,t-1} \end{bmatrix}$$

為上一個時間點之狀態雜訊係數矩陣； $\delta \boldsymbol{\omega}_t = [\delta \omega_{x,t}, \delta \omega_{y,t}, \delta \omega_{z,t}]^T$ 為現在時間點的角速度白雜訊； $\mathbf{I}_{4 \times 4}$ 是一 4×4 之單位矩陣； $\boldsymbol{\omega}_t =$

$[\omega_{x,t}, \omega_{y,t}, \omega_{z,t}]^T$ 為現在時間點陀螺儀所感測之角速度；而 $\boldsymbol{\Omega}$

$$(\boldsymbol{\omega}_t) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{x,t} & -\omega_{y,t} & -\omega_{z,t} \\ \omega_{x,t} & 0 & \omega_{z,t} & -\omega_{y,t} \\ \omega_{y,t} & -\omega_{z,t} & 0 & \omega_{x,t} \\ \omega_{z,t} & \omega_{y,t} & -\omega_{x,t} & 0 \end{bmatrix}; \Delta t \text{ 是取樣週期。接著，}$$

便可預測現在時間點之狀態誤差共變異數矩陣($\hat{\mathbf{P}}_t$)如下：

$$\hat{\mathbf{P}}_t = \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{P}}_{t-1} \mathbf{A}_t^T + \mathbf{B}_{t-1} \mathbf{Q} \mathbf{B}_{t-1}^T, \quad (4)$$

其中， $\hat{\mathbf{P}}_{t-1}$ 為上一個時間點更新後之狀態誤差共變異數矩陣； $\mathbf{Q} = E[\delta \boldsymbol{\omega} \delta \boldsymbol{\omega}^T]$ 為角速度雜訊共變異數矩陣，其為一 $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ 矩陣，其對角線元素主要是將陀螺儀靜置一段時間後所得之角速度變異數，並且非對角線元素皆為零。

2) 狀態更新：

在狀態預測的部分，主要是將陀螺儀訊號透過四元數積分得到運動姿態，但因陀螺儀本身的訊號漂移誤差所造成的狀態估測誤差，會隨著時間導致誤差累積；因此，必須透過觀測量(\mathbf{z}_t)對預測後的狀態變數($\hat{\mathbf{x}}_t$)進行更新，在此我們將觀測量定義為加速度與磁力訊號。本論文所開發之擴展式卡爾曼濾波器(EKF)共進行兩階段狀態變數更新；首先透過加速度計所量測之重力訊號進行第一階段狀態變數更新，接著再以磁力計所量測之磁力訊號進行第二階段狀態變數更新。

重力更新：首先，我們透過加速度計所量測之重力加速度訊號針對角速度所預測之狀態變數($\hat{\mathbf{x}}_t$)進行更新，其重力觀測方程式及觀測矩陣分別如式(5)及式(6)所示：

$$\mathbf{z}_t^{ah} = \mathbf{H}_t^a \hat{\mathbf{x}}_t + \delta \mathbf{z}_t^a, \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_t^a = 2 \begin{bmatrix} -\hat{q}_2 & \hat{q}_3 & -\hat{q}_0 & \hat{q}_1 \\ \hat{q}_1 & \hat{q}_0 & \hat{q}_3 & \hat{q}_2 \\ \hat{q}_0 & -\hat{q}_1 & -\hat{q}_2 & \hat{q}_3 \end{bmatrix}_t, \quad (6)$$

其中， \mathbf{H}_t^a 為現在時間點之重力觀測矩陣； $\hat{\mathbf{x}}_t = [\hat{q}_{0,t}, \hat{q}_{1,t}, \hat{q}_{2,t}, \hat{q}_{3,t}]^T$ 為現在時間點所預測之狀態變數； $\delta \mathbf{z}_t^a$ 為現在時間點的加速度之白雜訊； \mathbf{z}_t^{ah} 為現在時間點的重力預測觀測量。接著，獲得重力觀測方程式之後，便可計算現在時間點的重力更新卡爾曼增益(\mathbf{K}_t^a)，如式(7)所示。最後，即可利用重力更新卡爾曼增益(\mathbf{K}_t^a)對所預測之狀態及其狀態誤差共變異數矩陣進行狀態更新，如式(8)及式(9)所示。

$$\mathbf{K}_t^a = \hat{\mathbf{P}}_t \mathbf{H}_t^{aT} (\mathbf{H}_t^a \hat{\mathbf{P}}_t \mathbf{H}_t^{aT} + \mathbf{R}_a)^{-1}, \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t' = \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{K}_t^a (\mathbf{z}_t^a - \mathbf{z}_t^{ah}), \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t' = (\mathbf{I}_{4 \times 4} - \mathbf{K}_t^a \mathbf{H}_t^a) \hat{\mathbf{P}}_t, \quad (9)$$

