**三、研究計畫內容（以中文或英文撰寫）：**

1. 研究計畫之背景。請詳述本研究計畫所要探討或解決的問題、研究原創性、重要性、預期影響性及國內外有關本計畫研究情況、重要參考文獻評述等。如為連續性計畫應說明上年度研究進度。

# 國內外研究現況與重要文獻回顧

1. **發展輕量且低成本之機械手臂，在特殊應用場合有其剛性需求，故有研發之必要**

機械手臂已廣泛應用在工業、醫療、製造與運輸等各種領域。傳統機械手臂多將馬達或致動器置放於關節之中，使各關節可被獨立且直接控制。但此種硬體架構容易增加機械手臂之重量與慣量，若因程式異常、機件磨耗或操作錯誤導致手臂失控發生無法預期之運動，致使與人發生碰撞，將造成嚴重後果[1], [2]。因此，為避免操作者與機械手臂發生碰撞危險，在一些較小型的應用場合會使用協作式機械手臂(Collaborative Robot)與真人共同作業，但這類手臂通常荷重較小，無法取代傳統工業機器人進行高荷重作業，且由於必須與真人協同作業，並無法達到真正縮減人力。因此，**發展輕量型機械手臂，可負擔比協作式機械手臂更高之負載且比傳統工業手臂更低之重量與運動慣量便具有其必要性。**以Epson的六軸機械手臂C12XL為例，其最大荷重為12kg，但手臂本身重量僅為63kg。由於此類機械手臂需有更複雜的微機電技術以實現更輕巧的設計，另外亦需使用特殊的感測技術降低手臂運作時的振動，故其價格均所費不貲。

1. **鋼索驅動機械手臂具有低慣性、低成本、輕量、體積小與低耗能等優勢，商業化潛力高**

一般來說，若欲設計輕量型機械手臂如擬人化機械手指、醫療手術用器械或狹小空間救難搜索型機器人等系統，由於要求輕量化且可安裝之空間狹小，不易將馬達與致動器直接放入各關節中。因此較為常見之作法為在機構空間內利用鋼索、滑輪與連桿等裝置佈建力的傳輸網路(Transmission Network)，使施力得以在空間中進行傳輸。這些以鋼索驅動關節之機械手臂或機器人(Cable-Driven Manipulator, CDM)由於可將馬達與致動器配置在本體空間之外，僅依靠鋼索帶動關節，故較傳統剛性機械手臂有低慣量與低重量等關鍵優勢，更適合人機協同作業[3]。且由於CDM無使用齒輪與螺桿，所以無傳統手臂的背隙問題(Backlash-free)。此外，由於整體機構重量大幅減輕，在馬達的能量消耗上亦有明顯之改善。目前，鋼索驅動機械手臂已有許多成功應用案例如圖一~三[4]-[6]。然而，由於鋼索驅動裝置具有各軸耦合干擾、繩索鬆弛與系統參數變化明顯等問題，故其無法以傳統剛性機械手臂正逆運動學策略處理控制問題，必須考慮鋼索在拉與放過程中對張力、力矩與末端點位移所造成之影響[7]。目前，國內外之相關研究仍相當稀少。國內僅有極少數之學者投入鋼索驅動機器人之研究，如健行科技大學機械工程系之並聯式機構及軟性機械手臂研究成果[8]-[9]；臺灣大學生物產業機電研究所發展以繩索驅動之機械手臂應用於田間作物採摘[10]；成功大學機械工程學系應用於輪椅之鋼索驅動式外骨骼機械臂[11]。國內在鋼索驅動機械手臂領域不管是基礎技術發展或前瞻應用均仍有很大之空間。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 圖一、醫療手術應用[4] | 圖二、運輸偵查應用[5] | 圖三、機器人應用[6] |

1. **車隊業者在電動車之管理與充電上之實際訪談結果與痛點分析：自動化與智慧化之必要**

在計畫申請人實際訪談多家業者之後，深刻了解到「充電動作」與「充電場地」對傳統客運、物流、拖吊甚至工程車之業者進行電動化之困難。以一公車營運業者而言，在初期邁向電動化過程中，最常見之方式為統一於夜間充電。然而，由於充電設備昂貴，一般車隊所建置的充電樁均數量不多，故必須以人為方式逐一將車輛駛入充電車位，充電，再駛離充電車位。過程中又受限於場地大小之限制，必須經常性移動其他車輛，可知其過程勞心勞力，且效率不盡理想。此外，在實際訪談國內最大拖吊車業者可知，業者希望能針對電動車開發出與原有拖吊車功能有所區隔之新型態之救援車，可在電動車車主電量耗盡時提供移動式充電救援，使車輛直接恢復行駛功能，而非逕自拖吊，如此可大幅降低後續繁瑣之拖吊業務與工作負擔。根據Navigant Research在2020年發布的移動式電動汽車充電設備研究報告顯示，移動充電解決方案的商業化已經開始，目前移動充電僅占整個電動汽車充電設備市場的一小部分（約0.5%），而到2030年將達2%，市場規模預計將從2020年的160億美元增長到2030年的600億美元。由上述說明可知，開發移動式電動汽車充電解決方案對車隊營運為刻不容緩之發展項目。

1. **提高友善便利的電動車充電設備，建立自動化充電技術，為各國產官學研界努力之目標**

在各種電動車技術中，是否有友善便利之「充電」環境和設備向來是電動車車主最在意的問題之一。因此，目前有許多專家學者專注於如何提升車輛充電之自動化與智慧化程度。例如利用攝影機、雷射掃描器和超音波感測器等裝置，使充電機器人自動尋找需要被充電的電動車的充電插口，並打開充電插座蓋，接上插頭完成充電，完成自動化充電。早在2015年，美國電動車大廠特斯拉年即推出蛇管型自動充電系統如圖四(a)所示；2018年，奧地利Technische Universität Graz大學與BMW合作利用UR開發一套停車自動充電系統如圖四(b)所示；2019年，美國STABLE AUTO發表150kW自動快速充電站如圖四(c)所示；2020年3月，德國機器人巨擘KUKA亦提出一自動充電手臂如圖四(d)所示，該手臂為一SCARA整合上下滑軌結構，使用者可在遠端透過APP啟動充電服務，自動充電手臂可在允許有停車誤差下尋找充電孔，自主完成充電任務。由上述說明可知，利用充電機器人實現自動充電服務，可簡化充電流程，提升充電便利性，為世界各國產學研界均積極投入之研究方向。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2015/08/tesla-robotic-snake-charging-arm-electric-vehicles-889x705.jpg  (a)美國特斯拉蛇管型  自動充電系統 | https://cdn.motor1.com/images/mgl/3Z8GY/s1/robot-charging-2.jpg  (b)奧地利TUG大學  自動充電系統 | C:\Users\CSY\Desktop\新增資料夾 (7)\Electrify-America-And-Stable-Announce-Collaboration-to-Deploy-Robotic-Fast-Charging-Facility-for-Self-Driving-Electric-Vehicle-Fleets-335-600x338.jpg  (c)美國STABLE AUTO  自動充電站 | https://i2.wp.com/www.cleanfuture.co.in/wp-content/uploads/2020/03/Charging-Assistant-Garage.jpg?fit=1010%2C568  (d)德國KUKA自動  充電手臂 |

圖四、世界各國均積極開發自動充電系統(圖片取自原技術開發者)

1. **移動式充電機器人可提升設備使用率，降低建置成本，極具商業潛力與實用價值**

雖然上述說明之自動充電機械手臂可提升充電便利性，但實際在建置充電站時仍然有以下兩項實務上之問題：(1)考慮數量有限之充電設備，當有車輛充飽電卻未能適時移出，該充電設備將被佔據而無法被利用，降低使用效率；(2)若將所有停車格均安裝充電設備，在不同時段會有不同之充電設備利用率，在某些時段可能僅有極少數的電動車在充電，使得可觀的建置成本無法帶來對等的效益。為解決上述問題，德國福斯(Volkswagen,VW)汽車與Kuka合作，在2017年提出整合自動導引車(Automatic Guided Vehicle, AGV)之自動充電AGV概念如圖五(a)所示， AGV可在接收到駕駛以APP發出需求後，依照GPS或室內定位技術自動導航至電動車旁完成充電。而中國電動車製造商Aiways在2020年發表一內存30~60kWh電池之自動充電AGV名為CARL如圖五(b)所示。韓國Samsung於2018年亦推出EVAR (Electric Vehicle Automatic Recharging*)*充電機器人如圖五(c)所示，其內建10 kWh 電池容量，可提供最大7.4kW充電功率。另一方面，VW於2019年提出不同的全自動充電機器人概念如圖五(d)所示。當電動車停進停車場內的一般停車格後，車主可利用手機啟動充電服務。此時，充電機器人將自主攜帶一具充飽電的電池推車(電池容量為25kWh，50kW快速充電)至電動車旁，再利用機械手臂協助將充電槍插入車上的充電接口。當完成插頭介接後，機器人可攜帶其它電池推車完成下一個任務。由上述說明可知，基於移動式充電機器人之創新應用，可不受固定場地限制，不需在所有停車格內均配備充電槍，無需布置充電線路、無需人工操作，有效降低停車場建置充電設備之成本，且跳脫駕駛需尋找充電樁的不便，實現更加便捷與彈性的充電體驗，極具商業潛力與實用價值。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| https://electrek.co/wp-content/uploads/sites/3/2017/07/m3_mobile-charging-robots_01.jpg?quality=82&strip=all&w=1000  (a)德國VW汽車自動充電AGV | C:\Users\CSY\Desktop\新增資料夾 (7)\Figure_2_Aiways.5ebedccf593c7.png(b)中國Aiways自動充電AGV | EVs advance charging technology  (c) 韓國Samsung EVAR  充電機器人 | C:\Users\CSY\Desktop\新增資料夾 (6)\dims.jfif  (d)德國VW汽車全自動  充電機器人 |

圖五、國際具代表性之移動式自動充電設備(照片取自官方網站)

# 本計畫欲解決之問題與其學術創新及社會影響性

由上述背景探討可知，健全便利的充電設施為影響購買電動車意願之重要因素。發展自動充電設備可大幅提升充電機動性、降低充電站建置成本、舒緩操作人力需求與改善充電便利性。由於鋼索驅動機械手臂(CDM)具有重量輕、結構簡單與成本低等優點，適合大規模佈建。因此，本計畫之第一項目標即為發展鋼索驅動自動充電機器人(Cable Driven Auto-Charging Robot, CDACR)，可自動完成充電槍對位與電力資訊交換。配合使用者手機端應用程式(APP)，可依照個人需求完成個人化充電(快充、慢充與充電量)，並於完成充電後主動提醒。接著，本計畫將整合鋼索驅動機械手臂與自動導引車(Automated Guided Vehicle, AGV)，發展一具有低成本與高機動性特性之創新移動式自動充電機器人(Mobile CDACR, MCDACR)，可在有車輛提出充電需求時，完成自主移動、對位開蓋、充電插座插入與自主返回等功能，並可在擁有行動載具的基座下實現一機多充的能力，對增進電動車充電設備利用率，改善使用者充電體驗及降低人力充電負擔具有重要的實質效益。為完成此目標，**本計畫除將發展創新之鋼索驅動移動式自動充電機器人外，並發展對應之手臂控制、車輛定位與導航、影像辨識與資通訊系統等技術。而為提高機器人之智慧化程度與穩定性，亦將以深度學習及強化式學習等技術提高機器人影像辨識能力與對位插孔能力**。相較於傳統充電站，本計畫之學術創新及社會影響性可歸結如下：

