

人機協作對於職場安全的影響及挑戰

高雄科技大學環境與安全衛生工程系副教授 許宏德



壹、前言

英文的人造人 (robot) 一語源自捷克語的強制勞動 - robota。捷克的作家 Karel Čapek 於 1920 年發表的戲曲「羅薩姆的萬能人造人 (Rossum's Universal Robots : R.U.R.)」中創造出 robot 這個字，現在則用來泛指「機器人」。

根據國際標準 ISO 10218-1 (2011) 對工業用機器人的定義，(工業用) 機器人為「用於產業自動化，固定位置或可移動之 3 軸或以上程式化或可再程式的自動控制多用途操

作機 (機械臂)」(automatically controlled, reprogrammable multipurpose manipulator, programmable in three or more axes, which may be either fixed in place or mobile for use in industrial automation application)。另一方面，日本經濟產業省「機器人政策研究會」於 2005 年發表的中間報告則將機器人的定義擴大為「具有感測器、智能控制系、驅動系 3 個要素的技術之智能化機械系統」。

自從 1980 年代，工業用機器人被導入到汽車等的生產線以來，到 2019 年為止全世界設置的工業用機器人的臺數已達 272.2 萬臺。近年來各工業先進國為因應少子化所造成的勞動人力低減，更出現了協作機器人 (Collaborative Robot = Cobots)。但是，協作機器人對於職場的安全有何影響？其安全應如何確保？是個值得關心的議題！

二、機械及機器人之危害

機械乃利用各種相對運動的機件，構成機構。由外部輸入的能量經機構的轉換，就能對外做功，以加工物料或提供服務。由於機械的運轉需要能量，機械上又有各種轉換能量的機構，當然機械上便無可避免的，會有各種型態的大小能量在運作著。當超過人體容許值的能量洩漏（傳達）到人的身上，便會對人體造成傷害，甚至導致死亡事故（如圖 1）。也就是說，在機械上運作的能量就是危害源。因此，避免上述事故發生的關鍵就在於如何防止潛在的危害源作用於人員身上。



圖 1 作用於人員的危害源

依據國際標準 ISO 12100-1 (2010)，機械上的危害包括有：(1) 機械性危害、(2) 電氣危害、(3) 異常溫度危害、(4) 噪音危害、(5) 振動危害、(6) 游離和非游離輻射的危害、(7) 使用材料或物質所引起的危害、(8) 人體工學相關的危害、(9) 與機械使用之環境相關的危害、(10) 複合性危害等各種不同類型的危害源。

工業用機器人的本體為機構及驅動器組成的機械臂 (manipulator)。機械臂的型式一般可分為：(1) 多關節型（如圖 2）、(2) 史卡拉型 (SCARA = selective compliance assembly robot arm)、(3) 並聯型 (parallel link robot)、(4) 直交型。機械臂經由控制器的自動化控制做複雜的動作，其前端通常裝設有配合功能需求的作用器 (end effector)，如吸盤、夾爪等。

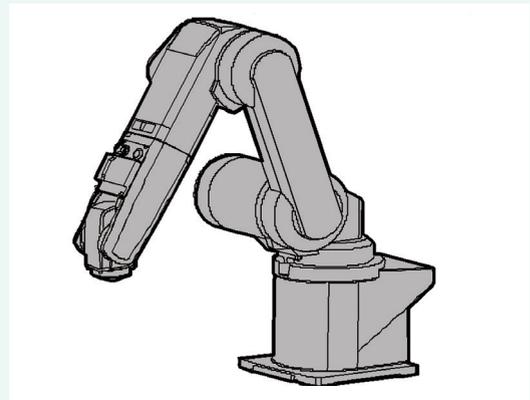


圖 2 多關節機器人之一例

由其功能及運作模式可知，工業用機器人的主要危害為機械性危害。也就是起因於動能、銳利端部以及剪力作用等的撞擊 (impact)、擠壓 (crushing)、切割 (cutting or severing) 以及剪 (shearing)、夾 (trapping) 等型態的危害。此外，

