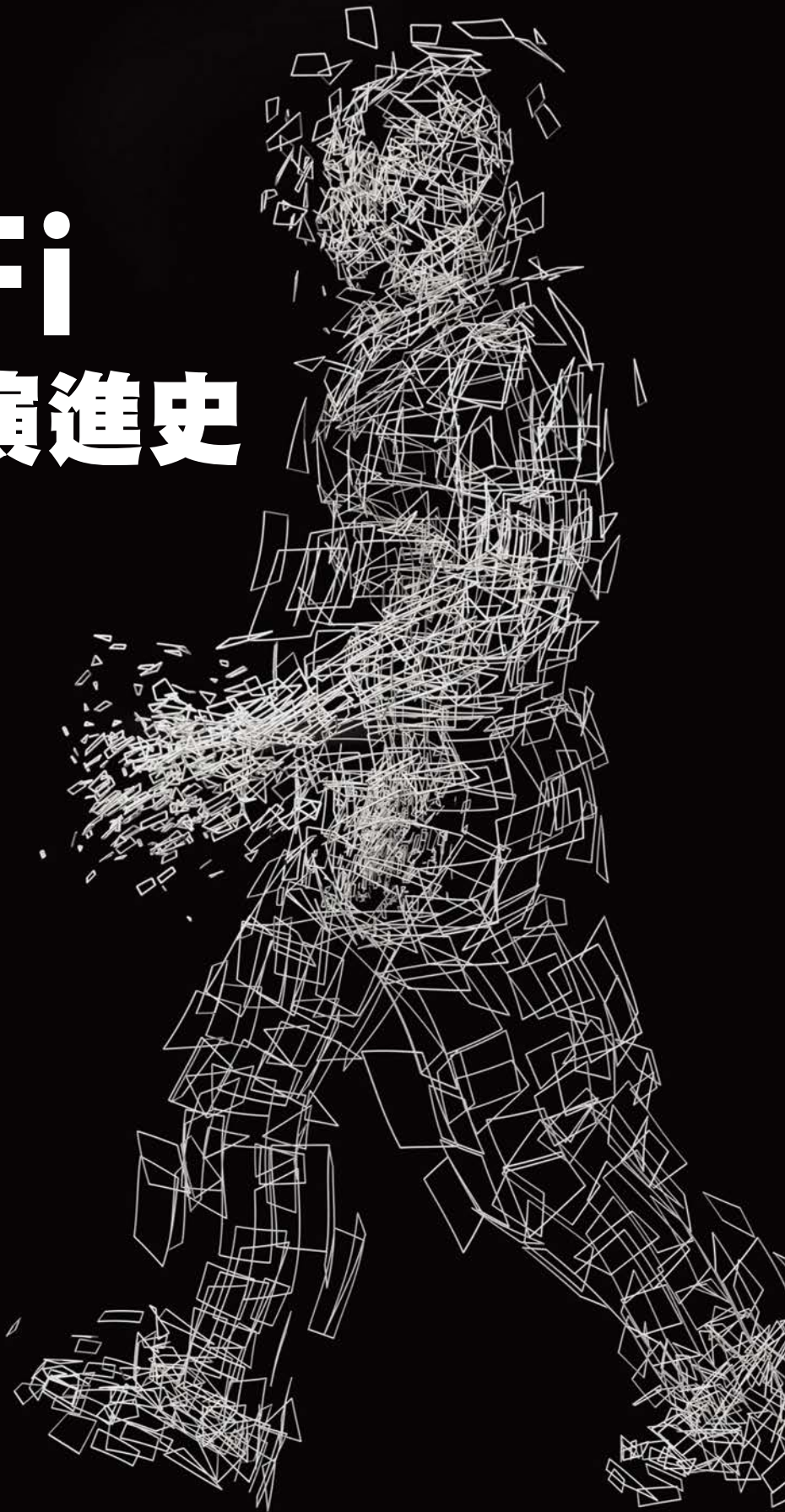




Wi-Fi 感測技術演進史



經過10年的默默無聞，
Wi-Fi感測技術再精進，
開始用於追蹤人體行動。

撰文／達芙（Meg Duff）

插圖／戴爾肯（Pablo Delcan）

圖片／達志影像

翻譯／連育德

10年前某日，帕瓦里（Neal Patwari）躺在醫院病床，身邊裝設了20個無線收發器，他小心翼翼地調整呼吸頻率，胸膛一起一落，電磁波也跟著波動。如今已是華盛頓大學聖路易斯分校教授的帕瓦里，當下證實了電磁波起伏能夠顯示他的呼吸模式。

