

智慧工廠簡介

Introduction to Smart Factory

周碩彥、Anindhita Dewabharata

Shuo-Yan Chou, Anindhita Dewabharata

智慧工廠的概念在不同的時期應有所不同。在現階段技術和產業發展基礎及未來經濟社會發展的需求下，形成了一個階段性的定義，即是基於工業 4.0 核心技術網實系統所產生的智慧生產環境。是一個工廠作業方式的典範移轉，不僅系統模式可應用於其它產業，其所生產的連結智慧產品所造成的衝擊更超越製造業的藩籬。

The concepts of Smart Factory vary during different times. With the current technology and industry development and needs for coping with future social economic development, a pragmatic definition is formed. Smart Factory is the smart production environment mainly based on the core technology of Industry 4.0, namely, Cyber Physical System. It is a paradigm shift for the operational activities in factories, not only applicable for many other industries but also creating significant impact far beyond the boundary of manufacturing industries through the connected smart products they will be producing.

一、前言

智慧工廠為現階段產業對未來工廠的憧憬，除了在硬體上呈現現代化、科技化和完全不像工廠的外表外，更重要的是其生產系統所具有的智慧化能力，以及進一步所提供的效率、彈性和生產力。憧憬的根源為各國產業為面對未來環境的經濟社會挑戰，對工廠生產能力所產生的願景。這些挑戰為工業化國家所面對的共同議題，包括老年化社會、缺乏大量技能勞工、城市化發展、產品變異增加、市場需求不確定、產品生命週期縮短、大量／少量／單件客製化混合生產模式、動態的價值網路等。

智慧工廠的核心在於一個更具彈性和客製化能力的高效智慧生產系統。傳統訂製式量產 (mass

customization) 或稱大量客製化系統多半依賴著較為固定的生產程序，故其實踐常涉及產品設計修改以配合制式製程限制，或是複雜的產品和製程的重新設計。智慧工廠的生產程序，單一客製產品依其加工需求自我找尋資源與完成其所需的處理工作，人、機器和機器人在共同工作空間中相互聯繫、協調與串聯工作，物料和機器間也相互溝通、聯繫需求與行動，形成一個高度自主、彈性、個別化、資源友善的製造環境。生產產品的種類可能非常複雜，然而，生產過程如同在大量製造的單純流水線流程，產品即時自主、自動的流動於生產環境中，可在具有競爭力的成本和時間下完成個人化／個性化產品的生產。

在網路，特別是物聯網 (Internet of Things)、

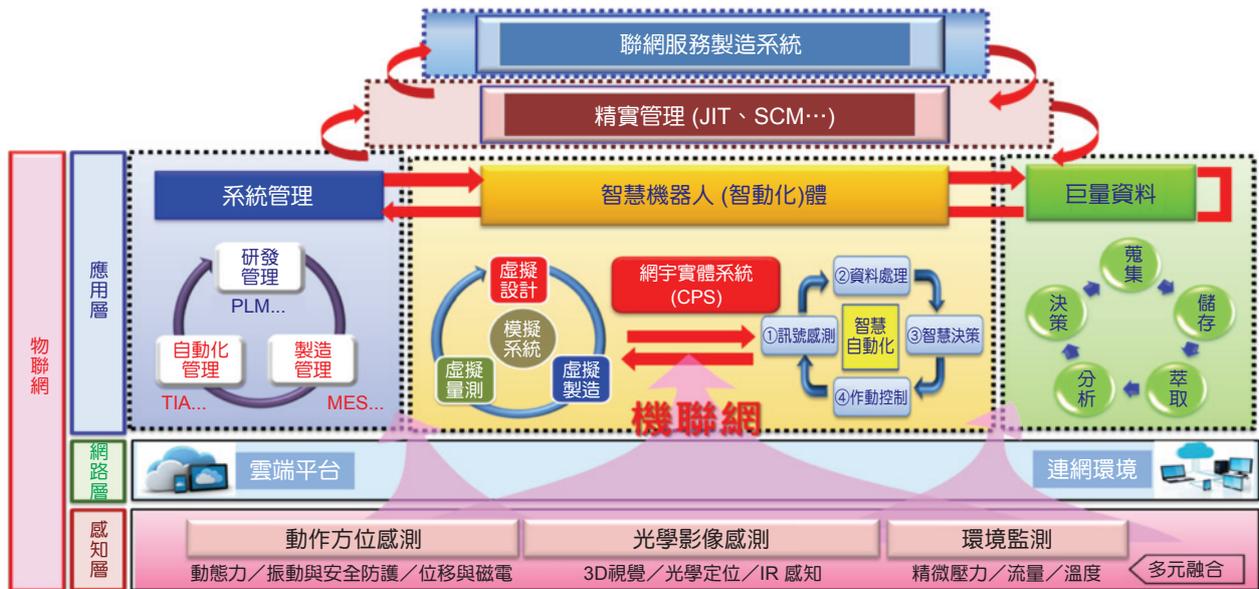


圖 1. 台灣生產力 4.0 聯網服務製造系統 架構 (資料來源：經濟部工業局)。

網實系統 (Cyber Physical System, CPS)、工業 4.0 (Industry 4.0)、工業互聯網 (Industrial Internet)、數位製造等新興架構的推波助瀾下，世界各國和產業對智慧工廠發展產生了高度興趣和關注。整體而言，智慧工廠仍是一個願景，各項相關技術尚需逐步優化，系統功能的整合性和互用性尚待加強，新技術導致生產環境變遷的對應管理機制和商業模式創新亦待釐清與發展。這些系統概念或是架構在發展和使用上的角度不盡相同但多有重疊，而各國因其產業現況和特性亦有不同的發展重點和策略。故以下將就智慧工廠的主要相關議題簡略介紹，希望可讓讀者對此主題建立基本的了解。