因使用電能，或焊接、噴漆等用途上的需求也可能有電氣、灼傷、有機物等的危害。

目前的協作機器人的構造，基本上和工業用機器人並無太大的不同，以多關節型為主。

圖 3 為人機作業系統中的危害源與災害發生之過程。當作業人員與能量的運作在空間上或時間上有重疊時，也就是人員暴露於危害源時，既為危險狀態。如果沒有保護方策，或防護不足，則危險狀態即可能會進一步演變為「危險事象」。這時人員已陷入危險之中，如果迴避失敗就會發生災害。

三、人機作業系統之安全

我國的職業安全衛生法於修法時新訂了第 5 條，將確保作業安全的責任大幅的由雇主轉而要求設計者、製造者以及供應者（含輸入者）。這和歐盟在其「機械指令」(MACHINERY DIRECTIVE) 揭櫫對機械安全的理念「機械部門是工程產業重要的一部分。來自於以使用機械為直接原因所造成的災害之社會成本，多數可以透過機械本質安全的設計、製造以及適切的設置和維修保養而降低。」是一致的。換言之，就是以源頭管制的理念來降低使用機械時的風險。



圖 3 人機作業系統之危害源與危險事象 (日本中央勞動災害防止協會)

因為工廠的智慧化造成生產系統的黑盒子化，使得使用者難以認知危害，更難以掌握其危害特性。要求機械設備的使用端（含事業主/雇主）於採購機械後對作業時的危害進行消除或風險的低減等安全改善，其效果是非常有限的。尤其是自動化的強化與深化使得作業人員不再需要高度的專業知識，如此的情況下要求使用者自己注意安全恐怕很難有效果。

國際標準 ISO 12100 也將降低機械設備風險的要求置於製造者（設計者）。由製造者於設計階段進行風險評估，並依其結果藉由本質安全設計等 3 步驟 (three step) 的方策將風險降至可接受的程度，同時透過安全相關資訊的提供，讓使用者可以採取適當的措施以降低殘餘風險（如圖 4 所示）。也就是說，只要依循這項安全標準即不難落實職業安全衛生法第 5 條的規定，有效降低使用機械設備的風險。

