

工業 4.0 中的智慧機器人

Intelligent Robots in Industry 4.0

林顯易、謝名豐

Hsien-I Lin, Ming-Feng Hsieh

工業 4.0 是目前世界上自動化製造產業的下一步革新。就全球的製造產業來說，除了面臨勞動人力不足與惡劣作業環境等問題，還需因應週期短、量少、多樣性的產品，造成目前生產製造方式無法滿足需求。然而在工業 4.0 智慧製造中，智慧機器人的使用，扮演居中關鍵角色，因為智慧機器人將可取代部份人力生產方式，以解決了勞動力不足的問題。與目前多數工業機器人僅用在簡單生產工作使用相較，工業 4.0 智慧機器人需有更多的感測與決策能力，來解決較複雜與精密的生產工作，甚至透過人類協同來進行彈性生產。因此，在本文中將提到工業機器人未來具有思考、學習、判斷等能力外，如何與工業 4.0 技術核心如物聯網、雲端、大數據、人機協同整合，以改善與最佳化自動化製造流程，達到提升產品產能、品質、降低不良率等目標。本文將簡介工業 4.0 智慧機器人需具備的能力，並將分別針對物聯網、大數據、人機協同與智慧機器人的整合進行概述。

Industry 4.0 is currently the world's trend of automation technology. For the global manufacturing industry, they need to cope with the problem of labor shortage, the problem of short product cycle time, and the problem of small-volume, large-variety production, resulting in the current production methods cannot meet the manufacturing demands. However, in Industry 4.0, intelligent robots play a key role because intelligent robots will be able to demonstrate the versatility to replace some of human labor, in order to ease the above-mentioned problems. Compared to industrial robots currently used for simple production work, intelligent robots are endowed with sensing and decision-making abilities to accomplish more complex production work, or even co-work with humans for flexible production. In this article, we mention that should intelligent robots in Industry 4.0 not only think and learn, but also exploit the synergy among essential core technologies in Industry 4.0 such as cloud, big data, and collaborative human-computer interface to improve and optimize manufacturing processes. This article will overview the above aspects.

一、簡介

隨著科技的進步發展，機器人的應用逐漸取代了人力，使得機器人的發展與工業有著密不可分的關係。在人類近代史上已歷經了三次重大的工業革命，如圖 1 所示，第一次的工業革命發生在

1780s，由於蒸汽機的發明，蒸汽機驅動機械生產取代了原先的手工人力生產，使得生產率大幅的增加而開創了機器取代手工勞動的時代。第二次的工業革命又稱為電氣革命，發生在第一次工業革命約 100 年後，由於電力的發現與大規模的應用發展，