過了幾年，麻省理工學院的研究人員成立一家新創企業，希望使用Wi-Fi訊號偵測跌倒，協助銀髮族在家獨立生活。2015年，他們將原型機帶進白宮橢圓辦公室，一名研究人員為了示範，還在歐巴馬總統面前假裝跌倒。歐巴馬看完，認為這項發明「很酷」。

倘若有技術使路由器在提供網路的同時，又能偵測人體活動，豈不蘊藏龐大潛力？「它有如環境感測的當紅炸子雞。」健康感測新創企業Xandar Kardian執行長楊山（Sam Yang；音譯）說，有一陣子「投資人絡繹不絕」。

時間快轉近10年，市面上仍舊不見能夠追蹤呼吸或偵測跌倒的商用Wi-Fi設備。2022年，照明公司Sengled發表一款號稱可做到兩者的Wi-Fi燈泡，但至今尚未正式推出。那家在歐巴馬面前示範的新創企業，目前則是使用其他無線電波。有家名為Asleep的呼吸監測器新創企業，原本要使用Wi-Fi感測技術，但後來改採麥克風。帕瓦里亦成立公司生產Wi-Fi呼吸監測器，但他說：「我們被Google打得慘兮兮。」

以Wi-Fi感測技術監測個人健康指標，光芒通常比不上超寬頻雷達等其他技術，但至今尚未消聲匿跡，而是在領導網路供應商、智慧家庭企業與晶片大廠的助陣下，悄悄走進數百萬個家庭。Wi-Fi無所不在，因此仍是受到青睞的技術平台，尤其目前網路技術愈來愈強大。隨著運算法日益精良與晶片設計逐漸標準化，Wi-Fi技術不久可望默默監測我們日常的一舉一動，有的用途讓人驚豔，有的令人憂心。

它可以追蹤呼吸，可以偵測跌倒，也可以讓建築更聰明，追蹤人的所在地而提高能源使用效率。但有正面就有反面，它也可能淪為為非作歹的工具。有人在你家外頭，就可能知道你是否在家或在做什麼。不管是基於什麼動機想暗中追蹤別人的一舉一動，很多情況都可能透過Wi-Fi感測技術達成。此外，這項技術解讀的是電磁波物理特性，而非電磁波所傳輸的加密數據，因此形成新的隱私風險，然而相關預防措施還在研發當中。

Google的Nest Hub內建「睡眠感應」功能，能夠針對睡眠位置最靠近的人，追蹤他的呼吸、打呼與咳嗽，但使用的不是Wi-Fi感測技術，而是雷達晶片。除了這個差異，Google的技術原理跟帕瓦里大同小異，都是先使用電磁波感測細微動作，再借重人工智慧解讀資訊。最大的差別在於波長；波長愈短，頻寬愈大，因此準確度愈高，反觀波長愈長，感測的距離可以更遠。多數Wi-Fi設備的波長為2到5吋，覆蓋範圍大。相較之下，Google的雷達晶片只能釋放5公釐波長，但能提供更多細節。想要做到接近雷達的程度，Wi-Fi感測技術必須研究多個裝置的電磁波如何互動，屆時將可結合細節與距離，不需要特殊雷達晶片或穿戴式裝置。倘若Wi-Fi成為燈泡等智慧型裝置的預設技術（現在已經有人開始推動），這些裝置將會監測我們的行動。此外，隨著Wi-Fi感測技術持續精進，智慧型裝置的監測內容也會愈來愈細節。