1. **發展鋼索驅動機械手臂之設計、控制與實作關鍵技術，補足國內缺乏之鋼索控制技術能量：**相較於串聯式剛性手臂，鋼索驅動機械手臂具有低慣性、低成本、高速、輕量與低耗能等優勢，然其運動學分析較為複雜，需考量鋼索運動過程中之滑輪同動、摩擦力與座標轉換等問題，故控制器設計難度較高。目前國內投入鋼索驅動裝置之研究者寥寥可數，尤其並未有串聯式機械手臂之實作成果。反觀國際則已有許多著名大學與研究機構投入研究[1]-[9]。在本計畫中，申請人將依照過往在並聯式鋼索驅動機構上之研究基礎，進一步發展串聯式鋼索驅動機械手臂之完整關鍵技術，建立國內在鋼索驅動機械手臂之自主開發與應用能力。
2. **發展創新鋼索驅動機械手臂之強健控制技術，實現穩定與快速之運動控制性能**：鋼索驅動機械手臂在各馬達之耦合致動與鋼索本身之撓性特性驅動下，鋼索易因速度變化造成振動，形成明顯的非線性特性。此外，在實際操作過程中，鋼索驅動機械手臂亦存在力矩重疊與關節同動現象，因此必須設計估測器對上述現象進行即時估測，以保有在控制過程中之強健性。本計畫除先以傳統比例積分微分控制（Proportional-Integral and Derivative Control, PID）控制器鋼索驅動機械手臂外，亦將致力於提升本計畫之學術價值，發展具有學術創新性之之遞迴式分數階積分型終端滑動模式控制器(Recursive Fractional-Order Integral Terminal SMC, RFITSMC)，以確保本計畫自製之鋼索驅動機械手臂具有良好之控制效果與可靠度。
3. **建立自動充電機制，發展國內第一套以鋼索驅動技術為基礎之移動式自動充電機器人：**傳統固定式充電設備之使用率較低，在離峰階段易有充電設備閒置之狀況。另一方面，若充電設備不足，或車輛充完電未即時駛離，或處於充電尖峰時刻，容易有車輛找不到充電設備之狀況發生。雖然大量安裝充電設備可解決上述問題，但會有造價成本昂貴之問題。本計畫設計以鋼索驅動技術開發國內第一套低成本輕量型固定式與移動式自動充電機器人，可在低成本下滿足自動化充電應用。此外，本計畫亦將妥善規劃移動式自動充電機器人、使用者手機端應用程式與充電站之間所需之通訊內容與格式。另外，亦將規劃多部車輛進行預約充電之時間預估與排程規劃，以使所發展之自動充電機制能滿足實務應用。
4. **整合深度學習與強化式學習，提升自動充電機器人之智慧化程度：**為確保移動式自動充電機器人可順利將機械手臂對位並將充電槍插入車上充電孔，本計畫將發展充電插頭影像辨識與座標轉換演算法，以正確解析出充電孔位置與角度。但考量實際應用時，攝影機與不同廠牌之電動車易有高度與角度落差，且充電孔也可能會受環境如光線、陰影及結構如塑膠絕緣片、金屬片等因素影響，造成充電孔辨識之困難。為解決上述問題，本計畫將設計深度學習方法以提高在對位時之電腦視覺辨識強健性；另一方面，設計強化式學習方法提高機械手臂在充電槍對位時之準確度與成功率。透過上述兩種方法之設計採用，將可提高自動充電機器人之智慧化程度，使本系統能有落地應用之潛力與商業價值。
5. **建置國內第一座前瞻性移動式自動充電示範場域，可提升充電效率，降低充電站建置成本：**本計畫所研發之自動充電系統提供一嶄新的服務與商業營運模式，在具定點式停留特性如百貨商場、汽車維修廠與醫院等處之地下室內停車場，可設置固定式自動充電機器人(CDACR)，依照駕駛需求自動完成個人化充電服務。駕駛可透過APP即時查閱充電進度，充電站亦可透過APP提醒駕駛前往取車，以免佔據充電停車格。另外，針對如辦公大樓、住宅大樓與校園等處之地下室內停車場與客貨運車隊專用調度場等場域，在夜間時流動率低。駕駛透過APP進行充電預約後，充電站再依照排程，派遣移動式自動充電機器人(MCDACR)進行充電服務。此模式不需設置固定充電樁與充電車位，車輛在任意車位均可享受自動充電服務，駕駛也不需再耗時排隊。相較於傳統車隊需於夜間移車充電，可大幅降低夜間人力需求。

**基於上述說明，本計畫懇請能以三年之時間發展鋼索驅動自動充電機器人之完整工程技術及完成場域示範運行，包含第一年「鋼索驅動機械手臂之創新設計開發與其結合電腦視覺之自動充電系統應用」、第二年「具備充電操作學習能力之自動充電機器人研製與其移動式平台整合開發」與第三年「自動化充電場域之電力及資通訊系統整合開發與示範運行」。**相較於傳統剛性機械手臂，鋼索驅動機械手臂具有重量輕、慣性低與成本低等優點，因此極具發展價值。申請人希冀能藉由本計畫在鋼索驅動機械手臂之深入研究與實務應用，使國內能具備鋼索驅動機械手臂之關鍵技術研發能量。此外，**本計畫亦將以此基礎發展鋼索驅動自動充電機器人，完成國內第一座前瞻性移動式自動充電示範場域，藉以提升充電設備營運效率、降低建置成本與減少人力需求，十分具有發展潛力與商業價值。**未來除規劃發表2篇國際SCI期刊論文外，亦將積極進行後續成果之產學合作、專利申請與技術轉移，以擴大本計畫之價值。

# 參考文獻

[1] S. A. Khalilpour, R. Khorrambakht, H. D. Taghirad, P. Cardou, “ Robust cascade control of a deployable cable-driven robot,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 127, no. 15, pp. 513-530, 2019.

[2] F. Yan, Y. Wang, F. Ju, J. Yao, B. Chen, H.Wu, “ Dynamic modelling and parameter identification for cable-driven manipulator,” *Current science,* vol. 116, no. 10, pp. 1331-1345, 2019.

[3] S. Jiang, D. Hua, Y. Wang, F. Ju, L. Yin, B. Chen, “Design and modeling of motion-decoupling mechanism for cable-driven joints,” *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 10, no. 5, 2018.

[4] S. Abdelaziz, L. Barbé, P. Renaud, M. Mathelin, B. Bayle, “Control of cable-driven manipulators in the presence of friction,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 107, pp. 139-147, 2017.

[5] B. Li, Y. Wang, K. Zhu, B. Chen, H. Wu, “Structure design and control research of a novel underwater cable-driven manipulator for autonomous underwater vehicles,” *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 234, no. 1, pp. 170–180, 2020.

[6] J. K. Lee, C. H. Choi, K. H. Yoon, H. J. Lee, B. S. Park, J. S. Yoon, “Design and evaluation of cable-driven manipulator with motion-decoupled joints,” *International Conference on Smart Manufacturing Application*, pp. 575-580, 2008.

[7] J. Yuan, W. Zhang, Y. Song, W. Yan, “Structural analysis of steel-cable-driven multi-joint robot manipulator,” *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 58-63, 2011.

[8] J. L. Lin, C.S. Huang, J. Chang, “A mechatronic kit with a control methodology for a modualized cable-suspended robot,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 22, no. 20, pp. 4211-4226, 2016.

[9] J. L. Lin, C. Y. Wu, J. Chang, “Design and implementation of a multi-degrees-of-freedom cable-driven parallel robot with gripper,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 5, 2018.

[10] 謝環宇，適用於果實採摘之六軸繩索機械臂機構設計與運動模擬分析，國立臺灣大學生物產業機電工程學研究所，2014年。

[11] 王笙浩，安裝於輪椅之鋼索驅動式外骨骼機械臂之設計與控制，國立成功大學機械工程學系碩士論文，2019年。

[12] Y. Li, Y. Liu, D. Meng, X. Wang, B. Liang, “Modeling and experimental veriﬁcation of a cable-constrained synchronous rotating mechanism considering friction effect,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5464-5471, 2020.

[13] MIT8\_01F16\_example8.11, https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/readings/

[14] S. Jiang, Y. Wang, B. Li, B. Chen, D. Chen, “Design and verification of a novel motion-decoupled cable-driven manipulator,”  *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 234, no. 6, pp. 690-700, 2020.

[15] Y. Wang, R. Zhang, F. Ju, J. Zhao, B. Chen, H. Wu, “A light cable-driven manipulator developed for aerial robot Structure design and control research,” *International Journal of Advanced Robotic Systems,* vol. 17, no. 3, 2020.

[16] K. Choi, J. Kwon, T. Lee, C. Park, J. Pyo, C. Lee, F. Park, C. Park, “A hybrid dynamic model for the AMBIDEX tendon driven manipulator,” *Mechatronics,* vol. 69, 2020.

[17] D. Lee, J. W. Park, T. Seo, “Low-inertia serial manipulator with counterbalance mechanism,” *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI),* pp. 369-370, 2016.

[18] L. B. Souza, J. F. Dalmedico, H. S. Kondo, M. Mendonça, M. A. Montezuma, K. Poczęta, “Inverse kinematics and trajectory planning analysis of a robotic manipulator,” *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 5, no. 4, pp. 207-214, 2020.

[19] M. Jin, J. Lee, N. G. Tsagarakis, “Model-free robust adaptive control of humanoid robots with flexible joints,” *IEEE Trans. Industrial Electronics,* vol. 62, no. 2,2016.

[20] J. Huang, L. Cui, X. Shi, H. Li, and Z. Xiang, “Composite integral sliding mode control for PMSM, ” *Proc. 33rd Chinese Control Conference*, pp. 8086-8090, 2014.

[21] N. Ullah, S. Wang, M. I. Khattak, and M. Shaﬁ, “Fractional order adaptive fuzzy sliding mode controller for a position servo system subjected to aerodynamic loading and nonlinearities,” *Aerospace Science and Technology*, vol 43, pp. 381-387, 2018.

[22] X. Lv, G. Chen, , H. Hu, Y. Lou, “A robotic charging scheme for electric vehicles based on monocular vision and force perception,”*IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* , pp. 2958-2963, 2019.

[23] S. Di, “Design of a Cable-Driven Auto-Charging Robot for Electric Vehicles,” *IEEE Access,*vol. 8, 2020.

[24] G. Hua, W. Huang, H. Liu,  “Accurate image registration method for PCB defects detection,”*The Journal of Engineering,* 2018.

[25] V. Lepetit, F. Noguer, and P. Fua, ”EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem,” International Journal of Computer Vision, vol. 82, no. 2, pp. 155-166. , 2009.