二、智慧工廠與工業 4.0

工業化肇始於 18 世紀末期機械製造設備的導入，像機械紡織機般的機器產生了物品製造的革命，隨後於 20 世紀初產生了基於勞動分工和電力驅動的大量生產革命，以及接續於 1970 年代初期至今的第三次工業革命。第三次工業革命引入了電子和資訊技術以提升製造程序的自動化，但機器取代的不僅是勞力工作，也取代了部分的腦力工作。「工業 4.0」或是「智慧工業」的發展植基於第三次工業革命自動化基礎之上，從嵌入式系統

到 CPS 的技術創新，以及資料／物件／服務的聯網，此種網實整合的製造／生產環境已經逐漸的將實體和虛擬世界的邊界模糊化了，也被視為將引領產業進入第四次工業革命，但其對經濟社會的直接影響將會更廣泛而深入⁽¹⁾。

台灣在 2015 年亦開始了名為生產力 4.0 的產業發展策略，目標為促進國內產業創新轉型，掌握關鍵技術自主能力和維持國際競爭力。行政院並於 2015 年 9 月核定生產力 4.0 發展方案⁽²⁾，核心技術發展為整體方案的三大核心理念之一，主要為導入網實融合與人機協同關鍵自主技術，將運算能力結合感測器與通訊網路，建立於生產設備及生產管理系統，使之具備自動感知、自動預測和自動配置能力，進而彈性調整製造生產與營運模式服務系統，以實踐訂製式量產與服務生產力。主軸策略中特別針對製造業、商業和農業優化領航產業智慧供應鏈生態系統，聚焦於電子資訊製造業、金屬運具製造業、機械設備製造業、食品製造業、紡織製造業、零售及物流服務業、領航農業 (生技農產業、精緻農產業、精準農產業) 等，如圖 1 所示。

狹義的智慧工廠可單純的定義為工業 4.0 或是其核心技術網實系統導入所產生的新工廠環境。廣義的智慧工廠則包含了更多的技術、系統、生命週期階段、利益關係者等的整合，連結的範疇不僅限

於製造過程，更包括了產品生命週期和價值鏈水平、上下游充分的鏈結和整合。無論是狹義或是廣義的智慧工廠，其核心概念皆為網實整合，亦即是將機具設備、產品、物料、人員等實體物件和其作業活動，進一步透過數位化、感知和無線通訊等技術將其於虛擬／網路世界建立對應且無縫的連結。

工業 4.0 於技術層面的發展為自然演進而非革命性。除了摩爾定律所描述的成本效益持續的指數性提升外，物聯網（感知、通訊等）技術提供了生產環境實體物件與活動前所未有的連結、溝通、協調能力。此種連結所能帶來的效能，在現有以資訊設備連結為主的網路世界已被清楚的認知，任何人都可以隨時隨地上網取得網路上所有的知識和數位服務。一旦將實體物件及活動連結上網，將實體整合至虛擬網路世界，實體物件所需要的運作知識、信息溝通和作業串聯可輕易的達成，因而支持了智慧工廠所需要的神經網路系統。進一步透過機器學習等多種智慧工具，於網路世界預先或即時進行分析、模擬、協調、預測等多項和實體世界鏡射的作業活動，賦予了實體製造環境網路世界的智慧化能力，因而提升其生產效能。

工業 4.0 分散式的智慧幫助創造了智慧物件的網絡化以及獨立程序管理，並由實體與虛擬世界的交互影響表現了製造和生產程序一個關鍵新面向，一個由集中式到分散式生產的典範移轉，是藉由技術演進促成的一個傳統生產程序邏輯的逆轉。在智慧工廠的環境中，人類、機器和資源彼此間如同於社交網路般自然相互溝通，智慧產品知道他們如何製造的細節，以及知道他們將如何被使用。他們主動的支持製造程序，回答例如我是何時被加工的問題，哪些參數值應被採用以加工我，我應該被送往何處等？簡而言之，這代表了工廠生產機器不再是單純的加工處理產品，而是由產品和機器溝通，確切告知該執行何種工作。如此，智慧工廠具有管理複雜度的能力，較不容易受中斷，因此得以更有效率的製造產品。

垂直網路採用工業 4.0 以促使工廠得以快速反應在需求與存貨水準的變化和錯誤，智慧工廠內則得以自我組織，以及進行因客戶而異與個別化的

生產^(1, 3)。這些新價值創新網絡為即時最佳化的網絡，可產生整合的透明度，提供一個高階的彈性以更快速的回應問題和錯誤，以及促進更佳的全域最佳化。經由機巧的跨整體價值鏈和跨產品與客戶完整生命週期的跨領域整合的貫穿工程，資料和資訊同時在產品生命週期的各階段皆可提供，使得全新、更有彈性的程序可藉由模式化到原型和產品階段由資料定義。指數型科技的發展會提供更大的彈性和穩健性，導致動態、即時最佳化和自我組織價值鏈的浮現，取得基於如成本、有效性和資源消耗等多種準則的最佳化。

工業 4.0 將會產生支援全方位智慧工廠和智慧產品生命週期，協同工業程序與關聯商業網絡的新穎 CPS 平台。由這些平台提供的服務和應用可將人員、物件和系統相互連接，且會具有由快速和簡單編配服務與應用所提供的彈性，依循 App Store 模式簡易配置 (allocation) 和部署 (deployment) 的商業流程，以及在商業網路中支援協同製造、服務、分析和預測程序⁽¹⁾。如此得以導致傳統價值鏈的轉型以及創新商業模式的出現。因此，工業 4.0 於工廠內的應用不應獨立的進行，而應被視為於眾多關鍵領域中需採取行動者之一，應以一跨領域方式建置，且與其它關鍵系統緊密合作。