帕瓦里說：「Wi-Fi解析度一開始很低。」在原本準確度只有2公尺的情況下，2個人坐在一起聊天，可能被解讀成1個人。研究人員過去10年間不斷研



↑ Google的Nest Hub內建「睡眠感應」功能。

究，希望從商用路由器的長波長擠出更多資訊。更重要的是，研究人員正在使用人工智慧，分析所謂的「通道狀態資訊」（Channel State Information），亦即描述電磁波散射或衰減的後設資料，因此可供研究的素材多出很多。16年前，「我們能夠明確偵測到有人走過。」帕瓦里說：「但現在可以得出步態資訊，也就是某個人走路的模式。」不過，儘管Wi-Fi感測技術的資訊愈來愈精細，細節仍舊不太可靠。「訊號還不夠乾淨。」楊山說。

人工智慧促進Wi-Fi感測技術改善的同時，也助攻雷達技術。10年前，Wi-Fi感測技術的潛在應用面讓人充滿期待，如今有些用途透過短波長的商用雷達裝置已經做得到。

以醫院與長照機構為客戶的雷達公司Inspiren，在病床上方架設雷達與攝影機，整合兩者數據來偵測跌倒，不僅可以通報醫護人員，也能找出虛弱病患最可能跌倒的時刻，例如下床時。楊山的感測器公司銷售美國食藥局（FDA）核准的醫療器材，能夠從醫院病床或監獄牢房上方偵測心跳，不需搭配穿戴式裝置。有些裝置已經應用於肯塔基州監獄，旨在避免受刑人用藥過量等醫療緊急狀況。

另一種用途相對讓人不寒而慄：隔牆監視。2009年，帕瓦里因為他的發明能夠偵測另一個房間的動作，被新聞報導冠上「穿牆偷窺的Wi-Fi訊號」的標題。2023年1月，新聞再度出現類似報導，這

倘若Wi-Fi成為智慧型裝置的預設技術（現在已經有人開始推動），這些裝置將開始監測你我的行動。

次是卡內基美隆大學（Carnegie Mellon）研究人員使用DensePose人工智慧引擎，從Wi-Fi訊號生成人體形狀，但準確度還有待改善。能夠隔牆感測人體的雷達技術行之有年，特警小組（SWAT）、邊境巡邏隊、搜救小組與軍隊都會用到。

然而，美國公民自由聯盟（ACLU）的技術專家吉爾莫（Daniel Kahn Gillmor）認為，國家單位如果使用Wi-Fi感測技術，可能產生潛在的隱私權問題，對社運分子尤其不利。「我們有許多執法過當的案例，」他說：「倘若執法機關拿到這類資訊來擾民，等於這個技術的後設資料又遭到濫用。」

Wi-Fi感測技術正在取代其他動態偵測工具，也可能讓一些現行的雷達應用面更加普及，但可靠性常常會打折。吉爾莫說，在這兩種情況下，企業有可能使用這項技術監測消費者、員工與工會組織者；跟蹤者或家暴者可能騷擾受害者；其他不肖分子可能犯下各式各樣的罪行。民眾目前無從知道自己是否遭監測，更增添風險。「法律面與技術面要設好防禦措施。」吉爾莫說。

Wi-Fi感測技術也可能催生出新的監測型態。相較於雷射波長只有幾公釐，Wi-Fi因波長較長，覆蓋範圍比雷達更大。正如麻省理工學院團隊在2015年的示範一樣，Wi-Fi最終也可能在住家偵測跌倒，而不必侷限於醫院。但Google的Nest只從床頭櫃、而不是家中每顆燈泡偵測呼吸，是有其設計原因的。在現實世界中，運算法很難分析情境資訊。在病房偵測到跌倒，應該是真的有人跌倒，但如果奶奶在家中跌倒，資訊看起來就像有小孩從沙發跳下來，因此專家正在研究如何判別使用者的身分。除了偵測跌倒之外，類似工具也能讓一家人度假時察覺家中是否遭竊。用於其他設定與情境，也能偵測家中青少年是否在宵禁時間後

才回家、社運份子是否集會，或被某些訂有肛交法的國家拿來偵測同性性行為。

當然，安全監視器與裸姆監視器已經能夠輕鬆監測個人。「別忘了，從監視器得到的情境資訊很豐富。」Wi-Fi感測公司認知系統（Cognitive Systems）執行長曼庫（Taj Manku）說：「你可以看到對方的臉，看得出他是在開合跳、在運動，還是在做壞事。」