[26] https://www.ddcar.com.tw/blogs/articles/detail/這台充電器我的車可以用嗎？新手必看電動車充電插頭規格介紹

[27] Smart Parking lot Guidance System with In-Ground Indicators, <https://www.bigstockphoto.com/>

[28] Car sharing parking lot equipped with solar panels, charging stations and batteries, <https://www.alamy.com/>

[29] Daimler sets up electric bus charging,<https://www.electrive.com/2019/08/05/daimler-sets-up-electric-bus-charging-station-in-mannheim/>

[30] Robotis Feature,[https://emanual.robotis.com/docs/en/platform](https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/features/)/

[31] A. Alajlan, K. Elleithy, M. Almasri, T. Sobh., “An optimal and energy efficient multi-sensor collision-free path planning algorithm for a mobile robot in dynamic environments,” *Robotics*, vol. 6, no. 7, 2017.

[32] M. Pan, C. Sun, J. Liu, Y. Wang, “Automatic recognition and location system for electric vehicle charging port in complex environment,” *IET Image Processing,* vol. 14, no. 10, 2020.

[33] M. Kim, D. K. Han, J. H. Park, J. S. Kim, “Motion planning of robot manipulators for a smoother path using a twin delayed deep deterministic policy gradient with hindsight experience replay,” *Applied Sciences,* vol. 10, no. 2, 2020.

[34] B. Kim, J. Park, S. Park, S. Kang, “Impedance learning for robotic contact tasks using natural actor-critic algorithm,” *IEEE Trans. Systems,* vol. 40, no. 2, 2009.

[35] P. Y. Kong, “Autonomous robot-like mobile chargers for electric vehicles at public parking facilities,” *IEEE Trans. Smart Grid,* vol. 10, no. 6, 2019.

[36] S. Habib, M. M. Khan, F. Abbas, H. Tang, “Assessment of electric vehicles concerning impacts, charging infrastructure with unidirectional and bidirectional chargers, and power flow comparisons,” *International Journal of Energy Research,* vol. 42, no. 11, 2018.

# 第一年：鋼索驅動機械手臂之創新設計開發與其結合電腦視覺之自動充電系統應用

本計畫第一年目標為發展創新鋼索驅動機械手臂之完整工程技術，包含其機構設計、運動特性與系統參數分析與運動控制器設計等關鍵項目。並在完成鋼索驅動機械手臂之開發後，結合自行開發之電腦視覺技術，使此手臂實現停車場之定點式自動充電，以大幅簡化充電步驟，改善使用者充電體驗，應用情境如圖1.1所示。

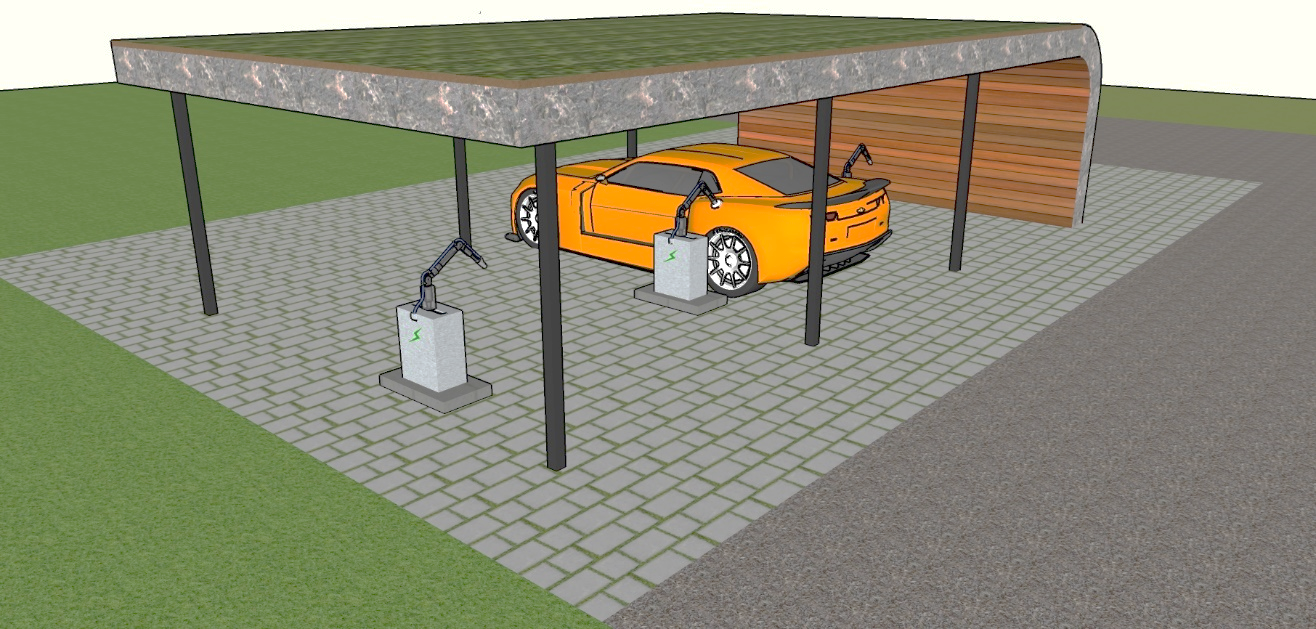


圖1.1 鋼索驅動機械手臂自動充電站應用示意圖

## 研究子題一、鋼索驅動機械手臂之系統參數分析與動態模型建立

相較於傳統串聯式機械手臂，鋼索驅動機械手臂具有低慣性、低成本、輕量、體積小與低耗能等優勢，十分具有競爭力。然而，由於其運動過程存在關節同動、力矩耦合與鋼索摩擦等問題，其控制方式與傳統手臂截然不同，故目前尚未能達到真正普及。有鑑於此，本計畫將針對上述問題進行研究並提出完善之解決策略與控制機制，最後並實現在自動化充電系統之上。

### 傳統多關節機械手臂與鋼索驅動機械手臂之力矩特性分析

圖1.2為傳統串聯式機械手臂，所有運動關節皆由一致動器直接帶動。為了簡化描述，假設各段機械手臂的長度均為*l*，重量皆為*m*。若節點*i*被重量為*Mi*的致動器以扭力*τi*驅動，*i=*1, 2,*…*, *n*為自末端點數回之關節編號，負載重量為*ML*，則手臂各段之靜態扭力*τi*可表示如下[7]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

由(1.1)式可知，前端手臂為後端手臂的負載，亦即*τi* =*f*(m, *ML*, *Mj*)其中*j=*1, 2,*…*, *n*-1。因此，當機械手臂的自由度越高時，後端手臂之最大扭力*τi*需求也將呈非線性增加，進而限制了荷重比。另一方面，考慮單鋼索驅動單關節型式之機械手臂如圖1.3所示，當驅動馬達*i*時，鋼索*i*將帶動關節*i*轉動*θi*角。假設關節*i*上的鋼索張力為*Fi*，所有滑輪的半徑皆為*r*，則與傳統機械手臂不同的是，驅動手臂*i*的鋼索*i*除了對關節*i*施加轉矩*τi*外，也會同時對關節*i*+1, *i*+2, …, *n*施以轉矩，亦即對各關節有轉矩疊加的現象。各關節的轉矩*τi*及鋼索的張力*Fi*可表示如下[7]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

比較(1.1)與(1.2)式可知，使用鋼索驅動機械手臂的外部負載可被各關節平均分攤。除此之外，由於所有馬達皆安裝在基座中，而非手臂本身，故後端馬達不須負擔前端馬達之重量。透過減少手臂重量與優化手臂架構等方式，能有效提昇荷重比，此特性顯然優於傳統機械手臂。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 圖1.2 傳統多關節機械手臂之特性分析 |  | 圖1.3鋼索驅動機械手臂之特性分析 |

### 鋼索驅動機械手臂之運動特性與關節同動分析

考慮如圖1.4所示之鋼索驅動關節，當半徑為*r*的關節*i*轉動*θi*角度時，理想上線段長度*L*1~3固定不變，但弧長*S*1和*S*2會隨轉動角度而改變。新的*S*1和*S*2可表示成*S*1, *new*= *S*1-*rθi*與*S*2, *new*= *S*2+*rθi*+1。由於理想上鋼索總長度不變，可得關係式: *S*1, *new* + *S*2, *new* = *S*1 + *S*2，故可知當關節轉動時，理想上*θi*與*θi*+1相同[12]。然而，在控制過程中若無法使各鋼索張力保持固定，則各線段長度即有可能因鬆弛而發生變化，此時*θi*=*θi*+1便無法成立。換句話說，關節*i*轉動*θi*角度無法使關節*i*+1同步轉動*θi+*1=*θi*角，此將造成應用上之困難。另一方面，滑輪與鋼索間之摩擦力亦會使帶動鋼索之力矩發生變化，間接影響鋼索之張力分佈，導致無法精確控制手臂之轉動角度。因此，有必要對鋼索驅動機械手臂之耦合現象與摩擦力進行分析，以順利對手臂進行控制。

### 鋼索驅動機械手臂之摩擦力分析與估測

由於鋼索與滑輪之間必定存在線接觸摩擦力，故必須考慮摩擦力之影響，以正確推算轉動角度。以圖1.5為例，鋼索驅動關節之正向力*N*與摩擦力*f*可表示如下[12], [13]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |

其中*F*為鋼索於*θ*角之張力，*f*為滑輪摩擦力，*v*為相對速度，*uc*為庫侖摩擦係數，sign(*v*)為符號函數。考慮鋼索驅動關節受摩擦力影響，可由絞盤方程式(Capstan equation)表示如下[13]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.4) |

其中*Fin*與*Fout*分別為施加於鋼索之輸入張力與經滑輪放大之輸出張力；*θwrap*為*Fin與Fout*之夾角。假設圓心角固定，則(1.4)式可表示如圖1.6所示之四個階段[12]。階段II和階段IV中*Fout*隨著*Fin*增加或減少；階段I和階段III中*Fout*受摩擦力方向與滑輪最大靜摩擦力影響而變化。

由上述說明可知，鋼索驅動關節在滑輪與鋼索間存在一非線性摩擦力，此摩擦力將會形成一反向力矩施加在鋼索之上，造成如圖1.6之遲滯型張力轉移現象。故為建立更為精確的鋼索驅動模型，本計畫將在系統模型上考慮如(1.4)式之摩擦力。本計畫將採用文獻[12]建議之方式計算各關節之力矩*T*與鋼索之等效剛性*k*。另一方面，本計畫將會嘗試以飽和函數sat(⸳)或其它連續函數取代原本之符號函數，避免產生摩擦力不連續現象；或直接使用不同之摩擦力模型如LuGre動態模型對摩擦力*f*做估測，再建立鋼索驅動機械手臂之動態模型，並作為控制器設計依據。本計畫將在計畫執行期間發展上述摩擦力分析與估測技術，並依照上述步驟計算與模擬各角度下所需之不同力矩及分析摩擦力大小，再以自行開發之鋼索驅動機械手臂進行實驗測試。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 圖1.4 鋼索纏繞的長度變化 | 圖1.5鋼索滑輪的微觀 | 圖1.6鋼索滑輪張力變化圖 |