三、網實系統

CPS 為一種促能技術 (enabling technologies)，整合虛擬與實體世界創造一個真正網路連結的世界，使得智慧物件得以彼此相互溝通互動。CPS 可視為現有嵌入式系統演化的下一步，即嵌入式系統結合互聯網及可供使用的線上資料與服務而形成了 CPS。CPS 提供了創造物件聯網 (Internet of Things) 或是物聯網的基礎，再進一步結合服務聯網 (Internet of Services) 而促成了工業 4.0 的可行性。因為實體與虛擬世界邊界的逐漸消失，這些促能技術使得多個創新應用和流程得以實現^(4, 5)。

因此，CPS 允諾了一個我們和實體世界互動的革命，幾乎是和互聯網轉變個人溝通和互動相同的方式。高功能軟體為基礎的嵌入式系統和整合至數位網路的專屬使用者界面的相互影響，創造了一

個系統功能的全新世界。現代行動電話可能為最明顯的案例，提供了完全超越了該設備原有通話功能的整群應用和服務。當革命性的新應用、服務提供者和價值鏈成為可能，CPS 也會代表著典範將脫離現有的企業和市場模式⁽⁴⁾。

CPS 整合受時間、空間限制的實體物件和作業，透過和網絡世界的聯結，取得虛擬世界的知識和能力，使得如製造等實體世界的活動更有效率的執行。虛擬世界進行的分析和決策必須要基於足夠的實體世界資訊，特別是在許多應用情境上需有實體世界的即時資訊，實體系統的感知和傳輸能力亦是關鍵而不可或缺的。此外，如同行動電話藉由 app 軟體促使硬體功能應用達到極致，CPS 系統的智慧、彈性等核心功能主要亦是依賴軟體實現。相較而言，第三次工業革命之自動化系統發展則是較關切硬體能力，而視軟體為局部輔助功能。

現階段擴增實境 (augmented reality) 技術，以視覺和視覺化的功能串聯了實體和網路世界的事物，即可視為一個支援實體世界活動良好的人-機整合 CPS 子系統。以維修輔助系統為例，維修人員透過擴增實境影像工具擷取實體工作環境資料，

連結雲端計算和環境資料庫進行分析與辨識，或者提供遠端專家同步觀察，再將協助維修工作的信息、圖像或動畫指引傳回維修人員擴增實境顯示幕和實體世界物件重疊呈現，協助維修人員即時進行有效的維修工作。電網、交通、醫療、工廠，乃至於城市等較複雜的系統，在透過物聯網進行網實整合後，所建立的亦即是 CPS 於不同產業產生的智慧應用。在下一節將進一步說明較複雜智慧工廠環境的 CPS 智慧應用模式。

在 CPS 中除了關切機器和機器的溝通外，亦強調機器人-機器人，以及人-機器人的協同合作。也因此 CPS 中機器人的設計必須特別強調人因工程，除了在重疊空間工作安全機制的考量外，需透過使用者體驗 (Ux) 分析針對此全新人-機合作環境的使用者介面。此介面需要讓使用者能自然的、有效的指示和控制機器人，機器人的活動狀況和意圖也必須讓使用者直覺的、清楚的了解。在同樣的人-機器人架構下，智慧機器人發展不需專注在單一機器人的智能化，機器人的智能亦可透過雲端機器人的架構以眾多機器人群體的力量產生。