其中， $\mathbf{R}_a = E[\delta \mathbf{z}^a \delta \mathbf{z}^{aT}]$ 為重力觀測量雜訊共變異數矩陣，其為一 $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ 矩陣，其對角線元素主要是將加速度計靜置一段時間後所得之加速度訊號變異數，並且非對角線元素皆為零； \mathbf{z}_t^a 為現在時間點的重力之實際觀測量； $\hat{\mathbf{x}}_t'$ 為經過第一階段狀態更新後之狀態變數； $\hat{\mathbf{P}}_t'$ 為經過第一階段狀態更新後之狀態誤差共變異數矩陣。在重力更新方面，我們主要更新狀態變數($\hat{\mathbf{x}}_t$)中的 \hat{q}_0 、 \hat{q}_1 及 \hat{q}_2 ，藉此用以更新尤拉角中的翻滾角(roll angle, ϕ) 與俯仰角(pitch angle, θ)。

磁北更新：接著，我們透過磁力計所量測之磁力訊號針對經由重力加速度所更新後之狀態變數($\hat{\mathbf{x}}_t'$)進行更新，其磁北觀測方程式及觀測矩陣分別如式(10)及式(11)所示：

$$\mathbf{z}_t^{mh} = \mathbf{H}_t^m \hat{\mathbf{x}}_t' + \delta \mathbf{z}_t^m, \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_t^m = 2 \begin{bmatrix} \hat{q}_3' & \hat{q}_2' & \hat{q}_1' & \hat{q}_0' \\ \hat{q}_0' & -\hat{q}_1' & \hat{q}_2' & -\hat{q}_3' \\ -\hat{q}_1' & -\hat{q}_0' & \hat{q}_3' & \hat{q}_2' \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中， \mathbf{H}_t^m 為現在時間點之磁北觀測矩陣； $\hat{\mathbf{x}}_t' = [\hat{q}_{0,t}', \hat{q}_{1,t}', \hat{q}_{2,t}', \hat{q}_{3,t}']^T$ 為重力更新後之狀態變數； $\delta \mathbf{z}_t^m$ 為現在時間點的磁力訊號之白雜訊； \mathbf{z}_t^{mh} 為現在時間點的磁北預測觀測量。接著，獲得磁北觀測方程式之後，便可計算現在時間點的磁北更新卡爾曼增益(\mathbf{K}_t^m)，如式(12)所示。最後，即可利用磁北更新卡爾曼增益(\mathbf{K}_t^m)對重力更新後之狀態及其狀態誤差共變異數矩陣進行狀態更新，如式(13)及式(14)所示。

$$\mathbf{K}_t^m = \hat{\mathbf{P}}_t' \mathbf{H}_t^{mT} (\mathbf{H}_t^m \hat{\mathbf{P}}_t' \mathbf{H}_t^{mT} + \mathbf{R}_m)^{-1}, \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t'' = \hat{\mathbf{x}}_t' + \mathbf{K}_t^m (\mathbf{z}_t^m - \mathbf{z}_t^{mh}), \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t'' = (\mathbf{I}_{4 \times 4} - \mathbf{K}_t^m \mathbf{H}_t^m) \hat{\mathbf{P}}_t', \quad (14)$$

其中， $\mathbf{R}_m = E[\delta \mathbf{z}^m \delta \mathbf{z}^{mT}]$ 為磁北觀測量雜訊共變異數矩陣，其為一 $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ 矩陣，其對角線元素主要是將磁力計靜置一段時間後所得之磁力訊號變異數，並且非對角線元素皆為零； \mathbf{z}_t^m 為現在時間點的磁北之實際觀測量； $\hat{\mathbf{x}}_t''$ 為經過第二階段狀態更新後之狀態變數； $\hat{\mathbf{P}}_t''$ 為經過第二階段狀態更新後之狀態誤差共變異數矩陣。在磁北更新方面，我們主要更新狀態變數($\hat{\mathbf{x}}_t''$)中的 \hat{q}_0'' 及 \hat{q}_3'' ，藉此用以更新尤拉角中的偏擺角(yaw angle, ψ)。

最後，當我們透過擴展式卡爾曼濾波器(EKF)獲得以四元數表示之狀態變數(\mathbf{x})姿態後，我們並可利用式(15)、式(16)與式(17)將姿態估測方法所得四元數表示法(quaternion)之姿態角轉換為尤拉角(Euler angles)表示之翻滾角(roll angle, ϕ)、俯仰角(pitch angle, θ)及偏擺角(yaw angle, ψ)，如下所示：