### 鋼索驅動機械手臂之耦合分析與解耦技術發展

鋼索驅動機械手臂之運動耦合(Motion-Coupling)現象係為當近端關節轉動時，鋼索長度發生變化，致使末端關節發生非預期的轉動，使整體手臂之精確度與可靠度受到影響之現象。在機械手臂之關節結構中，俯仰(Pitch)運動關節與旋轉(Rotary)運動關節為兩種典型型式，若以鋼索驅動作為動力來源，各種關節均需要至少兩條鋼索拉動以分別提供正向與反向力矩。圖1.7說明俯仰角關節的耦合現象，若一開始近端關節(Proximal Joint)角度為*θ*如圖1.7(a)所示，當此關節旋轉*θ*1角時，帶動末端關節(Distal Joint)之兩條鋼索將分別緊縮與延展如圖1.7(b)所示，若其長度變化量分別為*l*1與*l*2，近端關節之滑輪半徑為*r*，則*l*1與*l*2可分別表示如*l*1=*θ*1*r*與*l*2= -*θ*1*r*。此時，長度發生變化的兩條鋼索將使末端關節發生轉動。其角度可估算如: *θ*2= *θ*1*r/r*1，其中*r*1為末端關節之滑輪半徑。由上式可知，鋼索驅動之傾角關節存在線性耦合，當近端關節轉動時，由於鋼索長度發生變化，使得末端關節亦會發生轉動。另一方面，考慮旋轉關節之初始位置如圖1.8(a)所示。當近端旋轉關節旋轉*θ*1角如圖1.8(b)所示時，末端關節之兩條鋼索將產生扭繞現象，使末端關節的兩條鋼索往上抬升，此時向上的位移與近端關節的旋轉角度呈非線性關係。此外，當末端關節的鋼索被扭繞時，其張力將會隨著近端關節旋轉逐漸上升，使得此時需使用更大的馬達扭力控制末端關節，導致控制可靠度變低，加重鋼索磨耗成本。

目前解耦機制多採用被動方式，例如利用可動滑輪降低肘關節的動態干擾[6]、利用連桿或齒輪配合繞線的方式降低耦合現象[14]。本計畫將針對既有方法進行研究分析，汲取各機構之優點並融合改良，發展具解耦特性之關節繞線設計，以降低關節發生非預期之轉動現象，確保鋼索驅動機械手臂的控制精確度與可靠度。除了運動耦合問題，鋼索驅動亦有鋼索張力問題。考量到機構穩定性，本計畫將以活動式主軸滑輪搭配固定導向滑輪進行關節設計。透過調整中間的活動滑輪位置來調整鋼索系統之張力，進而提升系統之穩定度。另外，亦確保在控制多關節的情況下各軸之旋轉角度與鋼索張力能不互相影響。目前初步之構想如1.2節所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) | (b) |

圖1.7俯仰(Pitch)運動關節(a)旋轉前姿態；(b)旋轉後姿態[14]

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) | (b) |

圖1.8轉動(Rotary)運動關節(a)旋轉前姿態；(b)旋轉後姿態[14]

## 研究子題二、鋼索驅動機械手臂之機構設計與系統實作

為了達到快速且精準的運動性能，鋼索驅動機械手臂必須有靈活的角度變化及精準的控制效能。文獻[14]、[15]與[16]分別提出了不同形式之鋼索驅動關節設計方式如圖1.9所示。一般來說，鋼索驅動機械手臂主要先由所需維度之關節與手臂組成，再根據不同應用需求進一步配置齒輪組、張力環等結構。而活動與角度之需求範圍愈大，相對的需要愈多驅動原件及愈複雜的控制方法。在圖1.9中，單方向彎曲關節如圖1.9(a)最為常見，其驅動原理較為直觀，但活動範圍較為受限。旋轉關節如圖1.9(b)較為複雜，尤其關節內部之鋼索耦合問題容易使驅動鋼索扭轉纏繞。多方向運動關節如圖1.9(c)之機構最為複雜，雖然運動方向多元，但角度容易受硬體機構限制，控制不易。由於自動充電功能所需之運動空間範圍不需太大，故本計畫規劃以如圖1.9(a)所示之機構進行鋼索驅動機械手臂之設計。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (a)單方向彎曲關節設計[15] | (b)單方向旋轉關節設計[14] | (c)多方向彎曲關節設計[16] |

圖1.9 不同型式之鋼索驅動關節設計

### 手臂重力補償機構設計

考量機械手臂之固有質量，在運動過程中若能以彈簧對重力提供基本補償力，使力矩平衡，將可達到節能之效果。圖1.10為單自由度機械手臂的力圖分析，此機構由彈簧、鋼索、滑輪以及連桿組成。連桿質量的重力力矩可表示為*τm*(*m*, *g*, *l*, *θ*)，其中*m*為連桿質量，*g*為重力加速度，*l*為質心到支點距離，*θ*為連桿旋轉角度。為了要使彈簧扭矩完全抵消重力扭矩，本計畫將設計一適當之彈性係數*k*(*m*, *g*, *l*, *b*, *α*)之彈簧使滿足下列條件: *τm* = *τs*[17]，其中*τs*(*k*, *b*, *α*)為外加彈簧形成之扭矩*k*為彈性係數，*b*為彈簧伸長量，*α*為彈簧夾角。而為避免加重鋼索磨耗，可進一步採用繞線法如圖1.11所示。當鋼索纏繞在滑輪上*n*圈時，鋼索張力會被放大*n*倍。藉由上述外加彈簧之設計，即可在不需驅動馬達情況下，主動補償重力對機械手臂之影響。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖1.10 單軸鋼索驅動機械手臂基本結構 | 圖1.11 鋼索驅動機械手臂重力補償設計[17] |

### 鋼索驅動機械手臂之機構設計

考量充電之活動空間需求與機構實現可行性，本計畫所設計之創新六軸鋼索驅動機械手臂機構雛形如圖1.12所示， 系統主要包含三個旋轉關節、兩個伸縮關節與一個平移關節，並由六個伺服馬達分別拉動六組鋼索而成。考量實際應用與需求與各關節在鋼索驅動時之活動角度及長度如表1所示，整體手臂活動空間模擬如圖1.13所示。

表1. 充電臂各關節之活動範圍

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 彎曲關節 | 旋轉關節 | 橫移關節 | 伸縮關節(下) | 伸縮關節(上) |
| ±80° | ±90° | ±15cm | 15cm | 10cm |

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\ARM\ARMIII(b) (2).jpg | C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\ARMIII(size).jpg |
| 圖1.12 鋼索驅動機械手臂機構設計雛形 | 圖1.13 充電臂之活動範圍示意圖 |

本計畫目前所初步設計之創新六軸鋼索驅動機械手臂之彎曲關節結構如圖1.14所示，透過兩組固定導向滑輪減少轉折處之阻力，以及透過一組活動式主軸滾珠滑輪作為橋接結構以減少關節活動阻力。此外，導向滑輪可使鋼索不會因為主關節滑輪轉動而改變其在關節軸上之出線位置，進而影響到對從關節滑輪之入線位置與驅動角度，確保手臂在運動過程中整體鋼索長度為固定值。採用相同原理之旋轉關節結構如圖1.15。伸縮關節結構如圖1.16，透過卡榫結構固定關節運動方向，當外側兩條鋼索拉動時驅動下臂隨之外伸，當內側鋼索拉動時下臂隨之內縮。橫移關節結構如圖1.17，關節間透過卡榫結構固定關節運動方向，並經由左右兩側共四條鋼索控制其左右橫移。下臂底座與上臂之間經由四顆滾珠滑輪減少其移動時的摩擦力。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\JOINT\DONE\BentJoint_page-0001.jpg | C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\JOINT\DONE\RotationJoint_page-0001.jpg | |
| 圖1.14 彎曲關節機械設計圖 | 圖1.15 旋轉關節機械設計圖 | |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\JOINT\DONE\StretchJoint_page-0001.jpg | | C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\JOINT\DONE\ShiftJoint_page-0001.jpg |
| 圖1.16 伸縮關節機械設計圖 | | 圖1.17 橫移關節機械設計圖 |

### 鋼索驅動機械手臂之實作與機電系統整合

針對上述所設計之六軸鋼索驅動機械手臂，本計畫所規劃之系統架構如圖1.18所示，其中主要包括串聯式關節機構次系統、計算控制次系統、馬達與驅動次系統與機器視覺次系統。在馬達與驅動次系統方面，本計畫預計選用松下(Panasonic)電機之MINAS A5 II系列通用型交流伺服馬達MSMD012G1U與驅動器MADKT1505CA1。馬達額定輸出功率為100W，額定輸出轉矩為0.32N•m，額定轉速為3000RPM，搭載20bit編碼器。在計算控制次系統方面，本計畫之運算平台預計採用國內凌華科技所推出之邊緣AI推論平台DLAP-201-JT2，內含NVIDIA® Jetson™ TX2深度學習加速處理器、CAN Bus與Serial Port介面，且可以直流電12V直接供應。手臂控制規劃採用工研院機械所開發之智慧型運動控制平台IMP-2，其內建即時作業系統(VxWorks RTOS)，有PCI-Bus軸卡模式與單機模式，可同時提供8軸伺服馬達進行閉迴路控制。直流-直流轉換模組則預計採用DSP 28335進行控制。在機器視覺次系統方面，本計畫規劃選用Basler公司所開發的USB3.0介面SCOUT Series CCD高速彩色攝影機acA1920-150uc，其解析度為1920X1200，取像每秒可達150張。在此計畫中，將使用攝影機辨識插座之位置**p**={*x* *y*}*T*進行視覺位置回授，再利用座標轉換計算鋼索驅動機械手臂各軸所需運動量。

本計畫規劃使用C#程式語言開發馬達控制演算法與相關人機介面。首先，以所發展之軌跡規劃技術求得運動軌跡命令，接著由編碼器介面讀取馬達角度，並利用正向運動學計算手臂末端位置。接著與實際位置與軌跡命令進行比較後，由控制器利用逆向運動學計算馬達各軸控制命令，再將控制命令傳送至驅動器以控制伺服馬達，提供所需要之力矩**τ***m*，進而帶動捲線機構，達到手臂之閉迴路位置控制。



圖1.18 移動式自動充電機器人整體系統架構圖

## 研究子題三、鋼索驅動機械手臂之末端運動軌跡規劃技術發展

為順利控制機械手臂，本計畫在第一年將先利用D-H 法則(Denavit and Hartenberg’s convention)建立鋼索驅動機械手臂之正逆運動學模型，以描述其關節狀態與末端點位置之關係，並做為控制手臂末端位置之依據。此外，亦將建立其正逆向微分運動學，其中正向微分運動學可由各關節轉動速度求得手臂末端移動速度；反向微分運動學則是已知機械手臂終端移動速度後，反求各關節之轉動速度，例如以求取各關節於單位時間內所需轉動的速度，其中為機械手臂之各軸轉速，為末端位置之三個速度項*vx、vy、vz*與三個角速度項ω*x*、*ωy*、*ωz*之合成向量，*J*為系統之Jacobian矩陣。