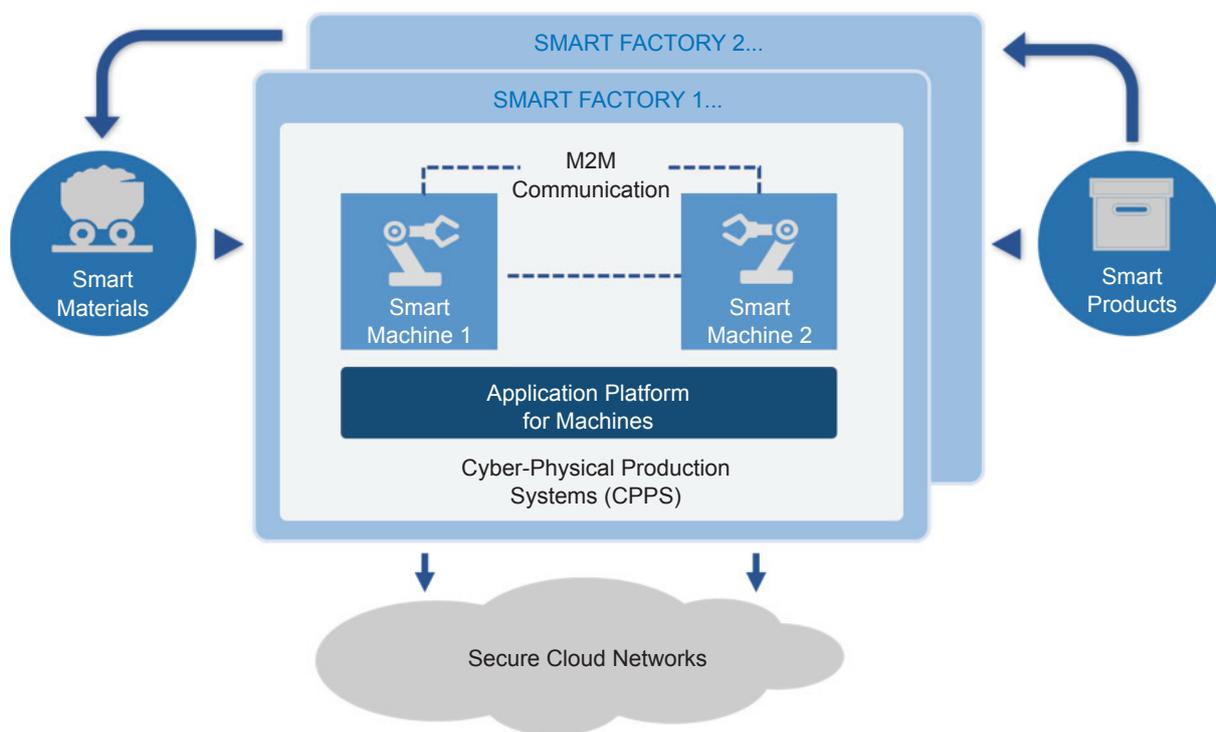


圖 2. 工業 4.0 智慧工廠系統關聯 (雲端安全性網路) (MacDougall, 2014)。

四、智慧工廠環境

建置 CPS 於生產系統創造了「智慧工廠」，如圖 2 所示。在智慧工廠內產品、資源和程序具有 CPS 的特性，提供了相較於傳統的生產系統顯著的即時品質、時間、資源和成本優勢。智慧工廠為依據永續性和以服務為基的商業實踐而設計，堅持了適應性 (adaptability)、彈性、自我調適與學習特性、容錯性、以及風險管理^(4,6,7)。

高度自動化為智慧工廠的標準配件，是經由以 CPS 為基生產系統的彈性網路，在很大的程度上實現了生產程序的自動監管。幾乎可以在任何即時狀況下回應的彈性生產系統，使得內部生產程序得以完全地最佳化。生產優勢不受限於單一性的生產條件，而是得以基於多個系統營運商，具適應性、自我組合生產單元的全球網路而優化。

物件和服務聯網使得我們得以創造包含整體製造流程的多個網絡，以轉化工廠成為一個智慧環境^(1,8)。網實生產系統 (cyber-physical production systems, CPPS) 包含了已數位化發展的智慧機器、倉庫系統和生產設施，以及端對端、以資通訊為基礎，從進貨物流到生產、行銷、出貨物流和服務的整合。如此，不但使得生產得以被更彈性的配置，而且可以取得藉由差異性更大的管理和控制程序所提供的機會。

除了對現存的資訊科技為基程序的最佳化外，藉由工業 4.0 也因此甚至會開啟更多其原本無法記錄，而具有全球性規模的差異性細部程序和全面效能追溯的潛力。也會涉及企業夥伴間更緊密的合作，例如，供應商和客戶，以及員工間，提供了互利的機會⁽⁴⁾。在本質上，智慧工廠將會涉及技術整合 CPS 於製造和物流，以及運用物件與服務聯網於工業程序上，影響了價值創造、商業模式、下游服務和工作組織的實質蘊涵。

智慧工廠生產相較傳統的生產與製造兼具眾多的優勢⁽⁴⁾，包含了 CPS 優化之生產程序，智慧工廠單元可以決定和辨識的活動場域，設定選項和生產條件，以及和其它單元獨立和無線溝通；藉由智慧匯編理想生產系統影響產品特性、成本、物流、安全、可靠度、時間、和永續考量的因素，優化個別

客戶的產品製造；節約資源生產以及對勞動力量身訂製的調整，使得機器可以順應人的工作週期。這代表了一個兼具創新和時間成本的節約，以及創造一個由下而上生產價值產生的模式，其網路能量創造出新而更多的市場機會。

1. 語意產品記憶

數位物件記憶的目的為永久記錄實體物件生命週期所有相關活動的資料，而其衍生的不同應用 (圖 3) 提供了工廠內產品得以被唯一的辨識和主動要求資源的基礎。嵌入數位記憶於產品，可達到便於讀取／解讀環境條件與使用者活動，使得產品可以控制環境、和其他智慧物件與使用者溝通其活動記錄資料 (life log data)⁽⁹⁾。嵌入式系統可以包含微處理器、記憶體、微感測器、GPS 和無線傳輸，及自有的電源供應等⁽¹⁰⁾。亦可直接採用簡單的 RFID 標記於產品上，而經由互聯網存取所有相關資料於產品外⁽¹¹⁾。

網路世界連結的發展從電腦與電腦間資訊設備的連結，到網頁與網頁間資料的連結、演化到信息與信息間語意的連結，但是皆為數位世界物件與信息的連結。物聯網的發展將實體的人和機器以及實體活動也都於網路連結，語意網延續於工業／產業端實體環境的智慧應用。語意產品記憶使得產品可以主動和環境溝通，取得其所要的資源和服務。

語意記憶可提供生產者⁽¹²⁾ 有效率的生產和運籌、可調適性的製造、有效率的供應鏈管理、使大量客製化變為可能、簡化機器人的處理活動和支持程序探勘。語意記憶同時也允許了消費者得以取得廣泛的消費者資訊、額外的產品功能、智慧使用者互動、增值服務、自我解讀能力、個人化產品和故事陳述經驗。

2. 服務導向架構 (SOA)

在智慧工廠內，系統會被製造相關的參與者與資源間新層次的社會科技互動所表述，這會環繞在一個包含了自主、回應不同狀況自我控制、自我配置、知識為基、廣泛配置感測器、以及能合併相關製造和管理系統的製造資源網路 (製造機具、機器人、輸送帶與倉庫系統，以及生產設施)。智慧



圖 3. 數位物件記憶分類。

產品被唯一的辨識以及被持續的定位，即使是在製造過程，他們亦可知道他們製造程序的細節。換言之，智慧產品可以半自動化的控制生產的個別階段，完成的成品可以知道本身功能，以及得以最佳化執行的參數，並可以在其生命週期察覺磨耗和破損的信號，這些資訊可被匯集以優化智慧工廠之物流、配置和維修，以及和商業管理應用整合。