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{2(\hat{q}_2'' \hat{q}_3'' + \hat{q}_0'' \hat{q}_1'')}{\hat{q}_0''^2 - \hat{q}_1''^2 - \hat{q}_2''^2 + \hat{q}_3''^2} \right), \quad (15)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(-2(\hat{q}_1'' \hat{q}_2'' - \hat{q}_0'' \hat{q}_3'') \right), \quad (16)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{2(\hat{q}_1'' \hat{q}_2'' + \hat{q}_0'' \hat{q}_3'')}{\hat{q}_0''^2 + \hat{q}_1''^2 - \hat{q}_2''^2 - \hat{q}_3''^2} \right). \quad (17)$$

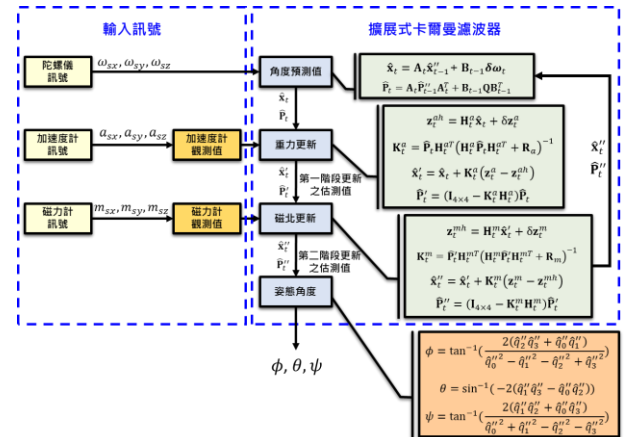


圖6 基於四元數之擴展式卡爾曼濾波器之流程圖。

3.2 運動關節角度估測演算法

本論文利用資訊處理模組以多對一無線傳輸技術接收人體身體感測網路中每顆穿戴式人體動作感測裝置經由其人體運動姿態估測演算法所計算之肢幹運動姿態後；我們將藉由資訊處理模組中的 STM32F746 微控制器透過關節相鄰兩邊的肢幹運動姿態，來加以開發運動關節角度估測演算法，進而計算該關節的運動關節角度(Range of Motion, ROM)，亦考量其關節自由度(Degree of Freedom, DOF)以控制智慧型人型機器人之關節動作。我們將人體上肢連結關節區分為肩關節及肘關節；人體下肢連結關節區分為髖關節、膝關節及踝關節；其中肩關節及髖關節具有兩個自由度；肘關節及膝關節具有一個自由度；踝關節具有兩個自由度。因此，我們針對不同的自由度的關節開發相對應的運動關節角度估測演算法。

3.2.1 肩關節角度估測演算法

如圖 7(a)所示，我們將配戴於人體上臂的感測器座標系(s_{x1}, s_{y1}, s_{z1})轉換至以人體右方為東方(East, E)、正前方為北方(North, N)，並利用其外積來加以獲得上方(Up, U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體上臂感測器座標系(s_{x1}, s_{y1}, s_{z1})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_1, θ_1 及 ψ_1)。由於配合智慧型人型機器人肩關節的兩個關節自由度；因此，我們將姿態角 ϕ_1 及 ψ_1 定義為智慧型人型機器人肩關節的上臂伸展(ϕ_s)及水平外展

(ψ_5)，並透過該兩個旋轉角度來分別加以控制智慧型人型機器人肩關節上的伺服馬達。

3.2.2 肘關節角度估測演算法

如圖 7(a)所示，我們將配戴於人體上臂的感測器座標系(s_{x1}, s_{y1}, s_{z1})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體上臂感測器座標系(s_{x1}, s_{y1}, s_{z1})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_1, θ_1 及 ψ_1)。接著，我們將配戴於人體前臂的感測器座標系(s_{x2}, s_{y2}, s_{z2})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)，並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體前臂感測器座標系(s_{x2}, s_{y2}, s_{z2})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_2, θ_2 及 ψ_2)。由於配合智慧型人型機器人肘關節的一個關節自由度；因此，我們將 ϕ_1 及 ϕ_2 相減來加以獲得 ϕ_E ，並將其定義為智慧型人型機器人的肘關節屈曲/伸直旋轉角度，並透過該旋轉角度來加以控制智慧型人型機器人肘關節上的伺服馬達。

3.2.3 腕關節角度估測演算法

如圖 7(b)所示，我們將配戴於人體大腿的感測器座標系(s_{x3}, s_{y3}, s_{z3})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體大腿感測器座標系(s_{x3}, s_{y3}, s_{z3})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_3, θ_3 及 ψ_3)。由於配合智慧型人型機器人腕關節的兩個關節自由度；因此，我們將姿態角 ϕ_3 及 θ_3 定義為智慧型人型機器人腕關節的彎曲(ϕ_h)及外展(θ_h)，並透過該兩個旋轉角度來分別加以控制智慧型人型機器人腕關節上的伺服馬達。