為了使鋼索驅動機械手臂能完成自動充電任務，在進行充電動作之前需先規劃機械手臂之路徑，以確保手臂末端能保持平順之運動軌跡。常見的軌跡規劃方法包括笛卡爾直線路徑規劃與空間圓弧插補方式，許多文獻亦提出各種不同之路徑規劃方式，例如最短路徑與最短時間等作法。一般來說，必須先決定機械手臂末端初始座標和終點座標，計算路徑長度，規劃總時間，再使用程式計算出其插補總次數。本計畫將透過多項式插補的方式，計算出機械手臂在每個時刻的位置、速度與加速度等資訊，使其在空間中規劃出一平滑曲線的移動如圖1.19所示。接著透過逆向運動學，獲得在平順軌跡下之各軸運動角度如圖1.20所示，使機械手臂之末端操作點從起始狀態達到目標狀態，完成機械手臂之操作任務要求。

|  |  |
| --- | --- |
|  | Third-order ANN trajectory planning Third-order ANN trajectory planning |
| 圖1.19運動軌跡規劃示意圖 | 圖1.20 機械手臂各軸旋轉角度、速度與加速度規劃[18] |

## 研究子題四、鋼索驅動機械手臂之時間延遲狀態估測與運動控制器設計

### 鋼索驅動機械手臂之時間延遲狀態估測技術發展

考量鋼索驅動機械手臂之動態模型參數無法被精確取得，系統參數亦容易受到外力與各軸間的耦合干擾，因此有必要設計狀態估測器對系統未知項進行估測，方能在狀態已知前提下設計控制器。一般來說，*n*軸機械手臂之動態模型可描述如下[19]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5)  (1.6)  (1.7) |

其中**q**(*t*)與**θ**(*t*)分別是關節狀態與馬達角度向量；**τ***m*(*t*)與**τ***s*(*t*)分別是馬達與關節之轉矩向量； **J**與**D***m*分別是馬達的慣性與阻尼矩陣；**M**、**C**、**G**與**F**分別是機械手臂的慣性轉矩、科氏力(Coriolis Force)轉矩、重力向量與摩擦力向量；**τ***d*(*t*)是未知外力干擾；**K***s*與**D***s*分別是關節的剛性與阻尼矩陣。為簡化動態模型，將(1.6)式代入(1.5)式中，並重寫如下:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.8) |

其中**M***n*為**M**的常規(nominal)部分，**H**(*t*)為總集不確定項，定義如下:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.9) |

如(1.9)式所示，**H**(*t*)包括3個部分: 馬達動態、時變外力干擾與機械手臂動態，是一個相當複雜且不易直接量測之複雜函數。而若**H**(*t*)無法順利求得，將無法得知在施加轉矩**τ***m*(*t*)下，鋼索驅動機械手臂各關節狀態將有何種動態

為獲得系統之**H**(*t*)資訊，本計畫將參考文獻[19]中對人型機器人所提出之時間延遲狀態估測(Time-Delay Estimation, TDE)方法如圖1.21所示，發展鋼索驅動機械手臂之即時動態模型參數估測技術，亦即對**H**(*t*)進行即時估測，設計估測式並改寫(1.8)式如下[19]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.10)  (1.11) |

其中*L*是估測延遲時間，是**H**(*t*)基於TDE之估測值。由(1.10)可知，TDE利用時間延遲訊號對**H**(*t*)進行即時估測。將(1.10)式代回(1.8)式，即可獲得明確之系統動態方程式如(1.11)式。在此基礎下，便可對鋼索驅動機械手臂進行各種控制器設計，完成控制目標。



圖1.21 RFITSMC-TDE估測控制方塊圖

### 鋼索驅動機械手臂之分數階適應性運動控制器設計

傳統滑動模式控制(Sliding-Mode Control, SMC)的滑動面通常是由系統狀態變化量之整數階微積分所組合而成。根據研究顯現，由於分數階控制器可以提供更多的參數自由度，設計者可透過選擇更細部的參數值達到比整數階控制器更佳的控制效果[20]。目前，亦有許多分數階滑動模式控制器被提出，並展現出比整數階滑動模式控制器更佳之控制效能[20]–[21]。由於鋼索驅動機械手臂屬於高度非線性系統，本計畫規劃以分數階微積分更能描述真實系統與自由階數更大之優勢，提出一新的遞迴式分數階積分型終端滑動模式控制器(Recursive Fractional-Order Integral Terminal SMC, RFITSMC)如圖1.21所示，以使手臂在內部參數變化與外力干擾下仍能穩定保持繩索張力與轉動關節角度。首先定義控制誤差e=qd-q，其中qd為目標向量，q為實際狀態向量，本計畫所設計之新型遞迴式滑動面如下：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.12) |

其中D為微分運算子，*α*1、*α*、*β*均為正分數常數，*σ*與*s*分別為第一、二層滑動面。由(1.12)式可知，終端設計可使控制誤差*e*在有限時間內收斂至零；遞迴式設計則可透過控制迫使系統狀態到達並停留在兩個滑動面上，推導出更精準之控制力公式，並藉此獲得更佳的暫態與穩態規格；另外積分型設計，亦能減緩控制力之切跳(Chattering)現象。未來在計畫執行期間，將針對(1.11)與(1.12)設計RFITSMC之等效控制律(Equivalent Control)*ueq*與迫近控制律(Hitting Control) *uhit*，並實際應用於所研製之鋼索驅動機械手臂之上，且與傳統SMC控制進行性能比較與分析。

## 研究子題五、自動充電機器人之電腦視覺開發與自動充電應用

### 自動充電機器人之充電流程與方法設計

　　全球電動車的充電規格主要可以分成美規(SAE J1772)、歐規( IEC62196)、中國(GB/T)、日規(CHAdeMO)及Tesla專有規格如圖1.22所示。目前台灣上市的車款除了特斯拉需要使用轉接頭外，其餘所有車款皆可直接使用 J1772 插頭進行AC 慢充，且慢慢有越來越多車款支援DC快充，故本計畫將先以目前國內普及率最高之J1772 插頭作為實驗測試插頭型式。

本計畫所設計之充電手臂如圖1.23所示，手臂末端裝有插頭，並安裝一部攝影機。由於充電如同加油，因此在實務上必須先打開充電蓋，故本計畫將一併考慮實現此動作。另外，為了確保設備的安全性，本計畫亦預計在手臂末端安裝一個力/扭矩傳感器，使機械手臂盡可能模仿人類的操作模式：用眼睛判斷和定位插座位置，再將插頭用手移動到相應的位置，最後調整插頭的同時將其插入充電端口，系統架構如圖1.24所示。本計畫所規劃之基於視覺和力感測導引之鋼索驅動機械手臂自動充電流說明如下：

1. **手眼校準**：首先需以離線方式建立機械手臂末端插頭的空間位置與攝影機座標間之轉換矩陣，一般可採用棋盤式圖樣之基座達成手眼校準如圖1.23所示[22]，以利後續之手臂控制。
2. **座標轉換**：為使自動充電機器人完成自動充電，必須進行工作空間之座標轉換，使機械手臂可正確完成定位與充電動作。在此規劃五個工作空間，分別為真實世界座標*Ow*、車輛座標*Ov*、充電端口座標*Os*、機器人基座座標*Ob*以及充電插頭座標*Oe* 如圖1.25所示[23]。本計畫將找出齊次變換矩陣、、與以分別對上述坐標系進行空間座標轉換，而任意空間之轉換亦可透過矩陣互乘獲得，例如以獲得充電端口*Os*相對於真實世界*Ow*之座標轉換矩陣；以可獲得充電端口*Os*相對於充電插頭之座標轉換矩陣。而在找出所需之轉換矩陣後，即可依照控制需求建立不同狀態間之正逆運動學，完成控制目標。
3. **充電孔辨識**：本計畫初步規劃以加速穩健特徵(Speeded up robust features, SURF)演算法加快完成插座之影像辨識與匹配[24]，藉由SURF[[1]](#footnote-2)演算法獲得充電插座四個角點座標如圖1.23。
4. **座標計算**：獲得四個角點座標後，可再透過Perspective-n-Point（PnP）[[2]](#footnote-3)演算法求解攝影機之空間位置[25]，經過座標轉換可進一步獲得目標相對於手臂末端插頭的空間位置如圖1.26。
5. **Ｌ型手臂運動控制**：當電動車停入充電停車格指定範圍內後，便開始利用電腦視覺將充電插頭移動到預先插入位置，並精確對齊充電端口。接著，充電插頭沿著充電插座之軸線平移到充電位置；再來，根據力/扭矩數據即時細微調整插頭位置，直到完成插充電器之操作為止，整個過程如圖1.27所示。而為提高動作成功率，可設計具有靈活延展性之插座形式如圖1.27所示。當打開蓋子後，充電口的結構對末端插頭具有導向作用，進而可使插座在有微小角度或距離偏差時仍能順利插入插座。

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.ddcar.com.tw/photos/shares/2020/10/11/13832/charger-compare-ff84cb35ca.jpeg |  |
| 圖1.22　電動車充電插頭規格圖示[26] | 圖1.23機械手臂整合攝影機與力/扭矩感測器 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | |  |
| 圖1.24 機械手臂充電系統的架構圖 | | 圖1.25 充電槍座標轉換圖[23] |
|  |  | |
| 圖1.26 PnP演算法示意圖 | 圖1.27 L形充電路徑與充電口示意圖 | |

### 自動充電機器人之力感測回授控制設計

完成打開充電蓋操作後，機械手臂會移動插頭以準備進行插入的動作。此時將以力/扭矩傳感器的數據可以表示為*FM* = [，，，，，]，其中*F*和*M*是從力/扭矩傳感器獲得的力和力矩，下標*x*，*y*，*z*表示軸向。由於電動車的插座孔較深並且孔的內部複雜，故在實際上電動車輛充電過程中的力/轉矩數據會是高度非線性。本計畫將事先建立成功與失敗的插孔操作之，，和之數據庫，再由此數據庫建立插孔成功與失敗的分類器。雖然經由適當正規化後，可建立、與、之二維分佈圖。但由於插入動作表現多樣，故並不易以線性或直接的方式對成功與失敗進行分類。以文獻[22]所建立之資料分佈如圖1.28所示可看出，操作正常與失敗的力與力矩分佈圖均呈重疊且非線性分佈，故亦無法簡單根據或的值來確定是否繼續進行插入操作。因此，本計畫將以類神經網路或支撐向量機(support vector machine, SVM)的方法建立分類器，利用，，和作為輸入，成功與失敗作為輸出，並將輸出的結果作為是否繼續插入或進行向上，向下，向左或向右移動。插孔操作的過程從插頭與充電口的接觸開始，一直持續到達到預設的z方向長度為止。而在電充完畢後，機械手臂將根據前面提到的L型路徑離開插座返回原位。