Wahlster⁽¹²⁾ 提供了在一個 CPPS 的環境中生產的案例，具語意產品記憶的智慧產品擬以低碳模式加工。具有唯一辨識碼的加工產品在置入載具後，主動和智慧工廠生產系統溝通，依其低碳加工之要求自動取得加工路徑規劃。產品依路徑所定義的加

工順序要求如組裝、NC 加工等加工資源的服務，資源和資源間則視進度、整體工廠生產需求、人員物料的可用性等，以機器對機器 (M2M) 的方式主動彼此溝通、協調逐步完成工作。在此模式下，產品和生產的語意和工廠特有的機具設備獨立，如圖 4 所示，工廠的生產即可以一服務導向的方式執行。

此分散式自主能力在工廠物流倉庫亦可被有效的採用。包括亞馬遜在內的多的公司大量採用無人自動搬運車 (AGV) 來提升倉庫運作的效能，頻繁的貨品進出流通、工作延誤、設備故障造成了交通及其它工作的瓶頸，因此也降低了倉庫的效能。德

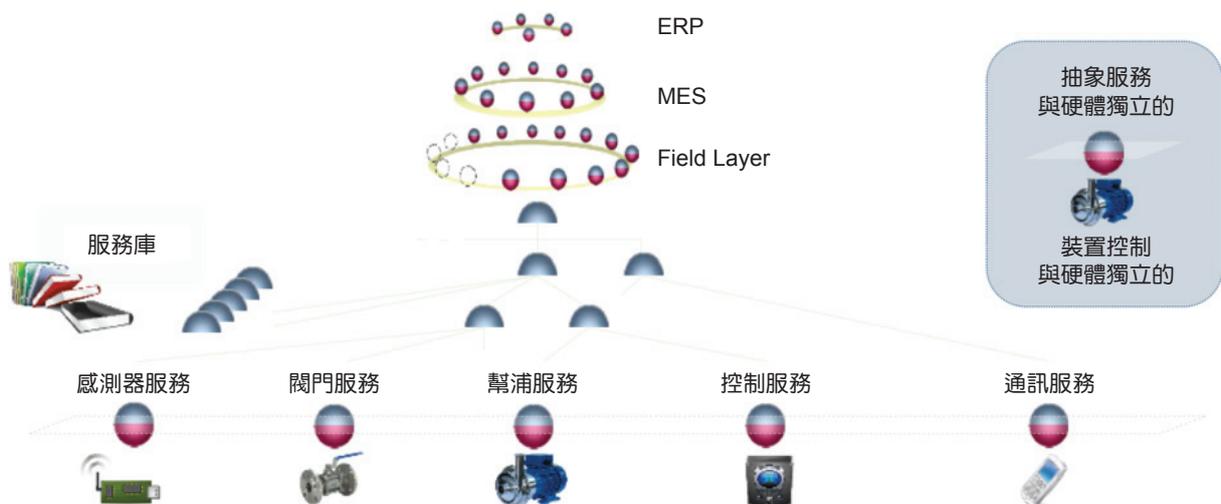


圖 4. 基於 IOT 和 IOS 與硬體獨立的服務導向工廠系統規劃 (Wolfgang Wahlster)。

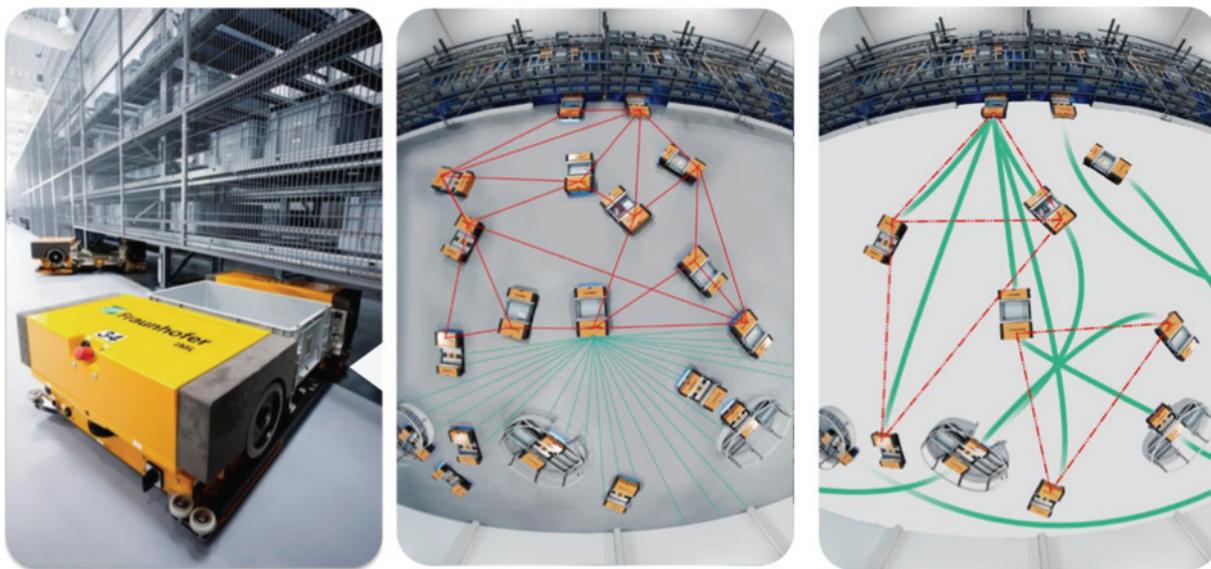


圖 5. 德國 Fraunhofer IML 無人自動搬運車於開放空間分散式自主協調取送貨工作 (Fraunhofer IML)。

國 Fraunhofer 物流與運籌中心 (Fraunhofer IML) 即展示了無人 AGV 在開放空間分散式自主協調取貨和送貨路徑的功能，如圖 5 所示。在德國漢堡港的貨櫃碼頭，亦由多個無人 AGV 於貨船與貨櫃堆疊場分散式主動的協週貨櫃搬運路徑。