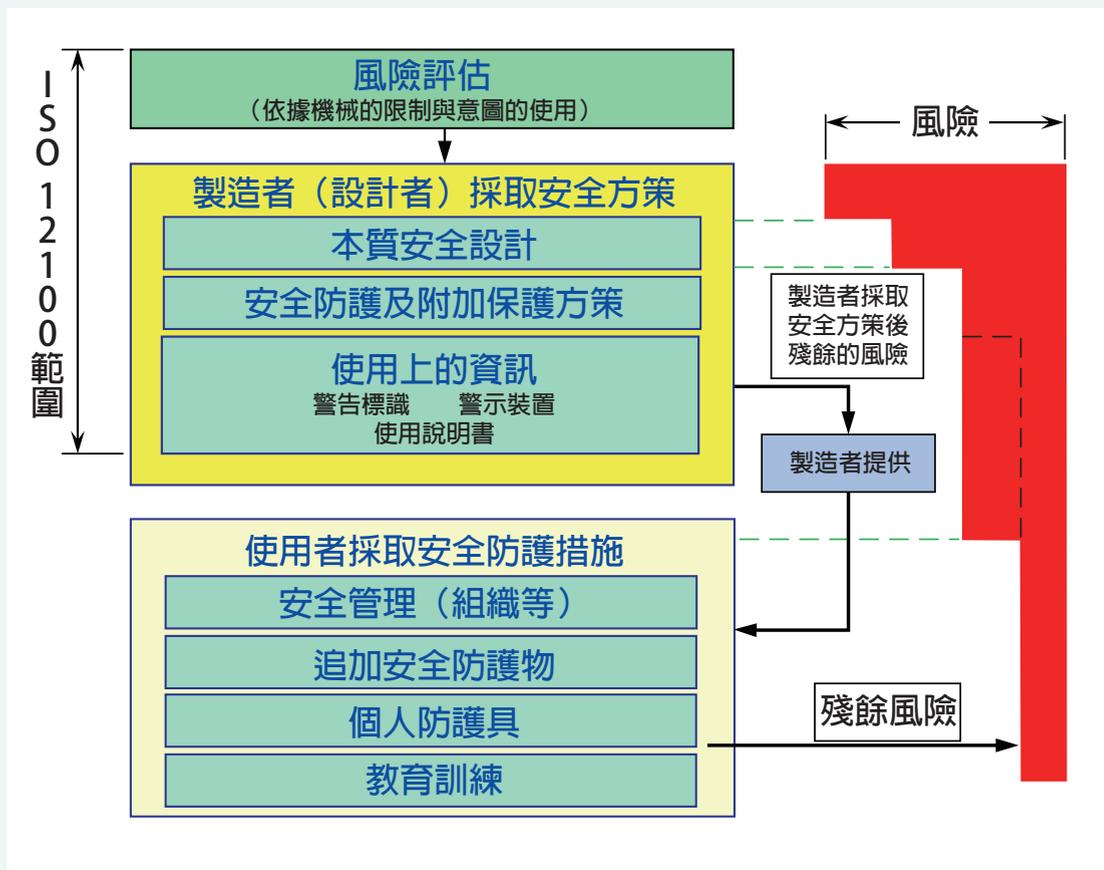


圖 4 安全防護方策與風險之低減

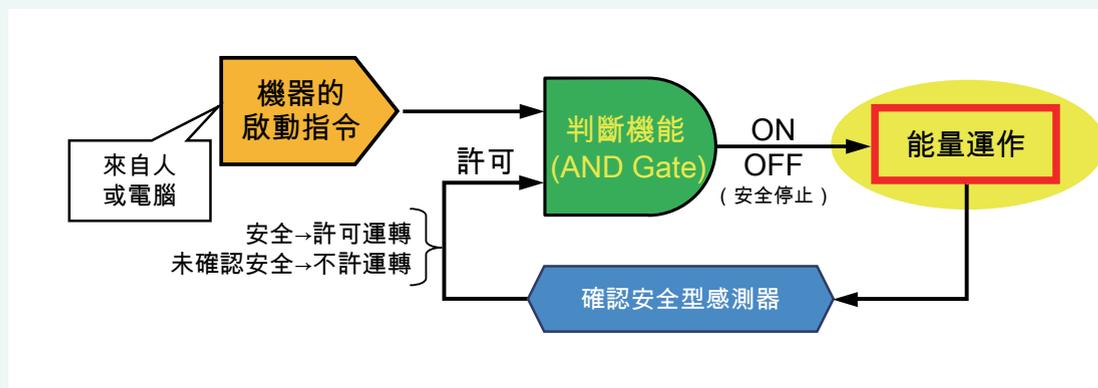


圖 5 確認安全型互鎖機制的構造

本質安全設計是指「不使用護罩或保護裝置（指裝設於機械上，可單獨或與護罩結合使用以降低風險的裝置，如光柵、雙手操作裝置等）而以變更設計來改變機械特性，消除危害源而達到保護目的之方案與策略」。具體的做法包括消除銳角、銳邊；對可能會夾傷的機械部位縮小至身體任何部位都無法進入的程度，或者加寬至不會夾傷的程度；將動能或驅動力降低至被撞擊時不會傷害到身體的程度等方策。

但是，本質安全設計有其困難時，就必須以護罩或安全裝置等方法實施安全防護措施。護罩之原理為隔離人員與危害源，也就是不使作業人員與危害源在空間上重疊。另一方面，安全裝置則是用於確認作業人員是否陷入或即將陷入危險狀態，並在無法確認安全時發出安全控制訊號，停止能量的運作。換言之，即避免人員與危害源在時間上重疊。前者為「隔離的原則」，後者為「停止的原則」，這兩個原則必須至少有一個成立，才能確保人員的安全。安全控制原則上應獨立於一般運轉的基本控制，且其控制位階必須高於一般運轉的基本控制。

這個安全控制機能稱為「互鎖 (Interlock) 控制」。

圖 5 為「確認安全型」互鎖機制的構造。除來自作業人員或電腦的啟動指令之外，還必須由確認安全型的感測器確認人員的安全，並經由判斷機能 (AND Gate) 的邏輯演算判定為 "1"，能量才被允許運作。如果確認安全型的感測器沒有發出安全訊號並傳到判斷機能，或輸入到判斷機能的訊號不是安全訊號，則能量均不可運作（停止原則成立）。安全感測器可以用來確認作業人員不在能量運作空間，或確認可動式護罩已被關上（隔離原則成立）。