3.2.4 膝關節角度估測演算法

如圖 7(b)所示，我們將配戴於人體大腿的感測器座標系(s_{x3}, s_{y3}, s_{z3})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體大腿感測器座標系(s_{x3}, s_{y3}, s_{z3})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_3, θ_3 及 ψ_3)。接著，我們將配戴於人體小腿的感測器座標系(s_{x4}, s_{y4}, s_{z4})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)，並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體小腿感測器座標系(s_{x4}, s_{y4}, s_{z4})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_4, θ_4 及 ψ_4)。由於配合智慧型人型機器人膝關節的一個關節自由度；因此，我們將 ϕ_3 及 ϕ_4 相減來加以獲得 ϕ_k ，並將其定義為智慧型人型機器人的膝關節彎曲旋轉角度，並透過該旋轉角度來加以控制智慧型人型機器人膝關節上的伺服馬達。

3.2.5 踝關節角度估測演算法

如圖 7(b)所示，我們將配戴於人體小腿的感測器座標系(s_{x4}, s_{y4}, s_{z4})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體小腿感測器座標系(s_{x4}, s_{y4}, s_{z4})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_4, θ_4 及 ψ_4)。接著，我們將配戴於人體腳背的感測

器座標系(s_{x5}, s_{y5}, s_{z5})轉換至以人體右方為東方(E)、正前方為北方(N)，並利用其外積來加以獲得上方(U)的參考座標系(E, N, U)；即可計算出繞著人體腳背感測器座標系(s_{x5}, s_{y5}, s_{z5})旋轉的三個轉動姿態角(ϕ_5, θ_5 及 ψ_5)。由於配合智慧型人型機器人踝關節的兩個關節自由度；因此，我們將 ϕ_4 及 ϕ_5 相減來加以獲得 ϕ_a ，並將其定義為智慧型人型機器人的踝關節背曲/蹠曲旋轉角度；亦將 ψ_4 及 ψ_5 相減來加以獲得 ψ_a ，並將其定義為智慧型人型機器人的踝關節外翻/內翻旋轉角度；並透過該兩個旋轉角度來加以控制智慧型人型機器人踝關節上的伺服馬達。

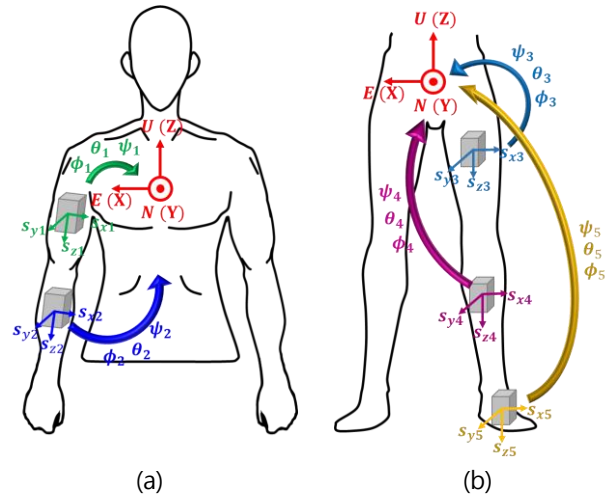


圖 7 運動關節角度估測演算法。(a)肩關節及肘關節角度估測示意圖；(b)腕關節、膝關節及踝關節角度估測示意圖。

3.3 人型機器人動作控制演算法

本論文利用人機協同監控介面接收資訊處理模組經由其運動關節角度估測演算法所計算之運動關節角度後；我們將藉由人機協同監控介面加以開發智慧型人型機器人之動作控制演算法，如圖 5 所示，其透過 Denavit-Hartenberg (D-H) 參數表與正向運動學之分析來達到追蹤人體動作及控制智慧型人型機器人上肢及下肢作動[15]。首先，我們設置各馬達間之座標系統，並藉由座標系統之定義與參數規則來設計適當連桿參數來推導出其系統之 D-H 參數表；接著，將運動關節角度估測演算法所計算之關節角度代入所求得之 D-H 參數表中進而計算出轉換矩陣；最後，利用正向運動學來分析智慧型人型機器人上肢及下肢之動作，進行智慧型人型機器人控制，以完成人體動作追蹤操控之目的。

正向運動學是將智慧型人型機器人各軸馬達的連桿參數作為 D-H 轉換矩陣(A_i^{i-1})的輸入，進而求得上肢及下肢末端的位置座標。我們利用智慧型人型機器人下肢為例，來加以說明本論文所開發之人型機器人動作控制演算法。根據圖 8 之智慧型人型機器人下肢參數座標圖可建構出智慧型人型機器人下肢之 D-H 參數表，如表 1 所示，並可利用運動關節角度估測演算法所估測之各關節轉動的角度，藉此控制智慧型人型機器人下肢；此外，亦可透過正向運動學求得智慧型人型機器人下肢端點的位置座標及運動軌跡。我們定義各個馬達的座標系統及其轉動