未來在智慧工廠此種彈性和效率提升的生產模式之下，將得以併入個別客戶和特定功能至設計、配置、訂購、作業和回收階段。甚至得以在製造之前與之際，及作業時，立即接受臨時變更，使得企業得以生產單一物件與極小批量並獲利。

五、工業互聯網

和工業 4.0 相關的為以美國為主的工業互聯網 (Industrial Internet)，也可被視為具特定目標的工業物聯網 (Industrial Internet of Things)，其主要支持的組織為工業互聯網聯盟 (Industrial Internet Consortium, IIC)。工業互聯網為一名詞描述物件、機器、電腦和人的聯網，促成了智慧產業作業得以採用先進資料分析以改造企業成果 (效果／成效／產出)⁽¹³⁾。工業互聯網專注的目標為資產管理，和工業 4.0 專注的製造最佳化有所差異，但其核心技術皆為具網實整合效能的物聯網或是 CPS

系統，其對智慧工廠的助益則具互補性。

驅動工業互聯網解決方案的第一個重大因素為整合與改善水平和垂直價值鏈，將其於價值鏈上關鍵企業流程數位化即可產生重大的收益。維修成本為製造或生產工廠整體作業成本的主要部分之一，根據產業的差別，維修成本可佔產品生產成本 (cost of goods produced) 的 15% 至 60%⁽¹⁴⁾，降低此比例對獲利可產生重大的影響。此外，不良的維修將會導致經常性的故障和不必要的干預而將設備的生產力減半。預測性維修的導入即為致力於面對此二項挑戰，藉由狀態監控系統的使用來預警設備故障，而改善了傳統回應性維修或是預防性維修在效能和成本上的缺失。

預測性維修可以提供資產優化和產品品質，利用資料分析預測何時和為何資產即將要故障，以及判斷零件或產品為異常，可提供組織許多的獲益。此外，預測資產失效對組織具有極大的長期價值，這些助益包含優化維修期間、將規劃外停機時間降至最低、深層解讀故障的根本原因分析、強化設備和程序的診斷能力、決定最佳修正措施程序等。將感測器和預測性維修技術整合，可以進一步防止不必要的設備替換、節省成本，以及改善程序安全、可用性和效率⁽¹⁵⁾。

表 1. 工業 4.0 和工業互聯網的比較。

	工業 4.0	工業互聯網
關鍵利益相關者	政府、學術界、企業	企業、學術界、政府
革命的分類	四次革命	三次革命
支持平台	政府工業政策	開放會員非營利聯盟
重點行業	工業	製造、能源、運輸、醫療、公用事業、城市、農業
技術專注	供應鏈協調、嵌入式系統、自動化、機器人	裝置溝通、資料流、裝置控制和整合、預測性分析、工業自動化
企業專注	中小企業 SMEs	各種大小的公司
最佳化專注	生產最佳化	資產最佳化

除了靜態分析⁽¹⁶⁾，由於工業互聯網所提供的大量可用資料，大數據分析、機器學習也顯示了其所提供解決方案效能的逐漸提升。例如，多重分類機器學習方法，允許動態決策規則可採用於維修管理，以及可用於高維度和管制 (censored) 資料問題⁽¹⁷⁾。其它如同類神經網路等的機器學習工具亦被採用於建預測性維修功能，例如，整合類神經網路為基工具提供轉動設備預測性維修的決策支援系統⁽¹⁸⁾。

產品的數位化和互聯化為工業互聯網的第二個重要驅動因子。當產品具有聯網的功能後，可成為一個服務或所謂成果經濟的終端設備。波特⁽¹⁹⁾認為連結的產品將全面的改變競爭，他以一個農機設備的案例說明如何轉化設備販售商業模式成為整合服務而產生的成效販售創新模式。成效經濟的基本理念在設備／產品使用者購買產品的目的為其所需達到的成效，而非單純為該硬體設備本身之功能。農機設備製造商將原本單純的機械設備加上軟體功能後成為智慧設備，再加上聯網功能成聯網智慧設備，如此可進一步建立先前所提智慧工廠或是網實整合系統的功能。透過網路世界所提供的資訊和連結，該聯網農機設備所能提供的將為一農機設備系統，和其它農耕機具溝通、協調，有效的共同達成農耕工作。

Michael Porter 進一步闡述有效的操作或是運作農機設備並非農耕活動的最終的目的，農耕產出成效才為其終極目標。為了要提升成效，除了設備的完備性和運作的效率性外，農田灌溉、種苗知識、氣候預測等皆需系統化的結合，這些相

關系統的結合形成了一個系統的系統 (system of systems)。農機設備製造商除了提供農機設備的工作溝通、協調能力外，其得以進一步的整合影響農耕產出成效的相關系統，藉由其聯網產品發展出一個以專注於成效的商業模式。

成效經濟的潛在衝擊不僅限在設備製造商，智慧工廠內資產的管理和運用，亦可充分採用工業互聯網或是成效經濟的模式，不但可降低成本，並可產生更優化的效能。許多消費者產品的目的亦不在於其本身的功能，而在其所能提供的成效。例如，空調設備的目的為提供良好的室內空氣品質而不僅是設備的各種功能，必須將設備操作和運行條件，以及環境動態變因納入系統性的考量，才得以建立一個具成效的空氣品質服務系統。分享式經濟 (shared economy) 中的 Airbnb，以及分享式行動力 (shared mobility) 的代表 uber、zipcar、car2go 等，皆是藉由將產品聯網後，整合相關系統提供一個有效解決暫宿和行動力的創新服務。Agency of Design 的 LED 燈分離和聯網設計以及其替換服務流程的整合，亦是提供循環經濟概念下強化整體效能的優良案例。未來產品設計必須考量產品的聯網化，亦必須考量如何整合相關系統以確保達成產品擬提供的成效。