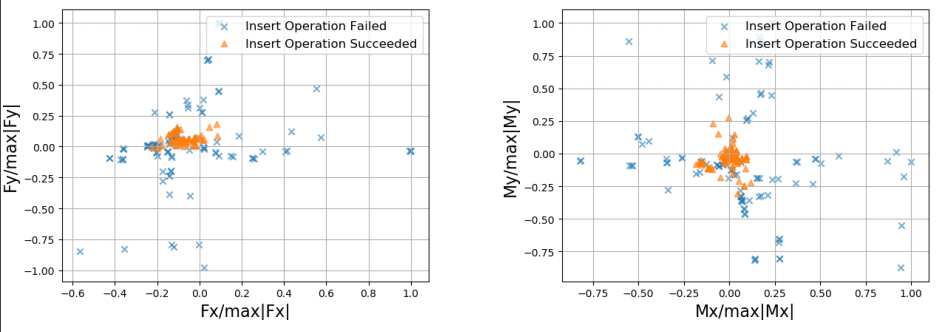


圖1.28 正規化後的力/力矩分佈圖。左:力的二維分佈；右:力矩的二維分佈[22]。

# 第二年:具備充電操作學習能力之自動充電機器人研製與其移動式平台整合開發

本計畫第二年目標為將第一年發展之固定式自動充電機器人升級為移動式自動充電機器人，並拖拉一部電池拖車(Battery Trailer)，自主移動至正確位置完成充電服務功能。而為提高機器人之智慧化程度，本計畫亦將以強化式學習(Reinforcement Learning, RL)技術，自主學習在面對各種變動環境下均能順利完成插頭對接任務。本計畫聚焦於辦公大樓、住宅大樓、百貨商場、汽車維修廠、校園與醫院等處之地下室內停車場如圖2.1(a)、共享停車場如圖2.1(b)與客貨運車隊專用調度場如圖2.1(c)，上述停車場之環境較為單純、停車格距離範圍大且排列整齊，有利於移動式自動充電機器人進行定位與自動充電服務。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Smart Parking Guidance Image & Photo (Free Trial) | Bigstock | Car sharing parking lot equipped with solar panels, charging stations and  batteries. 3D rendering image Stock Photo - Alamy | https://www.electrive.com/wp-content/uploads/2019/08/daimler-mercedes-benz-ecitaro-ladestation-mannheim.jpg |
| (a) 地下停車場[27] | (b) 共享停車場[28] | (c) 客貨運車隊調度場[29] |

圖2.1 移動式自動充電機器人之適用場域

## 研究子題一、移動式充電機器人之系統設計實作與機電整合

### 移動式自動充電機器人之移動載體規劃

為使自動充電機器人可移動式充電，本計畫規劃採用機器人大廠Robotis Inc.所設計生產之TurtleBot3 Waffle Pi做為移動式充電機器人之移動載具如圖2.2所示，其規格如表2.1所示[30]。TurtleBot3 Waffle Pi是基於機器人作業系統(Robot Operating System, ROS)之開源機器人，裝載有LiDAR與攝影機，可透過建圖與導航等技術完成室內定位與避障。此外，TurtleBot3 Waffle Pi之體積小，行動靈活且載重力道強，適合在停車場內移動。在馬達驅動方面，TurtleBot3之車輪由兩顆Dynamixel伺服馬達驅動，可提供角度與速度資訊外，亦支援速度控制模式與扭矩控制模式。而相較於其它搭載ROS與光達之載台，TurtleBot3 Waffle Pi單價較低，對於本計畫後續規劃之場域測試及示範運行之可行性高，故選作為本計畫所需之移動載體。

|  |  |
| --- | --- |
| TurtleBot3 Waffle Pi main components | https://emanual.robotis.com/assets/images/platform/turtlebot3/hardware_setup/turtlebot3_dimension3.png |
| (a) TurtleBot3 Waffle Pi外觀 | (b) TurtleBot3 Waffle Pi尺寸圖 |

圖2.2 移動式自動充電機器人之運動載台TurtleBot3 Waffle Pi[30]

表2.1 TurtleBot3 Waffle Pi系統規格表[30]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 項目 | 規格 | 項目 | 規格 |
| 單板電腦 | Raspberry Pi 3 樹莓派 | 最大移動速度 | 0.26m/s |
| 控制器 | OpenCR (32-bit ARM Cortex-M7) | 最大轉動速度 | 1.82rad/s |
| 馬達 | Dynamixel XM430-W210-T | 最大承載 | 30 kgs |
| 攝影機 | Raspberry Pi Camera Module v2.1 | 總重量(含電池) | 1.8 kgs |
| 控制器 | OpenCR (32-bit ARM Cortex-M7) | 操作時間 | 約 2hr |
| 感測器 | LDS-01 360度光達/ 9軸 IMU | 充電時間 | 約 2.5hr |
| 電池 | 鋰離子聚合物電池11.1V 1800mAh | 體積(L x W x H) | 281 x 306 x 14 mm |

### 鋼索驅動機械手臂與移動載體之整合設計

本計畫將在運動載體TurtleBot3 Waffle Pi上方安裝第一年所研製鋼索驅動機械手臂，實現一部可靈活穿梭於室內停車場之移動式充電機器人。本計畫已針對移動式自動充電機器人與電源拖車完成初步設計如圖2.3，兩者連結後即可以電池拖車作為電源對機器人電池充電及對電動車充電，應用情境如圖2.4。機器人內部結構如圖2.5，以通電吸入型電磁閥作為卡榫驅動原件。通電時電磁閥將卡榫吸入，此時機器人與電池拖車可脫離。當斷電時電磁閥之卡榫彈出，將機器人與電池拖車鎖住，使其穩定連結。連結處之剖面圖如圖2.6所示，電磁閥及卡榫結構如圖2.7，電磁連接機構如圖2.8。電池箱充電頭部分由一保護殼保護，在連接狀態下保護殼彈出保護充電頭，與充電座連接後保護殼內縮露出充電頭進行連接充電。連接線包含直流電力線與CAN Bus訊號線，未來計畫執行過程中將實際開發出如圖2.3-圖2.8所示之外殼與機電系統，並視實際情況修正或微調設計。

## 研究子題二、移動式充電機器人之充電任務排程設計

本計畫初步規劃之充電流程如圖2.9所示：智慧型充電站自駕駛端APP接收到充電請求時，便開始確認目前無任務或即將完成任務之移動式充電機器人與行動電源拖車，且機器人與電源拖車之剩餘電量(State of Charge, SOC)均需分別大於一門檻值。當挑選出後，便命令該機器人與該拖車連結，並開始定位目標車輛、規劃移動路徑。以圖2.10所示之室內停車場示意圖為例，橘色車輛為發送充電請求之車輛，黃色路徑為自動充電機器人的理想路徑，紅色路徑為自動充電機器人的穿越區域。若有數個充電需求，將同時分配多部移動式充電機器人出動執行充電任務，而若充電需求多於機器人數量，則會按照請求充電次序依序完成充電服務。當移動式充電機器人拖曳行動電源拖車到達目標車輛後，便開始以電腦視覺輔助進行充電孔對位與插入動作。充電完成後，移動式充電機器人將拖曳行動電源拖車返回充電站充電，並等候下次充電任務。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\UNCONNECT.jpg | |  | |
| 圖2.3 移動式自動充電機器人外觀設計圖 | | 圖2.4 移動式自動充電機器人應用情境 | |
| **C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\CONNECT(透示).jpg** | | | C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\connevtorI.jpg |
| 圖2.5 移動式自動充電機器人內部結構 | | | 圖2.6機器人與電源拖車連接結構 |
| C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\connevtorII.jpgC:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\connevtorII.jpg | C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\charging_setII.jpg C:\Users\Lenovo\Desktop\科技部計畫\圖片\充電車圖片II\charging_setI.jpg | | |
| 圖2.7連接卡榫示意圖，左:電磁閥未驅動(彈出)，右:電磁閥驅動(吸入) | 圖2.8機器人與電源拖車連接結構，  左: 未連接；右: 連接 | | |

|  |  |
| --- | --- |
| 圖2.9 移動式充電機器人之充電流程圖 | 圖2.10移動式充電機器人之停車場應用示意圖 |
| 圖2.11 機器人與電源拖車之功率流向設計 |

當移動式充電機器人與行動電源拖車處於連結狀態時，若機器人內部動力電池電量過低，行動電源拖車亦可對其進行充電如圖2.11，避免移動式充電機器人無足夠電力返回；當行動電源拖車之電量已不足以滿足充電需求時，移動式充電機器人將拖曳電量用盡之行動電源拖車返回充電站，於更換行動電源拖車後繼續執行任務。在本計畫中，將規劃*m*台移動式充電機器人與n台行動電源拖車，且m<n，實際之最佳比例將於計畫執行過程中進行分析設計。而藉由較多的行動電源拖車設計，可使閒置的行動電源拖車隨時進行充電，當移動式充電機器人完成任務要進行下一個任務時，可依照行動電源拖車之SOC與目標車輛欲補充電量比較，決定是否返回更換行動電源拖車。若判斷需替換行動電源拖車，則可在返回充電站即刻更換行動電源拖車，如此移動式充電機器人將不會因等候充電而停滯於充電站，整體工作服務時數將可最大化。

## 研究子題三、基於ROS系統之移動式充電機器人運行控制技術開發

在此計畫中，將開發移動式充電機器人之三大控制功能，第一部分為車體控制，主要處理地圖、定位、導航功能，由TurtleBot3 Waffle Pi上之ROS系統實現。第二部分為視覺控制中心，主要處理圖像物件辨識，需要根據運算結果驅動手臂，由機器人內部之工業電腦完成。第三部份為鋼索驅動機械手臂控制，負責處理手臂運動學計算與馬達控制，由IMP-2實現。全系統以工業電腦擔任上位控制器，負責對下位ROS系統與IMP-2發送控制命令如圖1.18所示。

### 移動式充電機器人之建圖、定位與避障技術整合開發

本計畫將在ROS上進行同時定位與地圖構建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)、導航、路徑規劃與障礙物閃避及自動充電等各種功能模組之設計與管理，鋼索驅動機械手臂與TurtleBot3 Waffle Pi之溝通則會另外以軟體進行訊息交換及溝通。在本計畫中將以移動載具中之LiDAR測距儀進行環境感測，整合ROS系統中的packages，以分散式的節點(Nodes)實現包括GMapping演算法、適應性蒙地卡羅位置定位(Adaptive Monte Carlo Localization, AMCL)、A\*與Dijkstra路徑規劃演算法、動態窗口避障法(Dynamic Window Approach, DWA) [31]所示等等策略如圖2.12所示，以能正確控制移動式充電機器人至目標車輛完成充電任務。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖2.12 移動式充電機器人系統架構圖 | 圖2.13 自動充電位置修正示意圖 |

### 移動式充電機器人之近端定位技術開發

　　當移動式充電機器人或電源拖車電量不足時，移動式充電機器人必須能牽引電源拖車返回充電站進行補電。此時必須取得補電設備與機器人的相對關係，使電極能夠對接充電。機器人使用攝影機尋找充電設備電極中央的AprilTag進行定位，並計算出相對位置關係及尤拉角，其補電程序如圖2.13所示。當已返回充電站並靠近補電電極時，會開啟機器人或電源拖車的後側鏡頭，並從鏡頭畫面中尋找AprilTag。若在畫面中沒有AprilTag則原地旋轉，否則依據得到的相對位置及角度修正機器人角度與位置，直到水平位移及角度皆在容許範圍內，則定速後退一預設時間，以定速定時的方式讓機器人或電源拖車對接充電站的電極。