這裡所謂的「確認安全型互鎖機制」主要關鍵在於確認安全型感測器以及判斷機能的「失效安全」(fail safe) 特性。這個特性會讓安全系統在無法確認安全（例如故障）時將能量運作停止（安全停止），以保障在安全機能失效時互鎖機制的成立。反之，如果安全感測器（保護裝置）不是「確認安全型」而是「檢出危險型」的話，那麼在其本身失效（故障等）的時候即無法將危險告知判斷機能，此時判斷機能會因

為判定為沒有危險而允許能量的運作。換言之，「檢出危險型」不具「失效安全」特性，因此可能因其本身的故障而造成災害的發生。

四、協作機器人之作業安全

不同於工業用機器人適用於大規模、專用生產線以及大量生產的需求，協作機器人通常用於多樣少量 (high-mix, low-volume) 或變種變量的生產型態 (Flexible manufacturing)。臺灣和日本類似，中小企業仍為製造業等產業的主幹，這些中小規模的工廠對多樣少量及變種變量的生產型態之對應需求相當的高，但面對少子化所造成的勞動人口的降低卻更顯得無力。基於這些理由，使得日本對協作機器人有了相當高的需求。根據日本相關研究單位的調查與預測，全世界協作機器人在 2030 年的銷售量將是 2019 年的 3.5 倍。

前面對工業用機器人的危害及安全確保進行探討，工業用機器人通常以圍籬或柵欄將機器人隔離，再加上互鎖控制的開口部以避免人員陷入危險狀態（如圖 6 所示）。但是，這樣的

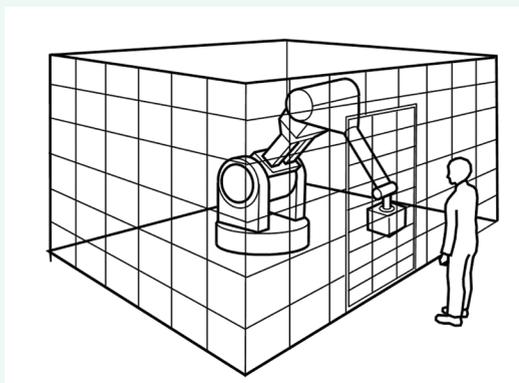


圖 6 圍籬與互鎖控制的開口部

防護措施使得作業人員與機器人無法在同一個空間作業，人機協同作業難以進行。也就是原來以「隔離的原則」以確保安全的方法，將無法適用於協作機器人。

為實現人機協同作業，必須在不損及安全的情況下撤掉圍籬。日本在 2013 年修訂其「勞動安全衛生規則」，在法規上對協作機器人做了安全上的規範，並允許符合安全規範的協作機器人，在確認風險得到控制的情況下可以其他防護措施取代圍籬（如圖 7）。另外，國際標準組織還訂定了 ISO/TS 15066，對協作機器人做了技術上的規範 (TS: Technical Specification)。我國也於 2018 年修訂「工業用機器人危害預防標準」以及公告「協同作業機器人作業安全評估要點」，並編印實施的參考手冊，以規範雇主使用協作機器人的安全措施。工業用機器人與協作機器人的差異如表 1 所示。

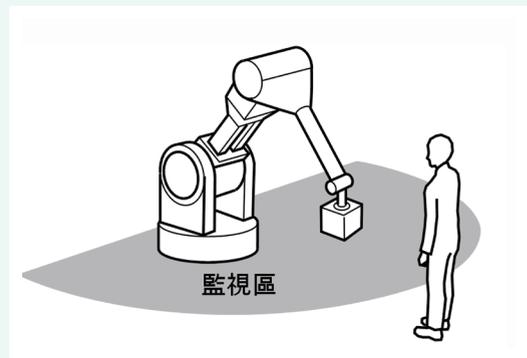


圖 7 以監視區域取代圍籬

我國的「工業用機器人危害預防標準」和日本的「勞動安全衛生規則」均規定協作機器人必須符合 ISO 10218(2011) 系列的規範。另外，日本還要求協作機器人碰觸到人員的力量以及