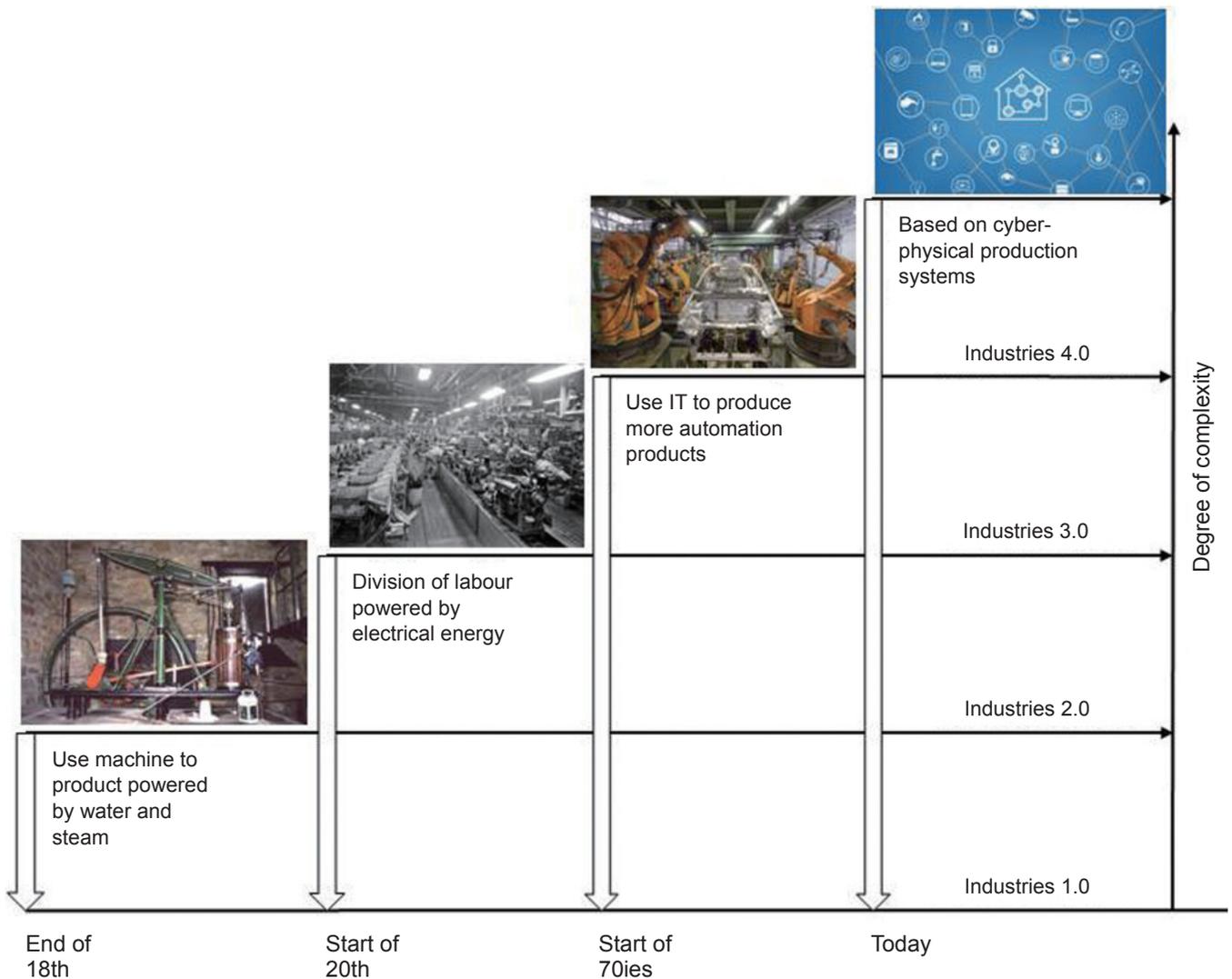


圖 1. 工業的四次革命⁽¹⁾。

帶動工廠生產力有爆炸性的提升。第三次的工業革命也叫數位化革命，在各項技術的快速發展下，進而帶動了傳統工業，變得更加機械化、自動化，大幅提升了生產效率與生產的規模。然而現在正在進行第四次工業革命又稱工業 4.0，工業 4.0 本質上是將原先嵌入式系統向虛實整合系統 (Cyber-Physical System, CPS) 發展的技術進化，相較於嵌入式系統強調於機器的計算能力，CPS 則更強調於各個裝置與運算網路的連結，使機器人不再是單獨運作的裝置⁽¹⁾，而是進行機器與機器 (Machine-to-Machine, M2M) 彼此的溝通⁽²⁾。透過 CPS 的概念，不僅僅是一對一的進行溝通，而是將機器連接

上網路系統中，可直接將訊息傳輸到任何裝置，這增加了整體運作的便利性與效率。

隨著幾次的工業革命，機器人的轉變從最一開始的蒸汽機為動力來源驅動，到電力的出現改以馬達驅動的機器人，配合生產線輸送帶，工廠開始利用機器人重複執行工作任務，跟著更多的電機與機電技術發展，機器人從剛開始執行裝配、搬運等簡單的工作，到目前用來執行高精密、高困難、高危險性的工作。伴隨著工業 4.0 到來，機器人的能力也需不斷提升，從單純執行重複動作到具有智慧化功能的設備，例如具有辨識、判斷、學習、思考與溝通的智慧機器人。智慧機器人亦可

透過 IT (Information technology) 系統整合工廠中軟硬體、儲存設備，使其相互連接成為虛實生產系統 (Cyber-Physical Production System, CPPS)。機器人除了具備即時控制能力，利用環境感測資訊，進行動作調整，更可透過機器人智慧教導與學習功能改進人機使用介面，大大節省許多時間在操作與設定機器人運作，這不僅縮短了生產製程的時間，還可避免製程的變動而停機，大幅提升了生產效率⁽³⁻⁵⁾。

二、智慧機器人需具備的能力

機器人本質來說就是由電腦控制的機械，藉由機電整合的各項技術進行控制，使其執行各種指派的任務動作。然而就一般的工業機器人來說，主要是由三個大單元，三個大單元分別為機器人主體、控制系統與教導系統，其下又可細分成機械結構系統、驅動系統、感測系統、控制系統、人機交互系統。

智慧機器人主要特色，除了將上述基本驅動、感測、控制、人機系統改進外，並強調有學習思考能力，並在工業 4.0 虛實生產系統平台上，展現其認知智能、社會智能、行為智能、環境智能、遺傳智能和群體智能^(6,7)，以下將分別對其進行介紹。

1. 認知智能

認知智能是由感測的數據對複雜或未知的情況進行推理。智慧機器人必須具有記憶與學習的能力，能依據訊息、內部狀態進行分析或動作，認知的相關技術如決策制定、任務的調度與內存的管理等。例如 Lin 與 Chen 透過對人類行為意圖的辨識來決定機器人的動作⁽⁸⁾。