工業互聯網聯盟收集了工業互聯網對市場衝擊的意見⁽¹³⁾，通用電氣預估將會於未來 20 年間增加 100 到 150 兆美金的全球 GDP，Gartner 預估數位化企業和生活在 2020 年前將取代三分之一的知識勞動力，McKinsey 預估在 2025 年前將有 27 到 62

兆的年度經濟影響。功效在於作業成本的降低、作業效率的提升、減少浪費，和人員與設備生產力的提升。工業互聯網會改造許多產業⁽²⁰⁾，包含製造、油氣、農、礦、運輸和健康照護等產業。整體而言，這些產業代表了大約三分之二的全球經濟，在社會向整合數位勞動力方向演進，工業互聯網會重新定義即將被創造的新型態職位，以及將重新塑造工作的本質。

六、數位製造

在 2016 年美國國家科技委員會的先進製造 (Advanced Manufacturing) 報告書⁽²¹⁾ 中提到，數位製造為使用一整合、電腦為基的系統，包含了模擬、3D 視覺化、分析及不同的協同合作工具，用以同時創造產品和製造程序的定義。設計創新可運用此類技術、工具和產品來重新想像端到端的整體製造程序。數位線索 (thread) 或是數位孿生 (digital twin) 為描述利用先進模型／模擬工具將現實環境的數位模型快速而有效的進行分析，成果可用於生命週期各階段設計驗證、修改和執行實體作業的具體依據。企業全面使用數位線索可以使得高度整合的複雜產品設計和製造得以降低時間和成本，以及加速新產品上市的步伐。

數位製造可進一步定義為一個由虛擬實境、電腦網路、多媒體、快速成型等技術，支援快速成型或模擬產品的資訊和資料庫分析，以滿足客戶需求

的製造程序⁽²²⁾。數位製造支援了多種的日常的作業活動，從設計產品到執行製造⁽²³⁾。數位製造逐漸發展為不僅專注於產品發展生命週期，且包含其使用環境。數位原型／製造可改善製造商生產產品的速度和精確性，以及降低的成本和時間而具有巨大的潛力⁽²⁴⁾。從位於美國芝加哥的數位製造與設計創新中心 (DMDII) 所專注的領域與委託進行的研究亦可以一窺數位製造的方向與關切的研發課題，如圖六所示。

過去同步工程主要專注在強調產品設計階段考慮因素的全面性⁽²⁵⁾，特別在產品設計初始之際即同時考慮產品生命週期的各種需求，故可視為於產品設計時其它階段程序的同步設計。數位製造概念的應用將會促使產品、程序、工廠和資源資訊可被關聯、查看和經過變革程序，以通盤處理方法進行產品設計^(26, 27)。數位製造中藉由數位線索的模擬結果可以協助藉由虛擬的驗證自動化程式而降低驗證成本，更快的產生工廠模型並可在生產開始前確保最佳配置、物流和產出量的作業。

為促成數位製造在製造環境的實踐，其基礎在於其由資訊和系統工程所構成的系統。其次，數位製造作業最佳化為下一個目標以改善其所擁有的效益。數位製造系統為先進製造得以實現的基礎；反之，現代化製造系統亦可於數位製造系統的基礎上實現。因此，必須要預先釐清數位製造系統的作業範疇，才得以進行數位製造系統的研究，以及建構其整合模式系統。



圖 6. 位於美國芝加哥的數位製造與設計創新中心 (DMDII) 的初期研發課題。

七、智慧工廠與工業 4.0 的挑戰

智慧工廠所面對的挑戰有多個層面，核心 CPS 的成效除了各項技術整合的優越性外，必須有更多完整的設備和更多系統和服務的整合。首先，連結的物聯網裝置並非即插即用，製造商將需要建構一個新技術層以和傳統系統整合。智慧工廠製造基礎設施將需要實體與技術改進，包含將智慧閘道器整合入傳統設備、控制系統和資產，以收集、合併和分析設備資料，而不需完全重新開始；整合大數據和分析技術以提供端至端，設備、產品、供應鏈資料的整體觀點；以及確保從終端到核心（資料中心和雲端）的資料、網路和企業應用的安全，從一個多面向的安全方法，採用身分辨識、存取和使用者管理、加密、分析和網路安全等工具。

為了經由價值網路促成公司間網絡化和整合，適當的標準需要被發展，標準化努力必須專注於合作機制與擬交換的資訊，為適用於夥伴公司產品和服務一般性的模型或稱參考架構。如果 CPS 要廣泛的被採用，必須要建構一個相較於現有通訊網路足以顯著提升資料交換量和品質的基礎設施，以保證延遲時間、可靠度、服務水準和無所不在的頻寬。因為持續增加的功能、產品客製化、和動態交貨需求、整合不同技術領域和組織，以及快速改變不同的合作方式，產品和他們相關的製造系統逐漸變為越來越複雜，模式化可以為管理這種複雜度的一個促能因素 (enabler)。

在工業 4.0 下的智慧工廠，必定必須對人身安全和系統安全採用整體方式，考慮系統安全對策 (加密程序或認證程序) 對人身安全 (時間關鍵功能和資源可提供性) 的影響及反向的影響 (如一子系統特定關鍵安全功能是否增加了網路攻擊的風險?)。現存工廠將必須升級，需滿足人身安全與系統安全措施的要求。其次，新工廠和機具設備必須要開發，使得第三次到第四次工業革命應用儘量平順，且應被以一可以被所有利害相關者清楚了解的方式。和智慧工廠相關的製造程序可能和現有的規章制度相抵觸，技術的合法性或是其安全責任 (liability) 以及資料保護議題若不被解決，可能會造成低接受度。反之，若智慧工廠或 CPS 有如所