表 1 工業用機器人與協作機器人的差異		
	工業用機器人	協作機器人
作業內容	以代替人力的單純作業為主 (機器人單體即完結的作業)	可對應彈性作業 (當人的幫手可與作業人員一起進行作業)
設置場所	以大型生產線為主 須設置圍籬	不須圍籬 設置地不拘
尺寸	大型重量	小型輕量
控制	位置控制	位置控制 + 力量控制
對象物	以同類型大量生產為主 多為重複性單純作業	可彈性對應多樣少量或細膩作業

動能必須低於 ISO/TS 15066 的規定值。

對於協作機器人系統，ISO/TS 15066 將共通的安全方策分為以下 4 項，分別規定其必要的安全性能。這些安全方策可以單獨或配合使用。

1. 安全等級監視停止 (Safety-rated monitor stop): 人員進入協同作業空間 (如圖 7 所示之監視空間) 時，機器人必須停止，但人員離開時即可恢復工作。亦即必須有監視及停止機能。

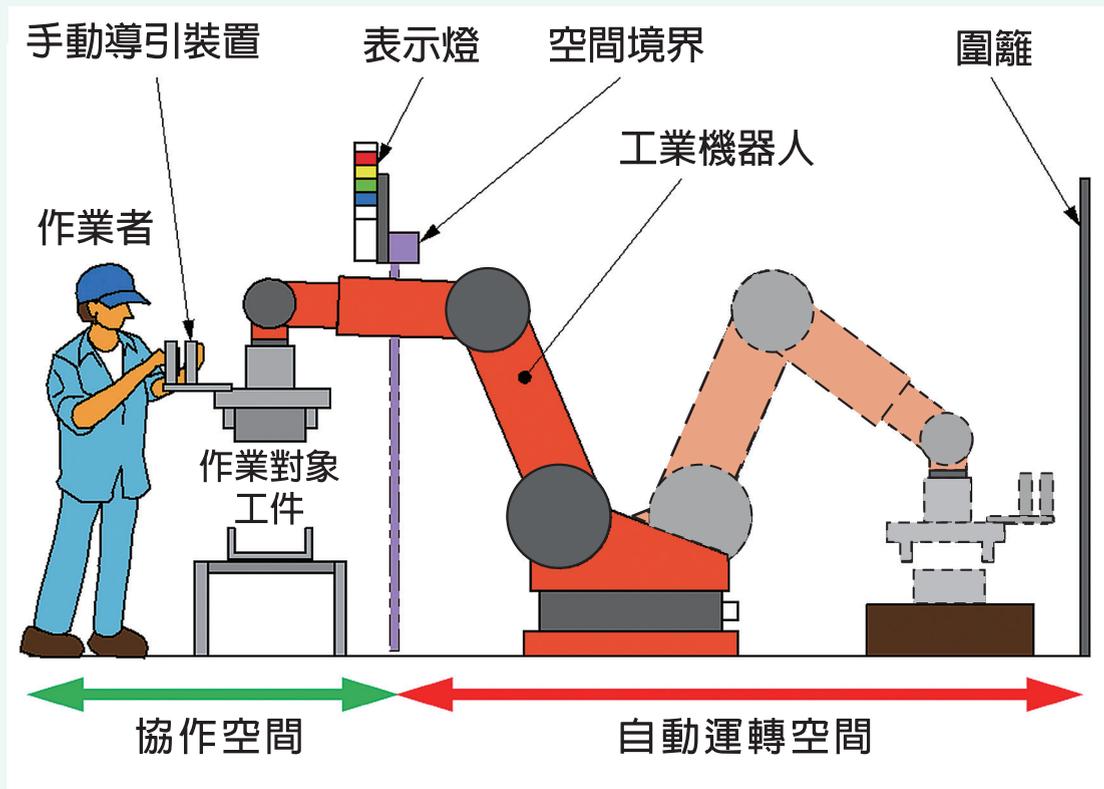


圖 8 手動導引作業模式 (IHI 技報)