2. 社會智能

社會智能即是機器人的社交性，主要用於與人的交互或溝通。機器人必須要具有與人類交互溝通與理解的能力，包括主動和被動的社交，必須要對人類的動作或命令執行反應。例如 Lin 與 Chen 亦是嘗試了解人類行為意圖的辨識，以增進人機互動⁽⁹⁾。

3. 行為智能

行為智能是以適當的方式執行選定行為的能力。如指定機器人到一個目標位置，需透過特定的演算法在執行的控制模組產生運動指令，在傳遞給各個驅動裝置進行控制，且機器人還必須要能夠停止或是避開障礙物。例如 Lin 與 Cheng 利用影像辨識與行規劃控制框架解決魔術方塊的問題。主要特色是可自動生成與執行解決魔術方塊的動作，無需人為設定，如圖 2 所示⁽¹⁰⁾。



圖 2. 行為規劃控制框架解決魔術方塊。

4. 環境智能

環境智能是透過收集感測器感測環境的數據進行辨識、分析。在決策的過程中，需要環境的訊息，環境智能將從感測器得到數據進行分析與整合，以決定機器人的下一步動作。例如 Lin 與 Tseng 將移動機器人安裝輻射偵檢器並利用粒子濾波器來搜尋環境中輻射源可能位置⁽¹¹⁾。

5. 遺傳智能

遺傳智能即是繼承之前機器人的資料、能力等。機器人擁有本身屬性，其屬性影響了內部與外部刺激或感知訊息方式的行為反應，因此機器人產生的行為是由機器人個性決定。例如移動機器人在一個有許多雜物障礙的環境移動，透過遺傳智能的技術，強化機器人學習避障⁽¹²⁾。

6. 群體智能

群體智能指多個機器人之間的合作行為，當單

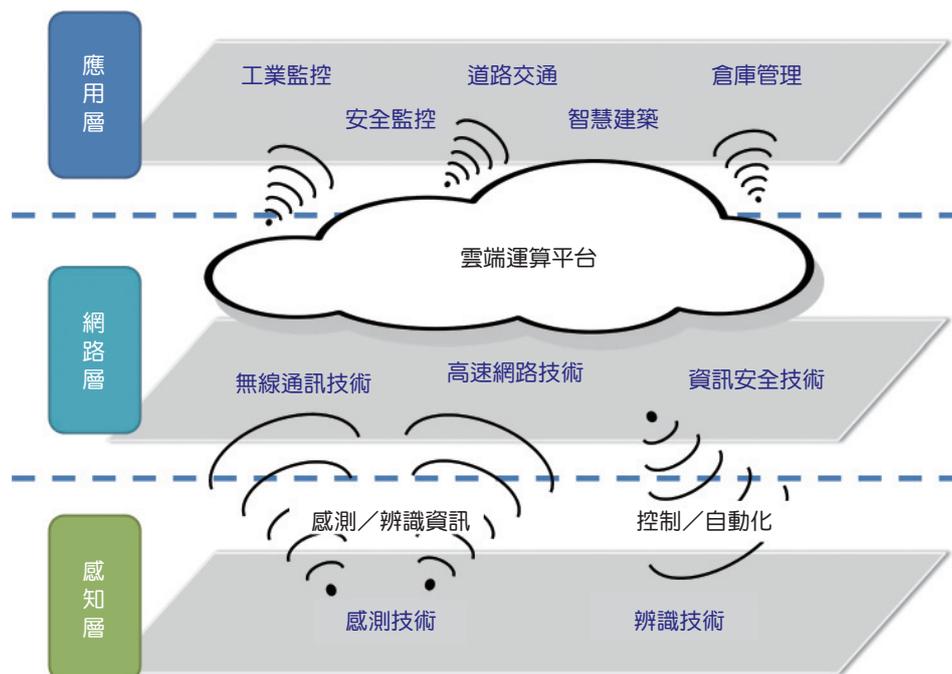


圖 3. 物聯網三層架構。

一機器人無法完成的任務，可透過多個機器人合作完成。然而合作需要能彼此共享訊息，因此機器人必須要有彼此溝通的能力，透過自身所得到的資訊，與其他機器人進行交換溝通與合作，利用集體智慧來分析多機器人系統的共享訊息，以便做出最佳的決策行為，並有效執行複雜的任務。例如多機器人搜救，透過設定一系列的航路使多個機器人跟隨，經由影像或紅外線辨識搜尋受困者⁽¹³⁾。