角度， θ_1 為髖關節繞著左右軸轉動的角度； θ_2 為髖關節繞著前後軸轉動的角度，我們可將第0座標系統及第1座標系統同時設計為智慧型人型機器人之髖關節，為了更加準確地計算智慧型人型機器人下肢末端端點位置，須將兩座標系統間之距離計算入內，故存在 d_1 之數值。根據座標系統之連桿參數定義， Z_{i-1} 軸與Joint i 軸線重合，並將第0座標系統順時針繞著 X_1 軸旋轉 90° 至第1座標系統，故 α_1 為 -90° ；將第0座標系統沿 Z_0 軸移動其座標系原點到 X_1 軸及 Z_0 軸交叉點的距離為 d_1 ；而依據座標系統之連桿參數定義， a_i 為沿 X_i 軸測量 Z_{i-1} 軸與 Z_i 軸的距離，故 a_1 為0。接著，第1座標系統沿連桿移動至第2座標系統的距離為髖關節至膝關節的長度，在此將之設定為 a_2 ；而依據座標系統之連桿參數定義， d_i 為沿 Z_{i-1} 軸量測其座標系原點到 X_i 軸及 Z_{i-1} 軸交叉點之距離，故 d_2 為0，其可推導出轉換矩陣如式(18)及式(19)所示：

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & -\sin\theta_2 & a_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 & a_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

而第2座標系統沿連桿移動至第3座標系統的距離為膝關節至踝關節的長度，在此將之設定為 a_3 ；依據座標系統之連桿參數定義， d_i 為沿 Z_{i-1} 軸量測其座標系原點到 X_i 軸與 Z_{i-1} 軸交叉點的距離，故 d_3 為0；又因依據座標系統之連桿參數定義， Z_{i-1} 軸與Joint i 軸線重合，則第2座標系統不存在繞著 X_3 軸轉動至第3座標系統的角度，故為 α_3 為 0° 。可推得其轉換矩陣如式(20)所示。

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a_3\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

第3座標系統及第4座標系統設計為智慧型人型機器人之踝關節，雖然兩座標系統原點應重疊，但仍須將兩座標系統之間距離列入考慮，故存在其距離 a_4 ；根據座標系統之連桿參數定義， Z_{i-1} 軸與Joint i 軸線重合，第3座標系統繞著 X_4 軸逆時針旋轉 90° 至第4座標系統，故 α_4 為 90° ；依據座標系統之連桿參數定義， d_i 為沿 Z_{i-1} 軸量測其座標系原點到 X_i 軸與 Z_{i-1} 軸交叉點的距離，故 d_4 為0。可推得其轉換矩陣如(21)所示。

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & a_4\cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & a_4\cos\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

第4座標系統設計為智慧型人型機器人之踝關節與第5座標系統設計為智慧型人型機器人下肢末端端點位置，兩者之間的連桿長度設定為 d_5 ，根據座標系統之連桿參數定義， a_i 沿 X_i 軸

測量 Z_{i-1} 軸與 Z_i 軸的距離，故 a_5 為0；根據座標系統之連桿參數定義， α_i 為 Z_{i-1} 軸繞 X_i 軸旋轉到 Z_i 軸的連桿扭轉角度，故 α_5 為 0° 。可推得其轉換矩陣如(22)所示。

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

最後，將各個座標系統間之旋轉矩陣依序相乘，即可進行智慧型人型機器人正向運動學分析，如下所示，其中 $\sin\theta_i$ 表示為 s_i ； $\cos\theta_i$ 表示為 c_i 。

$$T_5^0 = A_1^0 \times A_2^1 \times A_3^2 \times A_4^3 \times A_5^4 = \begin{bmatrix} c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3 & -c_1c_2s_3 - c_1s_2c_3 & s_1 & c_1c_2a_3c_3 - c_1s_2a_3s_3 + s_1d_3 + c_1a_2c_2 \\ s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3 & -s_1c_2s_3 - s_1s_2c_3 & -c_1 & s_1c_2a_3c_3 - s_1s_2a_3s_3 - c_1d_3 + s_1a_2c_2 \\ s_2c_3 + c_2s_3 & -s_2s_3 + c_2c_3 & 0 & s_2a_3c_3 + c_2a_3s_3 + a_2s_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_4s_5 & -c_4s_5 & -s_4 & -s_4d_5 + a_4c_4 \\ s_4c_5 & -s_4s_5 & c_4 & c_4d_5 + a_4s_4 \\ -s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中， p_x 、 p_y 、 p_z 分別為智慧型人型機器人下肢末端端點位置在三維空間中的座標位置；矩陣 T_5^0 計算結果之元素簡寫代表式，如式(24)至式(26)所示。

$$p_x = -(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)(s_4d_5 - a_4c_4) - (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)(c_4d_5 + a_4s_4) + (c_1c_2a_3c_3 - c_1s_2a_3s_3 + s_1d_3 + c_1a_2c_2), \quad (24)$$

$$p_y = -(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)(s_4d_5 - a_4c_4) - (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)(c_4d_5 + a_4s_4) + (s_1c_2a_3c_3 - s_1s_2a_3s_3 - c_1d_3 + s_1a_2c_2), \quad (25)$$

$$p_z = -(s_2c_3 + c_2s_3)(s_4d_5 - a_4c_4) - (s_2s_3 - c_2c_3)(c_4d_5 + a_4s_4) + (s_2a_3c_3 + c_2a_3s_3 + a_2s_2 + d_1). \quad (26)$$

