

醫院導覽機器人之導航精度提升 與二合一控制設計與實作

組員：電機四 游紫蘋

摘要：本研究於 ROS 平台建構醫院導覽機器人系統，整合自主探索、感測器模擬與 AI 對話模組。針對傳統 DWA 演算法在曲線路徑偏移之限制，提出誤差回授補償律，實驗證實 RMSE 與最大側偏分別降低 **33%** 與 **36%**，顯著提升路徑貼合度。核心採 **STTSC + FWNN-ORBLS** 雙層控制架構，由外層確保軌跡漸近收斂，內層進行非線性動態補償，並提供離線與線上學習模式以強化環境適應力。經 A100 實體機器人驗證，能於不確定環境下實現高精度導航，具備智慧醫療服務之實務應用價值。

運動學模型與誤差轉換：為了實現精確控制，首先建立差速驅動機器人之運動學模型，並引入非線性誤差座標轉換 (e_x, e_y, e_θ) 定義如下：

$$\begin{aligned} e_x &= \cos\theta(x_r - x) + \sin\theta(y_r - y) \\ e_y &= -\sin\theta(x_r - x) + \cos\theta(y_r - y) \\ e_\theta &= \theta_r - \theta \end{aligned}$$

此轉換將笛卡爾座標系下的誤差轉化為機器人座標系，為後續補償控制律之設計基礎。

改良式 DWA 與二合一控制律：

本研究針對路徑追蹤設計了雙重保障機制：

改良 DWA 補償律：在採樣最佳速度後，透過比例增益 k_x, k_y, k_θ 修正線速度與角速度，修正公式為：

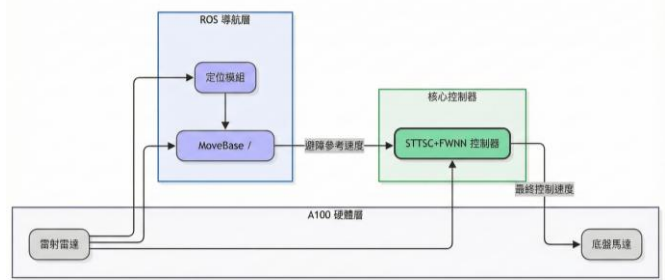
$$\begin{aligned} v &= v_r \cos(e_\theta) + k_x e_x \\ \omega &= \omega_r + v_r(k_y e_y + k_\theta \sin(e_\theta)) \end{aligned}$$

STTSC + FWNN-ORBLS 架構：外層 STTSC

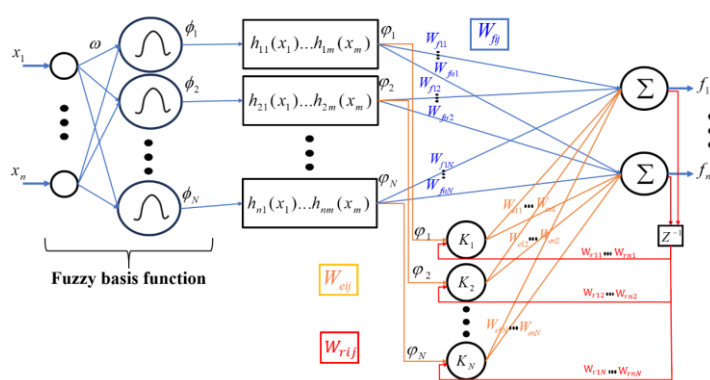
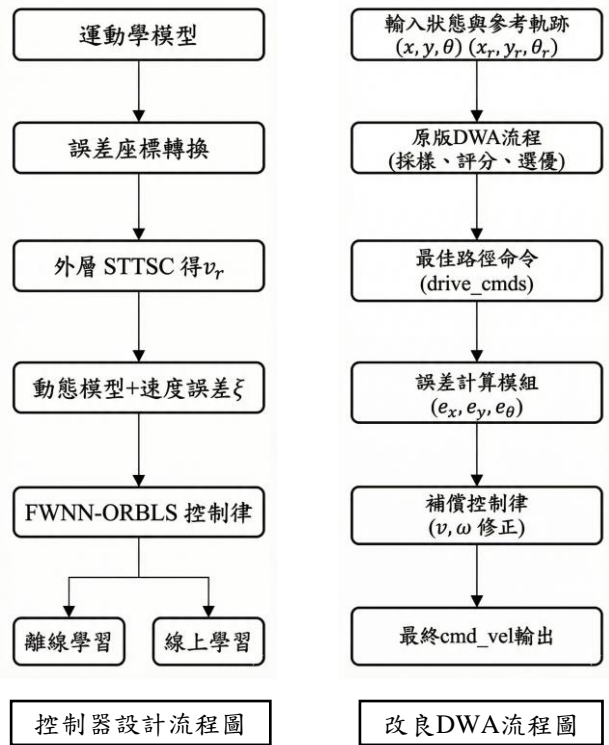
負責軌跡引導，內層則結合模糊小波類神經網路近似非線性項 f ，確保系統在不確定干擾下維持穩定。

穩定性分析簡述：

系統整體安全性透過 Lyapunov 穩定性理論進行驗證。證明外層 STTSC 可使位置與姿態誤差漸近收斂至零，且內層 FWNN-ORBLS 能使速度誤差達到一致近似收斂，奠定了本控制架構在實際應用中的可靠性。



A100 實體機器人軟體架構與 ROS Topic 資料流向



FWNN-ORBLS 補償器之架構圖

自主探索建圖與 AI 對話整合:

本研究建置之 ROS 平台具備 frontier-based exploration 策略，使機器人能在未知環境中自動完成建圖任務。系統進一步整合生成式 AI 對話模組，使用者可透過自然語言輸入指令，由系統進行語意解析後轉換為導航目標座標。實驗驗證顯示，機器人能正確理解如「帶我到電梯」等需求，並透過導航堆疊執行精確的路徑規劃與自主移動。