三、智慧機器人與物聯網

物聯網 (Internet of Things, IOT) 這個詞是由 Kevin Ashton 在 1999 年提出在供應鏈的管理⁽¹⁴⁾。物聯網是一個以應用為導向的技術，它結合了感測器技術、計算機技術與網路技術。然而現在物聯網的定義涵蓋範圍已越來越廣泛，如醫療保健、運輸等。物聯網不僅從物理世界接收訊息或環境檢測，還可利用物聯網路進行訊息的傳輸、分析、應用與溝通。物聯網可分為三層：感知層、網路層和應用層⁽¹⁵⁾，如圖 3 所示。

感知層在最底層，由感知層連接設備上的各種

感測器收集控制的信號，再將收集的資料透過無線感測網路 (Wireless sensor network, WSN) 等技術傳輸到網路層，資料經由網路預先處理、結合之後傳輸至應用層，應用層則會根據需求再反饋資料到物聯網底層進行控制，這就是物聯網的基本架構。

在機器人與物聯網的結合下，智慧機器人的控制將不再只是一對一的進行控制，還可執行一對多、多對一或是多對多的控制，這將提升整體的執行效率；且在與物聯網的結合下，智慧機器人將不再是單獨的個體，除了機器人與機器人之間可以進行溝通外，機器人還可透過網路與人進行交流與溝通。物聯網與智慧機器人結合的控制模式可分為三個類型：直接控制、監測控制與學習控制。主要是解決穩定性、任務完成性與學習能力的問題⁽¹⁶⁾，以下將分別對三個類型簡述。

1. 直接控制模式

在此模式中，可以透過網路發送命令與參數來對機器人進行遠端控制。由於網路具有延遲等的問題存在，這些問題對於整體穩定性有很大的影響，以下方有目前幾種解決方法。

(1) 預測協助方法

由於隨著時間的變化，機器人接收到的遠端訊息可能是延遲、無效的，為了減少時間延遲的影響，此方法會透過資料推斷環境訊息與狀態來進行預測。例如遠端遙控移動機器人，使用預測協助方法可將時延的影響降到最小，整體運作也更順暢⁽¹⁷⁾。

(2) 模擬與規劃方法

模擬與規劃方法是透過模擬操作以協助使用者能更直觀地控制遠端設備。使用者可直接的控制模擬操作，電腦會將模擬操作的資料依順序排列儲存，當使用者完成操作後，電腦會依資料順序傳遞給實體設備。例如控制機械手臂執行動作，透過預先的模擬規劃後，機器人的誤差降低，精準度也就相對提升⁽¹⁸⁾。

(3) 波形變換的方法

此方法是建立在波形變換的概念上，控制的信號與感測的訊息被視為波的傳播與能量的散射，透過使用者命令強制機器人補償命令傳遞的延遲時間，以改善遠端系統的穩定性。例如遠端遙控機械手臂，由於時延問題手臂的穩定性不佳，通過改變通訊的波形，調整時延造成的不穩定⁽¹⁹⁾。

2. 監測控制

在監控模式中，機器人以自主和互相配合的狀態下工作，在遇到無法自行處理的問題時，透過監測控制系統解決問題或傳輸給操作者。由於網路的延遲與移動機器人的安全性，聯網的監控顯得十分重要，以移動機器人為例，就網路上現有的經驗來為工廠無人搬運機器人建立障礙偵測、路徑規劃、物體辨識等能力，對操作者來說只需提供目標命令讓機器人執行。例如移動機器人在移動的過程中遇到障礙物，透過監測控制調整移動機器人煞車、減速等⁽²⁰⁾。

3. 學習控制

學習控制可依據學習時間長短的有效性分為兩種，短期學習與長期學習。長期學習的系統可以提供操作者行為規劃控制，可直接教導機器人執行工

作，機器人會在教導後重複執行相同動作，如圖書館的引導機器人必須要知道環境的資訊，若環境改變需要有重建新地圖的能力。短期學習的概念是讓機器人在直接控制模式上變得主動不再被動。機器人能剛開始直接透過感知訊息學習人類行為，之後透過學習能自主處理任務，且所學的知識可以在網路上更新作為新的命令，該自我學習適應的能力使機器人更加智慧化。例如 Lin 與 Lai 發展出以行為因素為主的機器人技巧學習系統，使得複雜動作可從教導過的動作調整而來，避免過多的人為教導⁽²¹⁾。

四、智慧機器人大數據與雲端運算

雲端有提高機器人與自動化系統的潛力，雲端計算可以描述成一種無所不再、方便、依照需求的網路資源(如服務、儲存、網路、應用)的共享模組，透過雲端計算可以為管理工作或服務提供最佳的配置與發佈。圖 4 顯示雲機器人可透過網路的數據或代碼來輔助其操作，而不是完全依靠自身感測、計算與儲存的獨立系統，而是可透過雲端系統遠端操作如無人機、倉儲機器人、裝配生產線、加工廠與家庭自動化等⁽²²⁻²⁴⁾。