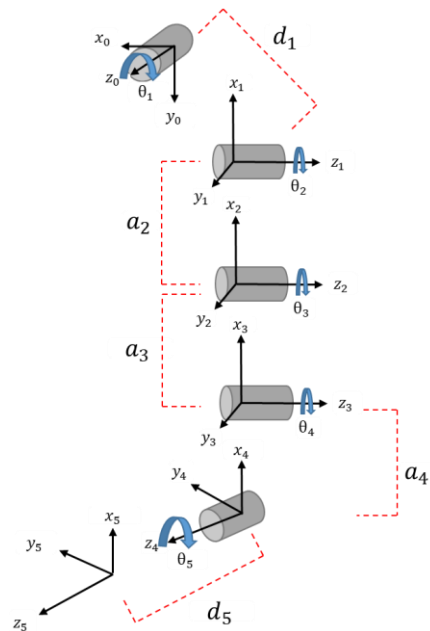


圖8 智慧型人型機器人下肢參數座標圖。

表 1 智慧型人型機器人下肢之 D-H 參數表

Joint i ID	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	$\theta_1 - 90^\circ$	-90°	0	d_1
2	θ_2	0°	a_2	0
3	θ_3	0°	a_3	0
4	θ_4	90°	a_4	0
5	θ_5	0°	0	d_5

4. 系統整合與實驗結果

為了驗證本論文所開發之穿戴式體感人型機器人控制系統可有效地追蹤人體上下肢動作；本章節透過呈現即時性的智慧型人型機器人之人體各個關節動作追蹤與操控結果，來加以驗證本系統相關演算法之有效性。

4.1 人體身體感測網路

為了準確地量測到使用者上下肢在三維空間中運動時所產生的運動訊號，本論文將10個穿戴式人體動作感測裝置，分別配戴於使用者上下肢中上臂、前臂、大腿、小腿及腳背共10個部位，來加以建置一套人體身體感測網路，用以即時量測人體上下肢在三維空間中運動時所產生的加速度、角速度及磁力訊號，如圖9所示，並將人體身體感測網路中各個穿戴式人體動作感測裝置所量測到的慣性感測訊號及運動姿態角度經由無線射頻傳輸模組以多對一無線傳輸的方式傳送到資訊處理模組及人機協同監控介面進行即時人體動作追蹤操控演算法中運動關節角度估測演算法及人型機器人動作控制演算法之運算，來加以控制智慧型人型機器人全身關節馬達，以達到控制智慧型人型機器人控制之目的。

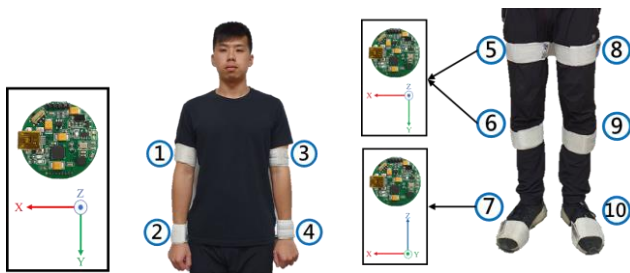


圖9 人體身體感測網路之穿戴式人體動作感測裝置配置圖。

4.2 智慧型人型機器人之上肢動作追蹤控制

本論文整合人體身體感測網路、即時人體動作追蹤操控演算法、人機協同監控介面與智慧型人型機器人之相關軟硬體，用以即時追蹤人體動作並藉此應用於智慧型人型機器人之控制上，以達到人機協同動作之目的。在上肢動作追蹤控制方面，我們將展示肩關節水平外展、肩關節上臂伸展、肘關節彎曲/伸直、上肢複合動作及上肢隨機動作等相關人體上肢動作之追蹤與操控。

4.2.1 肩關節水平外展

當我們將雙手上臂往前平舉並沿著參考座標系(E, N, U)中Z軸(U)進行旋轉，即可進行肩關節的水平外展角度估測；圖10為當使用者將上臂往前平舉後沿著參考座標系(E, N, U)中Z軸(U)進行旋轉，透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測肩關節水平外展角度(ψ_s)後，即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作，以達到控制智慧型人型機器人肩關節水平外展控制之目的。