但吉爾莫說，就算現行裝置已經做得到Wi-Fi感測技術的一些效果，但不代表風險就會降低。「這項技術會讓隱私蕩然無存。」

暫且不管Wi-Fi能否打敗其他感測技術，如果能整合兩種裝置，最終可能有相輔相成的效果。現階段而言，商用供應商正在善用Wi-Fi的覆蓋範圍優勢，聚焦在住家防盜系統，但還著眼於一個領域，把Wi-Fi感測技術視為最佳解方。Wi-Fi感測公司起源無線（Origin Wireless）執行長梅德（Spence Maid）說：「我討厭這麼說，但我想知道媽媽還活著嗎？」

一年半前，96歲的艾蜜莉（Emily Nikolich）獨居在紐澤西州的一處公寓，每天會從平板收到幾個孫子的照片，還能觀看5個曾孫的情況，從新生兒到4歲娃娃都有。但同時，68歲的兒子保羅（Paul Nikolich）也在監視她。

2021年，保羅在媽媽的許可下，在她家中裝了起源無線公司的Wi-Fi感測設備，稱為Hex Home，共有5個會發光的小圓盤插在家中各處，能夠定位出媽媽的地點。他秀出應用程式讓我看；這項技術並不是追蹤艾蜜莉本身，而是偵測接近每個圓盤的動作，但艾蜜莉畢竟獨居，所以



跟追蹤她沒兩樣。保羅可以輕易看到她每天的路徑，下床、吃早餐、到浴室等。

保羅說，即使自己去旅行無法打電話，也能知道媽媽安然無恙，「可以鬆一口氣」。正因為如此，艾蜜莉去年搬到養老院時，保羅也把感測器帶過去。Hex已經知道艾蜜莉的日常作息，如果察覺異常狀況（例如整天躺在床上），就會通報保羅。他到目前還沒有收到這樣的通知。「我們很幸運，她的狀況很好。」他說。

實務上，Wi-Fi感測技術的細節準確度仍舊不佳，但擅長注意是否有人存在，中間隔了牆壁或家具都不是問題，曼庫說準確度「達百分之百」。有鑑於此，Wi-Fi感測技術很適合能源管理（燈泡公司WiZ以這項技術關閉空房間的燈），也適合降低居家防盜系統的誤報情況。老年人口較多的地方也能受惠於這項技術。梅德以日本為例，說：「日本的郵差會敲門，確保住戶是否安在。」沖繩有家公

司正在使用起源無線的技術，開發能夠證實住戶安在的服務。

曼庫估計，至少有3千萬個家庭已經在使用某種形式的Wi-Fi感測技術。威訊（Verizon）的新款Fios路由器當中，有一款內建起源無線公司的「人體偵測」功能。已連結網路的固定式智慧裝置如燈泡、插頭、揚聲器或Google Nest等，可以立即變成感測器。其他網路服務商正在研發類似產品，例如認知系統公司（Cognitive Systems）與160多家網路服務供應商合作，更在今年1月宣布，旗下技術即將內建於許多廉價的智慧插頭，在亞馬遜網站都買得到，透過現有的Google、Apple、Amazon Alexa智慧家庭應用程式，就能使用Wi-Fi感測技術。

發展到最後，接受筆者採訪的Wi-Fi感測公司都希望更上一層樓，不僅服務住家與小企業，還要普及到規模更大的辦公大樓或店面。曼庫說，



↑ 在病床上方架設雷達與攝影機，整合兩者數據來偵測跌倒，不僅可以通報醫護人員，也能找出虛弱病患最可能跌倒的時刻。



Wi-Fi感測技術正在取代其他動態偵測工具，也可能讓一些現行的雷達應用面更加普及，但可靠性常常會打折。

Wi-Fi感測技術有助於消防人員找到受困民眾，不怕濃煙造成視線不佳；智慧空調能為加班員工維持空調運作；企業有了員工使用空間的數據，更能在疫後時期做出裁員決定；客流量數據讓店家知道該上架哪些貨品。但為了在複雜情境派上用場，Wi-Fi要能精準計算多人的人數與所在地點。