雲機器人的技術有四個重點：大數據(取得圖像、地圖、軌跡、感測數據)、雲端計算(進行平行網格計算統計分析、學習、運動規劃)、集體學習(機器人分享軌跡、控制策略與結果)、人類示範(透過取得遠端人類的技術，進行動作、圖像之分類與學習)⁽²⁵⁾。具體來說，雲機器人有以下好處(1) 蒐集數據集、發佈模型、標準檢查程式與模擬工具；(2) 公開比賽的設計與系統；(3) 開源軟體，以下將對各重點分別論述。

1. 大數據

雲端可以提供機器人與自動化系統無法容納在設備記憶體龐大數據資源，其數據量已超出常規數據庫系統的處理能力，大數據包括圖像、視頻、地圖、即時網路與龐大的網路感測器。大數據集可以使機器人更方便學習，透過雲端網路機器人可以獲取大數據的資料，再對這些資料進行分析與學習。

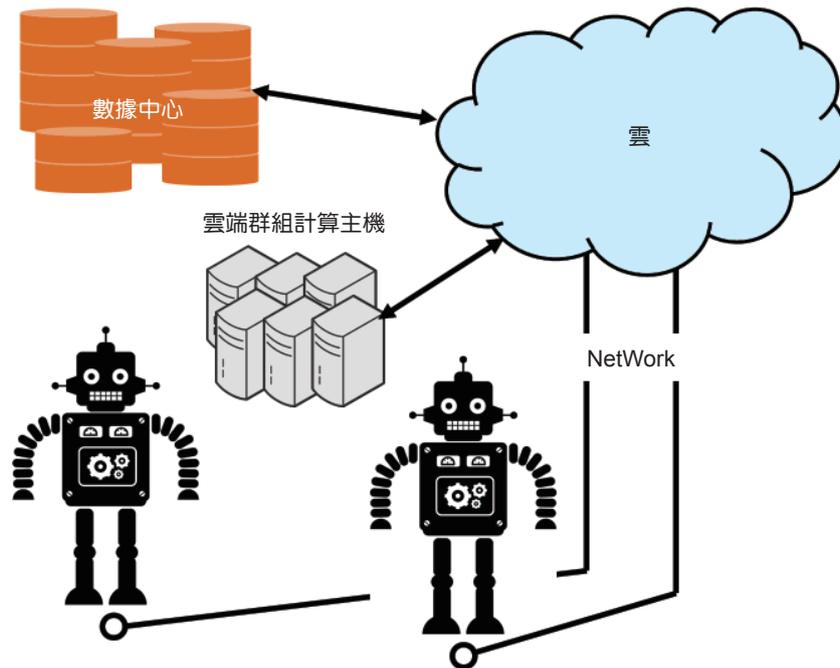


圖 4. 一個雲機器人系統的数据框架。

2. 雲端計算

平行計算提供數十甚至萬個遠端短期計算任務的處理器，最初用在 Web 的應用程式開發，但現在已被廣泛應用在科學技術的高性能計算。對自動化與機器人來說，環境擾動造成感測與控制狀態不穩定，是需要解決的核心問題，但藉由雲端的平行運算可改善控制效能。此外，機器人與雲端結合下，除了有龐大的數據可以利用外，在雲端執行計算還節省了本身的能源、硬體空間的消耗以及運算的時間，加快了整體機器人執行任務的效率。

3. 集體學習

雲端透過各自機器人採集數據，從而簡化成共享的機器人學習資料。一開始，智慧機器人與自動化系統可以共享初始條件、相關的控制參數模型與軌跡，最重要的是取得的各自的性能數據結果，以促進整體工作的規劃。如圖 5 所示，透過在機械手臂上安裝的各式感測器，將感測器取讀到的數據經由網路傳遞至雲端，使其他設備皆可共享其資料進行學習。因此通過集體機器人的學習共享數據還可以提升機器人有限的計算資源。

4. 人類示範

人類透過技能、經驗和直覺，解決了許多問題，這樣的知識透過人類的示範，機器人可學會解決問題並加速工作效率，例如複雜動作規劃、影像辨識、環境認知。一旦人類知識經驗藉由示範產生的數據資料，透過雲端的資料分析，機器人可以從龐大的數據庫得到如何最佳使用人類的知識經驗來解決問題。