圖10 智慧型人型機器人控制-肩關節水平外展。

4.2.2 肩關節上臂伸展

當我們將雙手上臂自然垂放並沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉，即可進行肩關節的上臂伸展角度估測；圖11為當使用者將上臂自然垂放後沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉，透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測肩關節上臂伸展角度(ϕ_s)後，即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作，以達到控制智慧型人型機器人肩關節上臂伸展控制之目的。

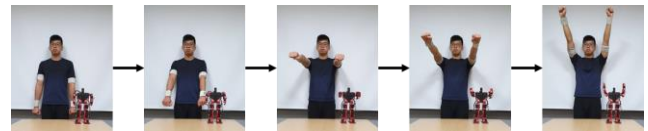


圖11 智慧型人型機器人控制-肩關節上臂伸展。

4.2.3 肘關節彎曲/伸直

當我們將雙手前臂往前平舉並沿著參考座標系(E, N, U)中Z軸(U)進行旋轉，即可進行肘關節的前臂彎曲與伸直角度估測；圖12為當使用者將前臂往前平舉後沿著參考座標系(E, N, U)中Z軸(U)進行旋轉，透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測肘關節上臂彎曲與伸直角度(ψ_E)後，即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作，以達到智慧型人型機器人肘關節彎曲/伸直控制之目的。

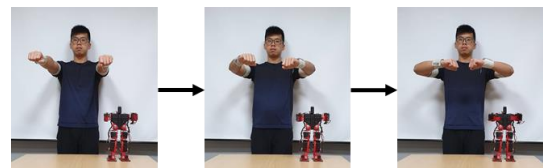


圖12 智慧型人型機器人控制-肘關節彎曲/伸直。

4.2.4 上肢複合動作

首先，我們將雙手上臂自然垂放並沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉；接著將上臂往側邊平舉並沿著參考座標

系(E, N, U)中Z軸(U)進行旋轉·即可進行肩關節的上臂伸展及肩關節的水平外展之角度估測；圖13為當使用者將上臂自然垂放並分別沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)及Z軸(U)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測肩關節上臂伸展(ϕ_s)及肩關節水平外展(ψ_s)之角度後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到智慧型人型機器人肩關節上臂伸展及水平外展控制之目的。



圖13 智慧型人型機器人控制-上肢複合動作。

4.3 智慧型人型機器人之下肢動作追蹤控制

在下肢動作追蹤控制方面·我們將展示髌關節彎曲、髌關節外展、膝關節彎曲、踝關節背曲/跖曲、踝關節內翻/外翻、下肢複合動作及下肢隨機動作等相關人體下肢動作之追蹤與操控。

4.3.1 髌關節彎曲

當我們將大腿向前彎曲並沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·即可進行髌關節的彎曲角度估測；圖14為當使用者將大腿向前彎曲後沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測髌關節彎曲角度(ϕ_h)後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到控制智慧型人型機器人髌關節彎曲控制之目的。



圖14 智慧型人型機器人控制-髌關節彎曲。

4.3.2 髌關節外展

當我們將大腿沿著參考座標系(E, N, U)中Y軸(N)進行旋轉·即可進行髌關節外展角度估測；圖15為當使用者將大腿參考座標系(E, N, U)中Y軸(N)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測髌關節外展角度(θ_h)後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到控制智慧型人型機器人髌關節外展控制之目的。



圖15 智慧型人型機器人控制-髌關節外展。

4.3.3 膝關節彎曲

當我們將小腿沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·即可進行膝關節彎曲角度估測；圖16為當使用者將小腿參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測膝關節彎曲角度(ϕ_k)後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到控制智慧型人型機器人膝關節彎曲控制之目的。



圖16 智慧型人型機器人控制-膝關節彎曲。

4.3.4 踝關節背曲/跖曲

當我們將腳踝沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·即可進行踝關節背曲與跖曲角度估測；圖17為當使用者將腳踝參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測踝關節背曲與跖曲角度(ϕ_a)後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到控制智慧型人型機器人踝關節背曲/跖曲控制之目的。



圖17 智慧型人型機器人控制-踝關節背曲與跖曲。

4.3.5 踝關節內翻/外翻

當我們將腳踝沿著參考座標系(E, N, U)中Y軸(N)進行旋轉·即可進行踝關節內翻與外翻角度估測；圖18為當使用者將腳踝參考座標系(E, N, U)中Y軸(N)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測踝關節內翻與外翻角度(θ_a)後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到控制智慧型人型機器人踝關節內翻/外翻控制之目的。



圖18 智慧型人型機器人控制-踝關節內翻與外翻。

4.3.6 下肢複合動作

首先·我們將小腿沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉；接著將大腿向前彎曲並沿著參考座標系(E, N, U)中X軸(E)進行旋轉·即可進行髌關節的彎曲及膝關節的彎曲之角度估測；圖19為當使用者將髌關節及膝關節沿著參考座標系(E, N,