佛羅里達州立大學（Florida State University）研究人員楊杰的目標更大，但方向略有不同。他先針對一群人計算人數與定位，再個別追蹤。「5年前，研究方向大多集中在個人。」他說：「我們現在鎖定多人，比方說一家人。」近期研究的重點放在，如何使用步行模式或呼吸頻率，在多人情境中進一步判斷個人身分。楊杰在其2023年的論文中指出，在新環境中也有可能再次判斷出個人身分。但這項研究如果要落實在現實生活，即使只是用來判斷幾名家庭成員或員工的身分，研究人員不但需要更進階的人工智慧，還要有更好的硬體設備。

而身為人子的保羅正是這方面的專家。

過去22年來，保羅在電機電子工程師學會（Institute of Electrical and Electronics Engineers；IEEE）擔任802 LAN/MAN標準委員會（802 LAN/MAN Standards Committee）主席，這個委員會雖然默默無名卻影響力十足，負責擬定Wi-Fi與乙太網路相容性的技術標準。

2019年，保羅赴華府參加IEEE餐會，同桌對面坐著創辦起源無線公司、近期擔任IEEE總裁的劉國瑞，正在與另一位來賓討論Wi-Fi感測技術，吸引了保羅的注意。自「統一資源定址器」（URL，亦即「網址」）發明以來，網路的有線和無線一直是他思考的主要方向，但這頓飯突然讓他看到不同的領域。「我很興奮。」保羅說。

他和劉國瑞聊了起來，表示願意支持成立Wi-Fi感測技術的小組委員會。於是2020年有了WLAN感測802.11bf任務小組（802.11bf Task Group for WLAN Sensing），由華為與高通（Qualcomm）等企業的專家組成，致力於為晶片



廠擬定產業標準，旨在降低Wi-Fi感測的技術門檻。其中一個關鍵在於，新標準一旦上路，Wi-Fi感測運算法所使用的通道狀態資訊將更加一致，不會像目前一樣需要大量限定與除錯。楊杰說，新標準於2025年推出後，「每個Wi-Fi裝置將可輕易與切實做好訊號量測。」光是這點就可望帶動更多Wi-Fi感測產品上市。劉國瑞認為「會有爆炸性的成長」。

除了一直以來的目標如偵測跌倒、心律、呼吸等，該小組委員會放眼長期，認為潛在應用面還包括在住家或店家計算人數與找人、偵測小孩是否被留在車子後座、判斷手勢等。

IEEE另有3個小組委員會可能有助於達成這些目標。第一個是802.11be，亦即更廣為人知的Wi-Fi 7。Wi-Fi 7預訂今年推出，將開啟額外無線電頻段，供新型Wi-Fi裝置使用，因此將有更多通道狀態資訊讓運算法分析。Wi-Fi 7亦可加強支援每個Wi-Fi裝置的微型天線，有助於運算法更精準定位。楊杰說，有了Wi-Fi 7，「感測能力可望增加10倍。」

預計幾年後登場的Wi-Fi 8標準，可能帶動細節與準確度再一次大躍進。楊杰說，如果搭配更進階的運算法，每台路由器的Wi-Fi 8可以讓感測器不只追蹤幾個人而已，而是高達10到20人。路由器再彼此分享資訊，因此可以針對走過擁擠室內空間（如機場）的個人進行計算與追蹤。

最後一個是普及度較低的WiGig，這項技術標準已經讓Wi-Fi裝置能在雷達晶片的公釐波空間運作，Google Nest即是一例。倘若這項標準更加普及，可能讓Wi-Fi感測任務小組鎖定的其他應用面更具商業價值，這些用途包括辨識已知人臉或人體、辨識司機是否昏昏欲睡、建立室內物品的3D地圖、偵測打噴嚏強度（畢竟，任務小組的成立時間是在疫情爆發的2020年）。

IEEE目前在隱私與資安領域並未有所著墨，至少並未直接進行。參與Wi-Fi感測技術任務小組的IEEE會士區子廉，亦是起源無線公司副總裁，他說現階段的目標在於「至少完成感測量測」。他指出，委員會確