描述般功能，現有的法規系統的規範力應是非常低，也造成極大的風險。

八、結論

在本文中對智慧工廠的相關概念進行了較廣泛的介紹，然而，由於主題所牽涉的技術、應用和相關議題廣泛且部分仍為未來願景，不同國家和不同領域專家對諸多名稱的定義並未達成共識，閱讀本文時若依同一架構思考，較容易建立此眾多議題的關聯性。但是亦需要不斷的根據智慧工廠的實際發展，擴充、調整或修改相關內容。智慧工廠的核心工業 4.0 或是網實整合尚於發展階段，發展重點將如前所述於軟體及整合，而其未來可實現的程度尚有眾多非技術因素的影響。而智慧工廠所建立的網實整合的模式，其影響將遠超過工廠的藩籬。此外，智慧工廠的發展不是單純為技術的精進，而是為了因應未來新市場環境下提升生產力的需求，無論任何架構或系統的發展都必須掌握此重心。和智慧工廠發展亦步亦趨的第四次工業革命是對產業的挑戰，但若掌握發展的核心，培育適當的人才，以及長期的推動研發，也可將其轉化為一個產業改變其競爭態勢的機會。

參考文獻

1. Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., and Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Germany: Forschungsunion.
2. 行政院. (2015). 行政院生產力 4.0 發展方案.
3. Schlaepfer, R.C., Koch, M., and Merkofer, P. (2014). *Industry 4.0 Challenges and Solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. Zurich, Switzerland: Deloitte in Switzerland.
4. MacDougall, W. (2014). *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future*. Germany Trade & Invest.
5. Hellinger, A. and Seeger, H. (2011). *Cyber-Physical Systems. Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*. Acatech Position Paper, National Academy of Science and Engineering.
6. Shrouf, F., Ordieres, J., and Miragliotta, G. (2014). *Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy*

- management approached in production based on the Internet of Things paradigm. in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*.
7. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., and Hoffmann, M., *Industry 4.0*. Business & Information Systems Engineering, **6** (4): 239 (2014).
 8. Vermesan, O. and Friess, P. (2014). *Internet of things-from research and innovation to market deployment*. River Publishers Aalborg.
 9. Wahlster, W. (2013). *The Semantic Product Memory: An Interactive Black Box for Smart Objects*.
 10. Brandherm, B., Hauptert, J., Kroner, A., Schmitz, M., and Lehmann, F., *Demo Authorized Access on and Interaction With Digital Product Memories*. IEEE (2010).
 11. Seitz, C., Legat, C., and Neidig, J. (2010). *Embedding Semantic Product Memories in the Web of Things*.
 12. Wahlster, W., *SemProM Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London (2013).
 13. IIC., *Industrial Internet Consortium, Fact Sheet* (2015).
 14. Mobley, R.K., *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann (2002).
 15. Hashemian, H.M. and Bean, W.C.. *State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **60** (10), 3480 (2011).
 16. Patil, S. and Gaikwad, J., *Vibration analysis of electrical rotating machines using FFT: A method of predictive maintenance. in Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 2013 Fourth International Conference on*. IEEE (2013).
 17. Susto, G.A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., and Beghi, A., *Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, **11** (3), 812 (2015).
 18. Wu, S.-j., Gebrael, N., Lawley, M.A., and Yih, Y.. *A neural network integrated decision support system for condition-based optimal predictive maintenance policy*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, **37** (2), 226 (2007).
 19. Porter, M.E. and Heppelmann, J.E. *How smart, connected products are transforming competition*. Harvard Business Review, **92** (11), 64 (2014).
 20. O'Halloran, D. and Kvochko, E., *Industrial Internet of Things: Unleashing the Potential of Connected Products and Services. in World Economic Forum* (2015).
 21. NSTC., *ADVANCED MANUFACTURING: A Snapshot of Priority Technology Areas Across the Federal Government*. Washington DC, USA: National Science and Technology Council United States of America (2016).
 22. Zhou, Z., Xie, S.S., and Chen, D., *Fundamentals of digital manufacturing science*. Springer Science & Business Media (2011).
 23. Wang, L. and Nee, A.Y.C., *Collaborative design and planning for digital manufacturing*. Springer (2009).
 24. Jin, Y.P., Ding, M., Yu, J., and Xiang, C., *Present State & Perspectives of Rapid Prototyping and Manufacturing Technology. in Advanced Materials Research*. Trans Tech Publ (2011).
 25. Zhou, Z., *Digital synergy and network interactive design technology* (2004).
 26. Siemens, P.S. *Digital Manufacturing*, 2016 https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/digital-manufacturing.shtml.
 27. ADA. *Benefits of Digital Manufacturing*, 2013 <http://adacomputers.ro/en/benefits-of-digital-manufacturing>.



周碩彥先生為美國密西根大學工業與作業工程博士，現任國立台灣科技大學工業管理系特聘教授兼物聯網創新中心主任。

Shuo-Yan Chou received his Ph.D. from the Department of Industrial and Operations Engineering at University of Michigan, Ann Arbor. He is currently a distinguished professor in the Department of Industrial Management at National University of Science and Technology and the director of the Center for Internet of Things Innovation.



Mr. Anindhita Dewabharata 現為國立台灣科技大學工業管理系博士班學生。

Anindhita Dewabharata is currently a Ph.D. student in the Department of Industrial Management at National Taiwan University of Science and Technology.