U)中X軸(E)進行旋轉·透過人體運動姿態估測演算法及運動關節角度估測演算法估測腕關節彎曲(ϕ_h)及膝關節彎曲(ϕ_k)之角度後·即可透過人型機器人動作控制演算法控制智慧型人型機器人中相對應馬達之動作·以達到智慧型人型機器人腕關節彎曲及膝關節彎曲控制之目的。



圖19 智慧型人型機器人控制-下肢複合動作。

5. 結論

本論文提出一個具有低成本、即時性、操作簡易性、高準確度、低功耗且無場域限制等優點之人體身體感測網路及其即時人體動作追蹤操控演算法·並利用智慧型人形機器人來加以開發具有人機協同動作追蹤與控制之相關應用·當使用者欲進行人機協同控制時·可透過無線射頻傳輸模組以多對一的方式將人體身體感測網路上所估測之人體運動姿態角度傳輸至資訊處理模組·並透過資訊處理模組中STM32F746微控制器所實現之運動關節角度估測演算法計算人體各個關節運動角度;接著·將關節運動角度傳送至人機協同監控介面·並透過人型機器人動作控制演算法將人體關節角度轉譯為人形機器人身上關節馬達之控制指令;最後·將控制指令透過藍牙無線傳輸模組傳送至智慧型人形機器人進行人機協同控制;同時·亦將相關資訊傳送至互動式人機協同監控介面·用以即時顯示人體運動姿態角度、運動關節角度及移動軌跡·由實驗結果足以驗證本論文之即時人體動作追蹤操控演算法中的人體運動姿態估測演算法、運動關節角度估測演算法及人型機器人動作控制演算法在運動姿態估測、運動關節角度及人型機器人動作控制的有效性·其可用以即時追蹤人體動作並將其應用於智慧型人型機器人之人機協同控制上。

REFERENCES

- [1] B. Olofsson, J. Antonsson, H. G. Kortier, B. Bernhardsson, and A. Robertsson, "Sensor fusion for robotic workspace state estimation " *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21**, 2236-2248 (2016)
- [2] P. Cheng and B. Oelmann, "Joint-angle measurement using accelerometers and gyroscopes-A survey " *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **59**, 404-414 (2010)
- [3] A. B. Motos, L. D. Lledo, J. A. Diez, J. M. Catalan, S. Ezquerro, F. J. Badesa, and N. G. Aracil, "Estimation of human arm joints using two wireless sensors in robotic rehabilitation tasks " *Sensors*, **15**, 30571-30583 (2015)
- [4] M. E. Gohary and J. Mcnames, "Human joint angle estimation with inertial sensors and validation with a robot arm " *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **62**, 1759-1767 (2015)
- [5] S. Wilson, H. Eberle, Y. Hayashi, S. O. H. Madgwick, A. McGregor, X. J. Jing, and R. Vaidyanathan, "Formulation of a new gradient descent MARG orientation algorithm: Case study on robot teleoperation " *Mechanical Systems and Signal Processing*, **130**, 183-200 (2019)
- [6] R. Hartley, M. Ghaffari, R. M. Eustice, and J. W. Grizzle, "Contact-aided invariant extended Kalman filtering for robot state estimation " *International Journal of Robotics Research*, 2020, Art. no. 0278364919894385.
- [7] Z. F. Syed, P. Aggarwal, C. Goodall, X. Niu, and N. E. Sheimy, "A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems " *Measurement Science and Technology*, **18**, 1897-1907 (2007)
- [8] M. J. Caruso, "Application of magnetoresistive sensors in navigation systems " *Sensors and Actuators*, 15-21 (1997)
- [9] D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. M. Baten, and P. H. Veltink, "Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation " *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **13**, 395-405 (2005)
- [10] C. Verplaetse, "Inertial proprioceptive devices: Self-motion-sensing toys and tools " *IBM Systems Journal*, **35**, 639-650 (1996)
- [11] J.-S. Wang and F.-C. Chuang, "An accelerometer-based digital pen with a trajectory recognition algorithm for handwritten digit and gesture recognition " *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 2998-3007 (2012)
- [12] S. Sabatelli, M. Galgani, L. Fanucci, and A. Rocchi, "A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU " *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **62**, 590-598 (2012)
- [13] G. Ligorio and A. M. Sabatini, "Extended Kalman filter-based methods for pose estimation using visual, inertial and magnetic sensors: Comparative analysis and performance evaluation " *Sensors*, **13**, 1919-1941 (2013)
- [14] S. Zhang, S. Yu, C. Liu, X. Yang, and S. Liu, "A dual-linear Kalman filter for real-time orientation determination system using low-cost MEMS sensors " *Sensors*, **16**, 1-17 (2016)
- [15] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, New York, USA: McGraw-Hill, 1987.