五、人機協同

人機協同大致可區分為三個不同的類別：遠端協同，近端的協同以及物理的協同。每個類別對於機器人和人類操作者之間的距離有所區別。在遠端協同中，人類與機器人各自在單獨環境進行工作，它們之間沒有直接的相互作用，而是人類使用者利用控制界面操作遠端機器人進行工作。遠端協同由人類輸入主要目的或建議進而引導機器人完成特定的任務與工作目標，機器人端回傳相關感測資訊給人類，如圖 6 所示。在遠端協同中，需具有能隨時偵測環境變化並即時控制的能力，環境中的資訊

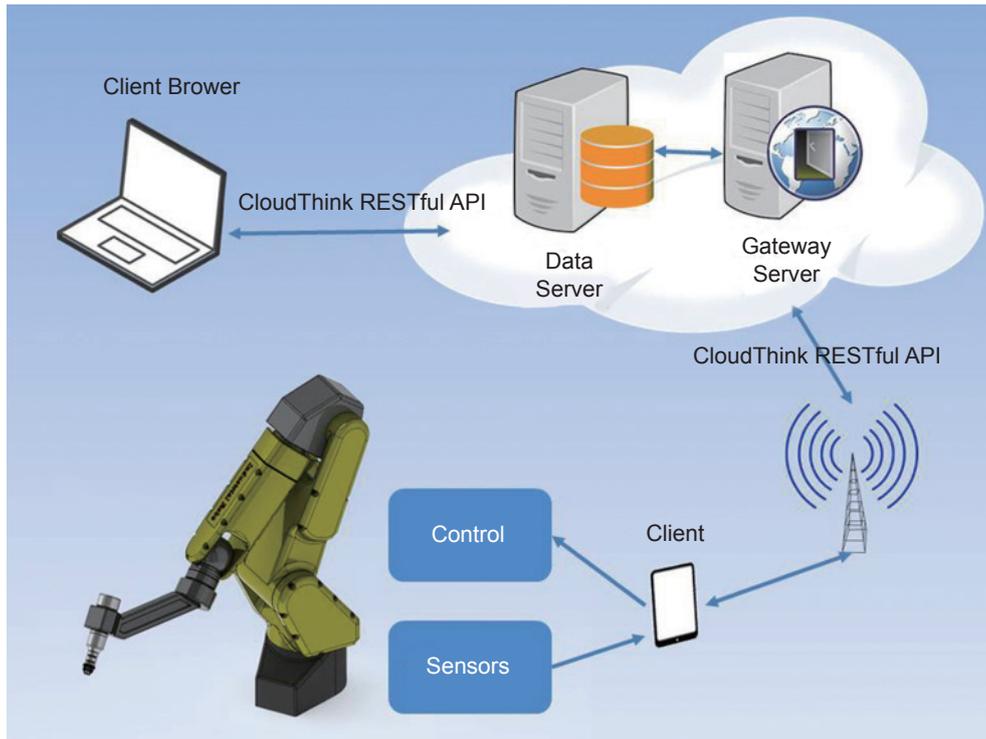


圖5. 雲端思考的原理架構。

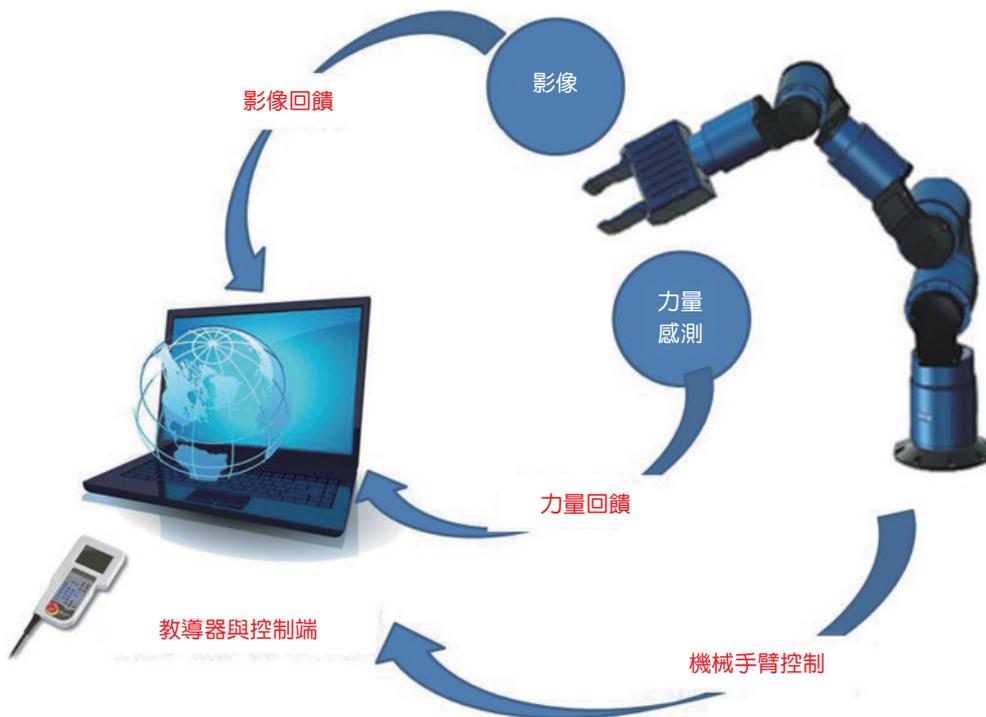


圖 6. 與機器人遠端協同。

可透過感測器偵測，藉由物體的定位與影像的擷取以及回歸，建立虛擬環境，使得操作者了解環境資訊，並可對於環境的變化做出及時反應於顯示器上，使得操作者能及時控制機器人的運動方向。例如 Lin 與 Chen 提出遠端操控機器人並搭配機器人混合控制策略改善單純遠端控制的方法⁽²⁶⁾。在近端的協同中，機器人和人類彼此享有共同的空間並工作，但兩者之間沒有直接接觸。在物理協同中，人類與機器人有直接的物理接觸，它們彼此位於共同的空間相互工作。在近端協同中，人類主要扮演監督及決策的功能，因為畢竟機器人的感知是遠小於人類的，以便機器人進行工廠自動化系統管理。例如機器人幫忙搬運材料以及抱重物，上下料等等日常任務，以減少人員勞力的負擔，並增設感測器，避免發生碰撞以增加安全性⁽²⁷⁻³¹⁾。