改良式 DWA 效能數據分析:

透過模擬測試原版與改良 DWA 在軌跡追蹤任務下的性能差異。數據顯示，引入誤差回授補償律後，系統在 RMSE (均方根誤差) 上降低約 33%，最大側偏下降約 36%。此外，平均朝向誤差亦顯著下降，顯示姿態追蹤更加穩定。實驗證實改良方法在提升精度的同時，並未犧牲到達目標的時間效率。

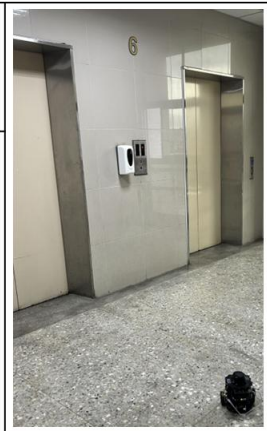
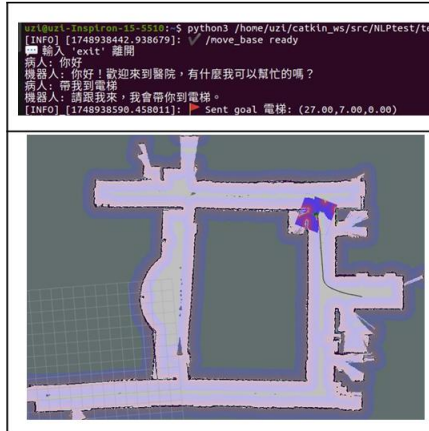
二合一控制器路徑追蹤效能:

針對 STTSC + FWNN-ORBLS 架構進行 Lissajous 參考軌跡追蹤測試。在離線模式下，系統加入強健項以確保有限時間收斂；而在線上學習模式中，權重能依據環境擾動即時更新，進一步提升系統對不確定性的適應能力。結果顯示位置與姿態誤差均能迅速衰減至近零，且速度誤差穩定受控，驗證了雙層控制架構在應對非線性動態補償上的優越性。

非連續軌跡追蹤與強健性驗證:

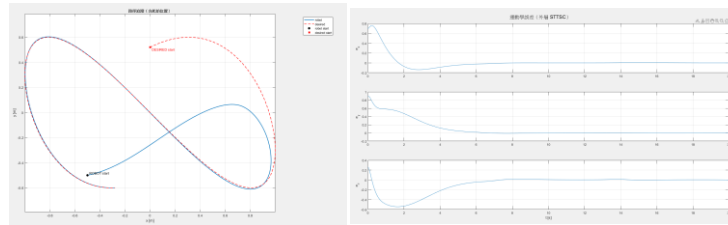
為模擬實際醫院導覽中的臨時停靠或動態避障需求，本研究設計了多重斷點複合模擬情境。實驗要求機器人在軌跡追蹤與點鎮定 (Point Stabilization) 雙模態間切換。當目標點位於側後方時，受限於載具之非霍洛諾米約束 (Non-holonomic Constraint)，控制器能自動規劃出滿足運動限制的收斂路徑。結果證實內層補償器能有效抑制累積誤差，確保機器人在多次切換後仍能精確復歸路徑。

結論: 本研究成功建置整合 AI 互動與精準導航之 ROS 平台，並提出具理論保證之雙層控制架構。改良式 DWA 有效提升了路徑貼合度，而 STTSC + FWNN-ORBLS 則強化了對不確定環境的補償能力。此成果對於提升醫院導覽機器人在智慧醫療服務中的穩定性與精確度具備實質之學術與實用潛力。



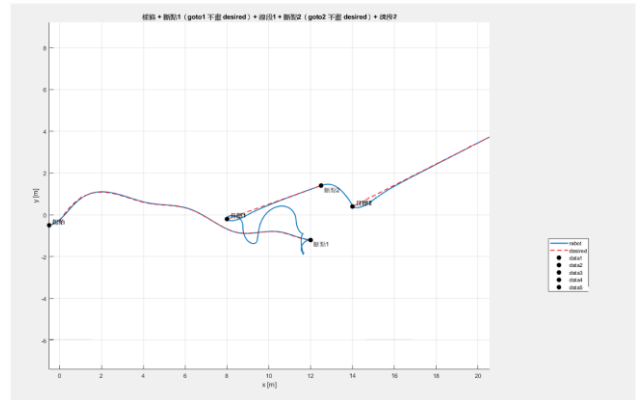
驗證於中興大學電機工程學系 6F - 導航至指定目標位置 (電梯)

指標	原版 DWA	改良 DWA	改善幅度
RMSE	0.162	0.108	↓ 33%
最大側偏	0.41	0.26	↓ 36%
到達時間	58.3 s	57.9 s	近似相同
平均朝向誤差	0.092 rad	0.061 rad	改善



路徑追蹤結果

運動學誤差衰減曲線



多重斷點連續切換模擬圖

	STTSC	離線學習 (Offline FWNN-ORBLS)	線上學習 (Online FWNN-ORBLS)
RMSE (v)	0.0001	0.0576	0.0800
RMSE (ω)	0.0007	0.0786	0.0963
IAE (v)	—	0.1793	0.5298
IAE (ω)	—	0.3627	0.4370
收斂性質	理想情況 幾乎零誤差	有限時間收斂 (FT)	近似有限時間收斂 (AFT)
強健性	中	高	高
權重更新	—	固定	即時調整
主要優點	精度最高	誤差收斂 最快、穩定	能適應不確定性、 控制平滑
主要缺點	無法處理擾動	無適應性	收斂速度略慢