## 研究子題四、在複雜環境下之強健性充電孔影像辨識技術開發

考量周遭環境與光照發生變化，例如光線不平均、光線反射或充電腳位內部之金屬芯與外圍絕緣孔之高度落差如圖2.14所示，均會對充電樁與充電槍之區域圖像造成干擾，導致在視覺搜尋過程中，傳統基於匹配辨識之影像處理方法如SURF可能無法順利辨識出充電插座輪廓、內部腳位與其座標等特徵。有鑑於此，本計畫規劃以兩種方法增加辨識精確度：(1)外加特徵策略[32]；(2)深度學習影像辨識策略，並於計畫中測試與比較兩種方法之效能與特性。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| I:\NSC109\LAB\pics\充電插座_210129_15.jpg I:\NSC109\LAB\pics\充電插座_210129_8.jpg I:\NSC109\LAB\pics\充電插座_210129_3.jpg |  |  |
| 圖2.14充電插座之影像變異因素，左：照度不平均；右：僅擷取到部分影像 | 圖2.15充電插座影像辨識策略，左：原始影像；右：外加特徵影像 | |

### 基於外加特徵策略之充電孔辨識技術開發

如圖2.15所示，若直接將J1772充電插座進行二值化與輪廓分析等處理，可找出如綠色輪廓所示之特徵範圍，該範圍相當大且單一，非常容易受如圖2.14所示之環境因素干擾，使得可辨識度降低。因此，本計畫規劃參考文獻[32]之外加特徵策略，在充電孔外圍區域增加數個圓角矩形和大小不同之圓圈特徵，以增強視覺特徵抗擾特性，提高特徵偵測的穩定度和可靠度。

### 基於深度學習策略之充電孔辨識技術開發

在實際停車場之應用中，攝影機所取得的圖像可能會有許多複雜的狀態，例如：不規則的照度、拍照角度偏差、部分影像遺失、異物遮擋甚至充電蓋未打開等狀況，進而影響後續的定位。因此，本計畫亦規劃利用深度學習進行充電孔辨識，以提高對充電孔辨識之準確度。由於在自動化充電應用中，需有即時快速之辨識效果，因此本計畫未來規劃採用YOLO(將於計畫執行過程中選擇適當版本)對充電孔進行辨識如圖2.16所示。此外，深度學習技術各項步驟中，建置樣本集合扮演極為關鍵之角色，本計畫將考量實際應用情境，建置足夠數量與類型之訓練樣本。例如，將訓練樣本分為三類，分別是:完整影像、或部分遺失影像以及充電蓋未打開影像，每個類別至少5000張以上。此外，每個類別的樣本除盡量以不同角度與距離拍攝外，亦均包含均勻照度和不規則的照度之形式，以能完整涵蓋在所有實務應用可能遇到之狀況。

## 研究子題五、以強化式學習開發機器人之充電操作學習能力與智慧

以Actor-Critic技術實現機械手臂或機器人控制之研究在近年來逐漸受到重視[33]，例如結合增強式學習與類神經網路優勢之Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)[34]，可有效地解決連續動作控制之評價與篩選問題。DDPG內部包含基於策略梯度(Policy Gradients)之神經網路(可視為Actor)與基於價值(Value-Based)之神經網路(可視為Critic)。但上述研究多以模擬驗證為主，極少用於實體機械手臂之研究。為提升移動式充電機器人在複雜環境下機械手臂對充電孔之控制能力，本計畫規劃將參考文獻[33]以DDPG方法使機器人能夠透過自我學習，強化完成機械手臂運動與充電孔對位動作。在此計畫中，將研究如何分別以兩個深度神經網路分別代表Actor與Critic以幫助機器人完成平滑與精確之插電孔對位動作如圖2.17所示，其中Actor用於根據機器人自身所能取得的狀態資訊，透過 Actor Network來產生出下一個合理的反應動作。而 Critic 的作用在於評價在某種狀況下，實行某種動作下之好壞程度。而Actor與Critic之神經網路除以時間差分偏差(Temporal Difference error, TD error)梯度修正策略進行修正外，亦將研究目前最新之相關優化演算法，以提升參數訓練速度及避免參數值變化幅度過大之問題。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖2.16基於YOLO之充電插座影像辨識示意圖 | 圖2.17 基於DDPG之強化式學習[33] |

# 第三年：自動化充電場域之電力及資通訊系統整合開發與示範運行

本計畫在第一、二年著重在創新機械手臂與移動平台開發、電腦視覺與控制，第三年將著手進行充電與資通訊系統開發，整體運行之最佳化管理，並進行全系統整合與場域測試。

## 研究子題一、前後台資訊系統開發與控制系統V2X通訊整合

第一項工作為制定Vehicle-to-X通訊協定，其中Vehicle指電動車，X泛指整個系統必須考慮充電站、鋼索驅動機械手臂、行動充電機器人、行動電源拖車與電動車之間之訊號溝通，並開發一套電動車駕駛專用一鍵補電手機應用程式(APP)。目前規劃以Android平台進行開發，所預期之功能流程說明如下：駕駛在停好車後，開啟一鍵補電APP，此時APP將會以藍芽連線連接車上電池管理系統，以獲得目前電池剩餘電量資訊。接著，駕駛可由APP選擇目標充電量，再連同電動車位置、現有電量、目標電量與相關車輛資訊及補電傳送至智能化自動充電服務平台，此時平台便會檢視現有閒置之行動充電機器人與行動電源拖車電量，再依照使用者之需求電量，判斷是否可一次充飽，或需進行多次充電，並計算出預計充電完成時間回傳至駕駛之APP。駕駛可由該時間決定是否接受服務亦或是重新選擇需求電量。當確認服務後，充電站控制中心便派遣行動充電機器人拖拉足夠電力之行動電源拖車前往充電。充電過程中，行動電源拖車亦會即時將剩餘電量傳送給行動充電機器人，再由行動充電機器人針對累積充電量、目標充電量、行動電源拖車剩餘電量與電動車電量進行綜合分析，以判斷是否需返回充電站更換電源拖車。

如上所述，智能化自動充電服務平台之用途為監控所有電動車與充電站狀態，所蒐集之資訊亦可回傳充電服務數據中心進行大數據分析，以獲知在各時段中不同停車場之充電需求，並藉以評估充電設備是否足夠，此平台規劃以PHP語法搭配MySQL資料庫進行開發。充電站控制中心則規劃以工業電腦實現。此外，電動車BMS、行動充電機器人與行動電源拖車將以CAN Bus進行通訊傳輸，手機APP則以藍芽與電動車BMS進行訊號交換。而為利於實驗室開發，智能化自動停車充電服務管理平台、充電站與手機則將以WiFi方式在同一網域直接進行通訊，整體系統架構如圖3.1所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 圖3.1一鍵補電應用程式(APP)溝通示意圖 | 圖3.2充電機器人之工作排程示意圖[35] |

## 研究子題二、行動充電機器人群組之任務調度與協同作業設計

移動式充電機器人在場域內進行充電服務時，需考量自身之充電與移動時間。根據文獻[35]對充電程序之分析與定義，移動式充電設備之運作週期可大致分成三個程序：工作週期*Tw*、恢復週期*Tr*與等待週期*Ta*如圖3.2所示，其中*α*是移動式充電機器人完整放電所花時間；*β*是移動式充電機器人返回充電站與充電所花時間。在工作週期*Tw*中，機器人會依照電動車請求，移動至各個需要充電的電動車停車位為它們充電，並且持續至完成清單上之所有充電需求。若需要充電的電動車數量太多，以至於總需求電量大於充電器電量時，充電器就會需要在一個工作週期內返回原始地點幾次去為自身充電。當完成所有充電請求，機器人會返回充電站，進入恢復週期*Tr*，此時機器人會在此時間內充電以恢復自身的電量，而其時間長度取決於上一個工作週期結束時充電器電池的剩餘電量。在恢復週期結束後，如果需求列表中有至少一個電動車在等待充電時，充電器則立即開始新的工作並進入工作週期。如果沒有，充電器會進入等待週期*Ta*，留在原始地點待命直到新的需求到來，其持續時間隨著新需求到達列表而結束。

考慮一停車場應用情境，當電動車停好車時，駕駛向智慧型充電站發出充電請求*ri*，並同時發送資訊如充電頭規格、剩餘電量、指定充電容量與位置等。待充電站控制器收到請求後，便可依照充電功率計算對該電動車充電至其電池容量百分比*cd*及指定充電容量之時間*t*，充電站控制器會將這些訊息回傳至駕駛。駕駛可衡量等待時間是否滿足需求，進而改變電量需求以改變等待時間，或拒絕接受服務。然而，雖然電動車完成充電服務之時間可被估算，但在此計算式中，並未考慮移動式充電機器人位置迷失、手臂對位操作時間延遲、更換行動電源拖車耗費時間與電池老化影響充電速度等各種變數。若受到上述變數之不良影響，將使*t*被低估，進而降低充電站之營運效率與服務品質。因此，有必要對機器人間電動車之充電調度進行最佳化管理。本計畫將在計畫執行過程中即時監控上述變數，並設計一套即時最佳化控制策略，依照需要充電之電動車數目*n*、各電動車之需求能量*Ei*、充電功率*Pi*與可服務的機器人數目*g*進行最佳化，以最小化等候時間*tr,j*。最佳化演算法之細部設計將於計畫執行過程中妥善規劃與設計。

## 研究子題三、微小化自動充電電力系統開發與佈建

電動車之充電設備主要可分為交流慢充與直流快充，交流充電樁只提供交流電力輸出，必須額外透過車載逆變器將交流電轉換成「直流電」才能進行充電。受限於車載逆變器的功率，較難達成「直流電」充電站的高功率充電速度。直流充電樁之電能無需經過轉換即可充入電池，因此能以高功率在短時間內快速完成充電。目前，台灣電動汽車充電方式多採用美規J1772規格的AC充電站充電。但SAE在2012年設計了新增兩個可用於直流快充引腳之J1772 Combined Charging System (CCS1) 如圖1.22所示，可兼容直流及交流充電。雖然直流充電站充電速度快，但因為需要大量瞬間電力供應，故需要台電安裝專用電力饋線，建置成本高，一般較適合作為公共或快速充電站。但考量本計畫之重點與可行性，目前仍先規劃以J1772 CCS1直流充電作為研究標的，待自動化充電技術皆完善之後，可再擴充交流充電功能。