在物理性協同中人類和機器人共處同一空間完成一件工作，如圖 7 所示。最常見的為小組件裝配，尤其是在電子產業，高速增長的產品需求已遠遠超過工人的生產數量。德國推出雙臂機器人 YuMi⁽³²⁾，具有視覺和觸覺回饋，工作項目可從手錶的精密原件到手機、平板及桌上電腦等組裝，更重要是包含著「安全」的設計，比如與人類同事相碰撞時，他能夠在幾毫秒內停止運動，再輕鬆恢復運動。

六、應用

智慧機器人在工業 4.0 扮演重要的角色，其應用包含焊接，塗裝，組裝等。若能將機器人整合大數據、雲端、物聯網各項技術，可幫助整個工廠成為具有自主能力的生產製造系統。例如在智慧工廠中自動導引車 (AGV)，AGV 負責運輸、搬運的自動化機器人，在與 CPS、雲端、物聯網、大數據結合後，有更佳的 AGV 的排程與軌徑規劃，除了可提升了自動化與效率的程度，還減少了勞動力成本，特別是在處理較大的物件或是具有腐蝕性、有害的產品，增加了生產的產能，且可在狹小的空間運輸產品，提高了整體的工作效率。

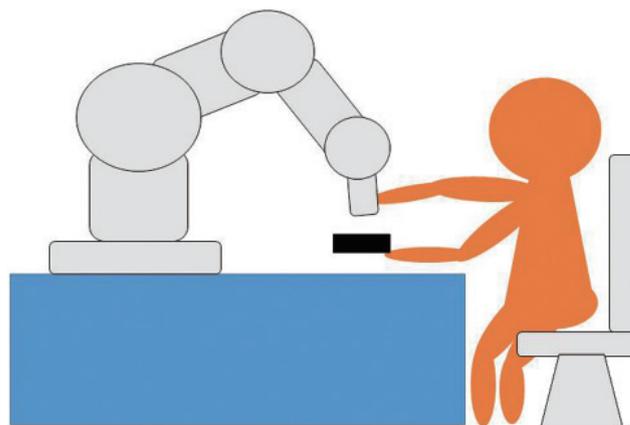


圖 7. 人類和機器人共工。

七、結論

當所有都在討論工業 4.0 中的智慧機器人，我們希望機器人不僅具有基本動作能力，還要具備人工智慧並與工廠中人類使用者密切互動。此外，隨著機器人與網路的結合，機器人可以為人們提供許多不同遠端服務，雖然提供網路為用戶方便進行遠端控制，但延遲問題與數據封包丟失問題需待解決。另一方面，雲機器人可藉由雲端蒐集大量數據集，並且透過雲端計算的功能，得到最佳的答案。因此在工業 4.0 中，機器人的智慧經驗已不再單獨取得，而是群體分享資源來共同解決問題；也在與物聯網的配合下，機器人可互相進行溝通，取得對環境更多的了解。目前也看到智慧機器人漸漸地用在許多應用，諸如機器人臂用於工廠自動化與危險的環境、醫院自動化與醫療機器人等。