↑ 全球已有多國政府在監視公民，美國與中國名列其中，皆是Wi-Fi感測研究的重鎮。

實討論到隱私權與資安議題，「有幾個成員提出疑慮，我本人也是。」但他們的結論是，這些顧慮的確有待解決，但超過委員會的職權範圍。

使用Wi-Fi訊號傳輸數據時，在電磁波往返的資訊可以經過加密，讓駭客無法解讀。但電磁波還是存在，無法以同樣的方式加密。

「就算數據加密了，」帕瓦里說：「如果有人坐在你家外頭，還是可以得知家庭成員的行進路線，甚至走動的人是誰。」只要有時間、技巧和正確的設備，有心人士還可能觀察你打鍵盤、讀你的唇語，或是竊聽聲波；再加上不錯的人工智慧，他可能有能力解讀這些資訊。「畢竟，現行技術最厲害的部分就是用來隔牆偵測。」他說。

現在只要有Wi-Fi的地方，牆壁也變得單薄。但楊杰證實說，目前能夠進行這類窺視的人，只有研究人員與能夠複製研究結果的機構組織，包括各國政府。「這個情況可能已經發生。」他說：「我不知道是否有人實際在用這種方式監測，但我確定我們有能力做到。」

正因如此，10幾年前企圖使用Wi-Fi訊號得到位置資訊的帕瓦里，如今反其道而行。他近期完成一項由美國陸軍研究辦公室（U.S. Army Research Office）資助的計畫，負責擬定策略，將噪音與誤報帶入通道狀態資訊，讓未經授權的裝置更難監測。歐盟近期資助一項稱為CSI-MURDER的計畫，以混淆通道狀態資訊為目標。防止竊聽的理由有很多，帕瓦里舉例，美國陸軍可能「要確保在基地提供Wi-Fi，但不希望音訊被外面的人竊聽。」

全球已有多國政府在監視公民，美國與中國名列其中，兩者皆是Wi-Fi感測研究的重鎮。這也構成另一項風險；儘管最敏感的Wi-Fi感測資料通常儲存在本機端，但情報單位可以輕易親自監測這些數據（視情況甚至不需搜查令或傳票），還可能取得任何傳送到雲端的報告。儘管如此，對許多美國民眾來說，一般使用者造成的隱私風險比政府單位更大。吉爾莫指出，市面上已經有用來偵測人體存在的工具，

可能更不利家暴受害者。「如果跟蹤者願意遵守威訊的服務條款，當然值得高興，但對這我打個問號。」他補充說。

在美國家庭幫傭聯盟（National Domestic Workers Alliance）主持社會創新實驗室的帕拉夏（Palak Shah）說，她想像得到Wi-Fi感測的好處。「工資偷竊」（wage theft；指雇主以不當名目扣減勞工薪資）在我們這個產業是常見問題。」她說。有工具能夠協助保姆、清潔員或照護人員證實在雇主家中，有助於保障工資支付，但她說：「通常的情況是，這些裝置本來對勞動者是福音，最後卻變成對付他們的工具」，而且「勞資存在固有的權力關係，很難打破。」

在美國家庭幫傭聯盟的協助下，有幾州已經通過相關法案，依法不得在浴室「進行監測或錄製」。相較之下，Wi-Fi感測技術因為不會顯示裸體，經常被人宣稱能夠「保護隱私」，但吉爾莫說：「就因為它不是人類天生的感測模式，並不代表它沒有侵略性。」

從某方面來看，Wi-Fi感測技術比攝影機更值得堪憂，因為它能夠完全藏於無形。知道該怎麼找的話，保姆監視器並不難找到，但如果你不是路由器的主人，除非主人告訴你，就無從得知自己是否被智慧型燈泡監測。要解決這個問題，可以規定附有標籤與揭露資訊，或者借重更多技術方案，但這些目前都不存在。

我請教劉國瑞，對於正在因應這些新議題的議員，他有何建議。他指出，這個問題已經有位參議員提出。「這項技術有助於改變全世界，提升生活品質，包括老人照護、安全、能源管理等各個領域。」他說：「儘管如此，我們的社會必須要畫出一條紅線。紅線畫在哪裡，不是我的工作所能決定的，若一旦畫了線，就不能逾越。」■

達芙是住在紐約布魯克林區的記者與聲頻製作人，
報導科學、科技與氣候變遷。

Copyright©2024, Technology Review. All Rights Reserved.