福斯的自動充電機器人本身配置 25kWh電池組，並可透過 DC快充以50 kW的功率對電動車充電。本計畫將參考上述規格，並預計以10:1的方式進行微小化(Scale-down)功能開發測試，且採用國內業者生產之鋰電池模組(24V/ 50Ah)進行串並聯，以達到所需規格。本計畫所設計之整體電力架構如圖3.3所示，行動電源拖車與電動車均採用固定安裝在載具上之車載式電池充電器(On-Board Battery Charger, OBC)設計，由於本計畫先考慮直流充電，故OBC之目的為對來自充電槍上之直流電功率進行直流-直流轉換，以對電動車或行動電源拖車上之鋰電池充電，可參考文獻如圖3.4自功率因數調節(Power Factor Correction, PFC)開始右邊之架構[36]。OBC需具備高速CAN網路與電池管理系統（Battery Management System, BMS）通訊的功能，可判斷電池連接狀態是否正確；獲得電池系統參數、及充電前和充電過程中整組和單體電池的即時資料。接著，再依據BMS所提供的資料，動態調節充電時的電流或電壓參數，對直流-直流轉換器進行電流控制，以完成充電。在此工作項目中，本計畫將完成如圖3.3黃色區塊所示之直流-直流轉換器製作與設計，並以德州儀器(Texas Instruments, TI)所生產的數位訊號處理器(Digital signal processor, DSP)TMS320F28335透過CAN Bus獲得使用者指定之充電量資訊，並對電池進行SOC估測，藉以判斷出充電時間與適當充電量，再對轉換器功率開關進行控制以決定充電或放電之功率流向，並避免發生過充或充電不足之情形。本計畫申請人過去已成功開發4kW等級直流-直流轉換器，其額定電壓(V)：0-100V/ 額定電流(I)：0-40 A/ 額定功率(P)：4kW，並利用DSP實際應用於燃料電池機車控制如圖3.5所示，未來基於此成果再完成此項工作應無問題。



圖3.3充電系統架構規劃

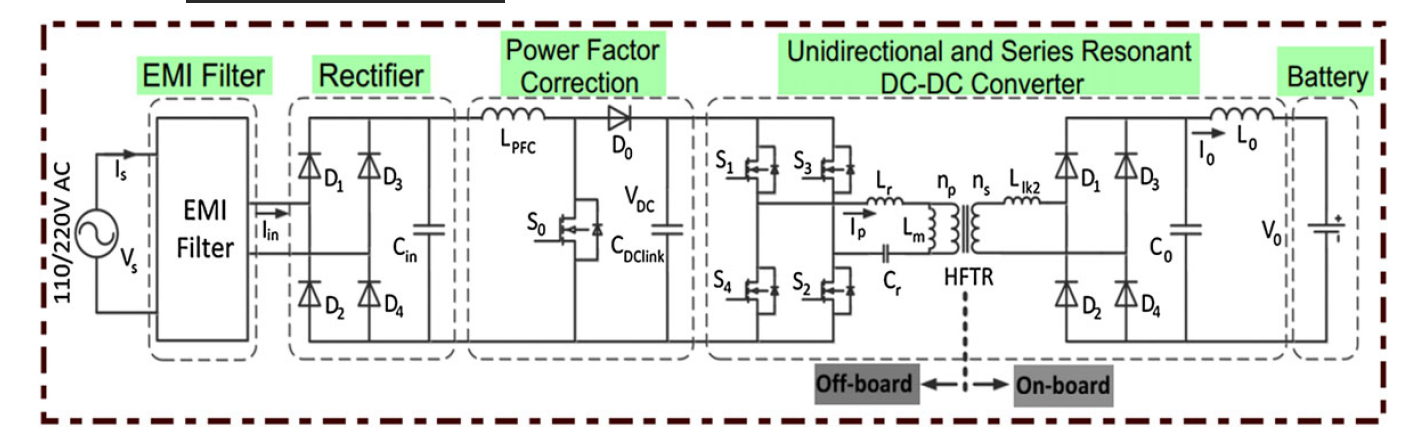


圖3.4 OBC電路架構[36]

## 研究子題四、智能化自動停車充電服務示範運行

本計畫在第三年間將於臺灣師範大學圖書館校區之地下停車場如圖3.6所示，建立一智能化自動停車充電服務微小化示範運行場域。目前規劃以地下6樓人車出入較少之地下六樓進行場域測試暨示範運行(約60個車位)，預計規劃安裝2個固定式充電機械臂、2部移動式充電機器人與4部行動電源拖車，以比例縮小之方式模擬實際場景。電動車可用一般車輛，並在車體外部黏貼J1772 CCS1插頭，以模擬實際之電動車。測試項目包括：

1. 固定式充電：在場域測試過程中，若固定式充電車位閒置，則駕駛可選擇停車於此，並在停好車後，啟動一鍵補電APP，選擇充電模式與電量，便開始進行自動充電機械臂之自動充電服務。同時，智能化自動停車充電服務管理平台亦會回覆使用者充電時間，並在充好電後以APP鈴聲通知駕駛盡速將車移走。
2. 移動式充電：若固定式充電車位無車位，則駕駛可隨機停車。停好車後同樣啟動一鍵補電應用程式，選擇充電模式與電量後，智能化自動停車充電服務管理平台將派遣移動式充電機器人前往充電，並在充好電後回到充電站補電以回覆最佳待命狀態。

經由上述說明可知，藉由此計畫在智能化自動停車充電服務之示範運行，除可測試相關技術是否完善外，亦可大幅提升電動車充電之便利性與智慧化程度，解決充電車位造價成本過高與設備不足之痛點，極富前瞻性與商業潛力。國外在近兩年已有一些研究成果，但目前尚未有具體成功應用實例，國內則是尚未有相關研究成果，故申請人誠摯期盼能利用此計畫執行機會，發展國內第一套結合創新硬體與智慧軟體之智能化自動停車充電服務系統。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\chensy\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\亞太照片_190614_0002.jpg | http://www.budget-esco.com.tw/uploads/case/9_3.png |
| 圖3.5申請人過往開發直流-直流轉換電路與其應用 | 圖3.6臺師大地下停車場 |

1. 預期完成之工作項目及成果。請分年列述：1.預期完成之工作項目。2.對於參與之工作人員，預期可獲之訓練。3.預期完成之研究成果。4.學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻。
   * + 1. **本計畫預期完成之工作項目及具體成果如下：**

本計畫預期完成串聯式鋼索驅動機械手臂關鍵技術研發與其在固定式/移動式自動充電之應用，計畫包含其機電整合、軌跡規劃、電腦視覺、強化式學習、非線性控制設計、通訊與資訊系統整合等關鍵技術。各年度工作項目與進度列於表一~三中。

* + - 1. **對於學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻如下：**

1. **學術研究:** 我國在機器人之產學研能量大多集中在剛性工業機器人之開發，在特殊的鋼索驅動機器人幾乎未投入，相關技術發展明顯落後於歐美中。本研究對於學術上之貢獻，為完成串聯式鋼索驅動機械手臂關鍵技術研發與其在移動式自動充電之應用，計畫成果可作為其他學者與國內廠商之參考依據，提高我國在創新機器人系統之國際競爭力。
2. **國家發展:** 自動充電機器人可在適當時機進行自身補電與充電服務，透過離峰時段補電與機動性充電，既不會對電網造成影響，亦可提高整體充電站之服務效率，具有顯著之效益。同時，免除人為操作。相較於傳統車隊需於夜間移車充電，可大幅降低夜間人力需求，降低電動車營運成本，普及機會高，相當具有發展潛力。
3. **民生需求:** 根據Cairn Energy Research Advisors之研究報告預測，隨著世界各國推出新方案鼓勵消費者購買純電動車，全球電動車銷售量佔比將從2020年的3%躍升至2021年的36%，伴隨而來的即為各種智慧化電動車技術之需求將同步大幅提升。本計畫所設計之自動充電系統可大幅簡化充電步驟，改善使用者充電體驗，對於刺激電動車普及與提高消費者接受度將有莫大之幫助。對於電動車車隊管理業者亦能降低充電站建置成本，減少人工操作，有效降低了運營成本。
4. **其他應用:** 鋼索驅動機器人可應用於如搬運、定位、加工與人機協同作業等產業。
   * + 1. **對於參與工作人員預期可獲之訓練如下：**
5. 培養碩士班學生參與計畫執行三年共12人
6. 建立機械手臂設計、開發、分析、實務控制與強化學習能力
7. 建立馬達控制、訊號分析、機電整合、通訊介面整合規劃能力
8. 建立電腦視覺開發、深度學習、影像處理與分析、程式撰寫能力
9. 建立直流-直流轉換器設計與開發專業能力
10. 建立資訊系統、手機應用程式設計與開發能力
11. 建立系統整合、實驗設計、系統測試與除錯等能力
12. 培養報告、論文撰寫能力與專業簡報能力
    * + 1. **預期完成之研究成果及績效**
13. 每年發表領域前30%國際SCI期刊論文1篇，3年合計3篇。
14. 發表國際機器人、自動控制、電力電子與機電整合重要研討會論文6篇、技術報告3篇
15. 除發表論文與報告外，亦將積極進行後續成果之產學合作、專利申請、技術轉移

表一、第一年 鋼索驅動機械手臂之創新設計開發與其結合電腦視覺之自動充電系統應用

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 月次  工作項目 | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 六 | 七 | 八 | 九 | 十 | 十  一 | 十  二 |
| 研究子題一、鋼索驅動機械手臂之系統參數分析與動態模型建立 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題二、鋼索驅動機械手臂之機構設計與系統實作 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題三、鋼索驅動機械手臂之末端運動軌跡規劃技術發展 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題四、鋼索驅動機械手臂之時間延遲狀態估測與運動控制器設計 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題五、自動充電機器人之電腦視覺開發與自動充電應用 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 預定進度累計百分比(%) | **5** | **10** | **20** | **30** | **40** | **50** | **60** | **70** | **80** | **90** | **95** | **100** |

表二、第二年 具備充電操作學習能力之自動充電機器人研製與其移動式平台整合開發

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 月次  工作項目 | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 六 | 七 | 八 | 九 | 十 | 十  一 | 十  二 |
| 研究子題一、移動式充電機器人之系統設計實作與機電整合 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題二、移動式充電機器人之充電任務排程設計 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題三、基於ROS系統之移動式充電機器人運行控制技術開發 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題四、在複雜環境下之強健性充電孔影像辨識技術開發 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題五、以強化式學習開發機器人之充電操作學習能力與智慧 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 預定進度累計百分比(%) | **5** | **10** | **20** | **30** | **40** | **50** | **60** | **70** | **80** | **90** | **95** | **100** |

表三、第三年 自動化充電場域之電力及資通訊系統整合開發與示範運行

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 月次  工作項目 | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 六 | 七 | 八 | 九 | 十 | 十  一 | 十  二 |
| 研究子題一、前後台資訊系統開發與控制系統V2X通訊整合 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題二、行動充電機器人群組之任務調度與協同作業設計 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題三、微小化自動充電電力系統開發與佈建 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 研究子題四、智能化自動停車充電服務示範運行 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 預定進度累計百分比(%) | **5** | **10** | **20** | **30** | **40** | **50** | **60** | **70** | **80** | **90** | **95** | **100** |

1. SURF是以尺度不變特徵轉換為基礎改良之影像辨識與匹配演算法，透過對影像積分、特徵點Hessian矩陣檢測、決定特徵方向、建立特徵向量與特徵點匹配等步驟，可辨識出目標物的特徵點座標 [↑](#footnote-ref-2)
2. PnP演算法是一種可以從2D影像中獲取3D空間數據，進而解析出攝影機與目標物所在的確切位置之演算法。 [↑](#footnote-ref-3)