雖目前智慧機器人的技術在生產製造上有立即的需求，且其技術成果直接地影響到機器人在娛樂、服務、軍事保全機器人的發展。我們可以預見雲機器人一樣會被應用到娛樂與服務機器人，透過網路將每個家庭的智慧機器人連結一起，勢必會有下一波機器人社群問題出現，甚至機器人的智慧有一天會超過我們的預期。著名英國物理學家史蒂芬霍金 (Steven Hawking) 曾說：「人工智慧或許不但是人類歷史上最大的事件，而且還有可能是最後的事件」。對於這一天的可能的到來，身為從事機器人相關研究的我們，不免感到興奮又惶恐。

參考文獻

1. J. Wan, H. Cai, and K. Zhou, in *International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*, 135 (2015).
2. Stojmenovic, in *Mediterranean Conference on Embedded Computing*, 21 (2013).
3. B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, D. Pantförder, and P. Göhner, in *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 21 (2014).
4. Y. B Reddy, in *International Conference on Information Technology - New Generations*, 200 (2015).
5. H. L. Lin, and Y. P. Chiang, *Int. J. Adv. Robotic System*, 12:49, doi:10.5772/60093 (2015).
6. J. H. Kim, in *International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Robotics*, 1 (2011).
7. J. H. Kim, S. H. Choi, I. W. Park, and S. A. Zaheer, *IEEE Computational Intelligence magazine*, 70 (2013).
8. H. I. Lin, and Wei-Kai Chen, in *Proc. Int. Conf. Automat. Control (CACs)*, 240 (2014).
9. J. Chan, and G. Nejat, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9, 1 (2012).
10. H. I. Lin, and Chia-Hsien Cheng, in *Int. Conf. Control, Automat. Syst. (ICCAS)*, 808 (2014).
11. H. I. Lin and Hua Jr Tzeng, in *Proc. Int. Conf. Adv. Robot. and Intell. System. (ARIS)*, 56 (2014).
12. D. Maravall, J. De Lope, and JA. Martin, *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*, 18 (2007).
13. V. Zadorozhny, and M. Lewis, in *International Conference on Mobile Data Management*, 275 (2013).
14. A. Aadhytan, in *International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems*, 1 (2015).
15. B. Liu, L. Cheng, H. Wu, Y. Chen, F. Wang, in *International Conference on Modelling, Identification and Control*, 537 (2012).
16. R. C. Luo, K. L. Su, S. H. Shen, and K. H. Tsai, in *Proceedings of the IEEE*, 371 (2003).
17. J. Kikuchi, K. Takeo, and K. Kosuge, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3534 (1998).
18. L. Conway, R. A. Volz, and Michael W. Walker, *Transactions On Robotics And Automation*, Apr 146 (1990).
19. F. Yang, H. Li, and Y. Wang, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec 1610 (2012).
20. Ren C. Luo, and Tse Min Chen, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 376 (2000).
21. H. I. Lin and C. C. Lai, in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IROS)*, 2383 (2012).
22. L. Wang, M. Liu, M. Q. H. Meng, *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, 507 (2015).
23. A. Vick, V. Vonasek, R. Penicka, and J. Kruger, in *International Workshop on Robot Motion and Control*, 33 (2015).
24. C. T. Yen, Y. C. Liu, C. C. Lin, C. C. Kao, W. B. Wang, and Y. R. Hsu, in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1150 (2014).
25. B. Kehoe, S. Patil, P. Abbeel, and K. Goldberg, *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, 398 (2015).
26. H. I. Lin and C. L. Chen, *J. Dynam. Syst., Meas. and Control-Trans. of the ASME*, Technical Brief, 136, 034502/1 (2014).
27. C. Heyer, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4749 (2010).
28. B. Nemeč, A. Gams, M. Denisa, and A. Ude, in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 1439 (2014).
29. D. Nakhaeinia, P. Laferriere, P. Payeur, and R. Laganier, in *Conference on Computer and Robot Vision*, 237 (2015).
30. D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll, D. Zuhlke, in *IEEE International Conference on Industrial Informatics(INDIN)*, 289 (2014).
31. Y. Wu, W. L. Chan, Y. Li, K. P. Tee, R. Yan, and D. K. Limbu, *International Conference on CIS & RAM Applications*, 153 (2015).
32. ABB review. from <http://www.abb.com.tw/>



林顯易先生為美國普渡大學電機與電腦工程博士，現任國立台北科技大學自動化科技研究所副教授。

Hsien-I Lin received his Ph.D. in Electrical and Computer Engineering from Purdue University, West Lafayette. He is currently an associate professor in the Graduate Institute of Automation Technology at National Taipei University of Technology.



謝名豐先生為現為國立台北科技大學自動化科技研究所碩士班學生。

Ming-Feng Hsieh is currently a M.S. student in the Graduate Institute of Automation Technology at National Taipei University of Technology.