2. 手動導引 (Hand guide) : 操作員在安全減速或速度受到監控的情況下直接以手引導機器人 (如圖 8) 。操作器上有「致能裝置」(enabling device) 及緊急停止按鈕。當人員離開協同作業空間時，非協同作業才可開始。
3. 速度及間隔的監控 (Speed and separation monitoring) : 機器人與操作人員的相對速度與距離受到監控，超過基準值時機器人必須停止。
4. 動力和力量的限制 (Power and force limiting) : 基於本質安全設計或藉由控制以限制機器人產生的動力、扭力等，使機器人碰到人員時不會對人員造成傷害。

以上的各個安全方策除基於本質安全設計，限制機器人的動能及力量之外，大多以安全控制的方法實施安全防護。這些安全控制系統大量採用電子式可程式控制來實現其安全機能，因此必須以「機能安全」(Functional safety) 的角度，要求其具有高可靠度。安全控制系統之可靠度的要求必須符合 ISO 13849-1 安全類別 (category) 3，且效能等級 (PL: performance lever) 須為 d，或符合 IEC 62061 安全性能等級 (SIL: safety integrity lever) 2。

五、機器人與服務業之運用

日本鑑於服務業的就業人口占全產業的 7 成，又因高齡少子化的關係，亟須提高勞動生產力，因此於 2015 年的「機器人新戰略」報告書中檢討了機器人用於服務業的發展方向及策略。



圖 9 日本食品機械展的協作機器人

2019 年日本食品機械工業主辦的國際食品工業展「FOOMA JAPAN 2019」就有不少廠商注意到人力短缺的問題而展出了協作機器人。圖 9 是當時展出，用來分裝炸雞塊的協作機器人。

小型的食品廠或許比工廠更適合使用協作機器人。因為這類行業更需要彈性的運用人力，而且是少量多樣的生產型態，通常也不需要大型的動力。但是，因為處理食物的關係，所以也有一些特別的要求，例如手部 (end effector) 必須接近人手，具有柔性又能適當的用力以及適當的摩擦力等。還有關節等的潤滑油不能污染食物，可適當的拆解以利用水清洗等等。



圖 10 日本軟體銀行 (Soft Bank) 的機器人 pepper



圖 11 日本名古屋市政府導入服務客人的機器

以日本軟體銀行 (Soft Bank) 的機器人 pepper 為代表的服務機器人這幾年也受到矚目 (圖 10)。這類機器人被用於招待、導引、搬運、配送等。因為武漢肺炎，已經開始被用於飯店內的配送等。例如用於車站、商場等公共空間，導引高齡者或行動不便的人。圖 11 為日本名古屋市導入於市政府辦公室的導引機器人。圖 12 為日本東京山手線高輪 GateWay 車站的諮詢機器人。

六、普及化面臨的問題

面臨少子化、高齡化的臺灣無可避免的需要借助機器人的幫忙。事實上我國設置的機器人臺數於 2019 年在世界排名第 8 位。在製造業的使用密度 (每百萬員工設置臺數) 也是世界第 8 大，高於世界平均值。但是，協作機器人如果

要更為普及，尤其是讓更多中小企業或服務業使用的話，首先必須要培養多一點的系統整合技術人員 (System Integrator)。

為因應人機協作趨勢及可能引發的危害，職業安全衛生法已經將確保作業安全的責任大幅的由雇主轉而要求機械設備的供應者。現行工業用機器人危害預防標準已規定雇主應使用符合國家標準 CNS 14490 系列、國際標準 ISO 10218 系列或與其同等標準之機器人，無法自供應者（含輸入商）取得合格證明文件者不得使用。又，協同作業機器人作業安全評估要點也規定雇主初次安裝時須與原廠技術人員共同執行。為強化機器人安全，建議參考日本的做法，明確要求製造者及系統整合者應提供技術

文件，以逐步落實源頭管理。

因為機器人系統常因技術複雜化與高度化等原因，對使用者而言恐成為難以掌握其危害的黑盒子，對中小企業也是個很大的負擔。因此，協作機器人之安全性能應由供應者依圖 4 之流程，在設計階段就加以考量，並將風險評估以及降低風險之具體方策等製作成技術文件 (Technical File) 或請驗證機構幫忙驗證並取得型式驗證 (Type-examination Certificate)。

安全是使用高科技產品的前提條件。落實源頭管制，讓供應者與使用者能各自負起該有的安全責任才能享受科技發展的成果。



圖 12 日本山手線車站的諮詢服務機器人