

GPS衛星的導航

GPS衛星的導航應用正在改變你我日常生活與工作的方式。

GPS接收機為甚麼有不準確的問題？

認識及正確使用GPS，便能讓它成為日常生活的得力助手。

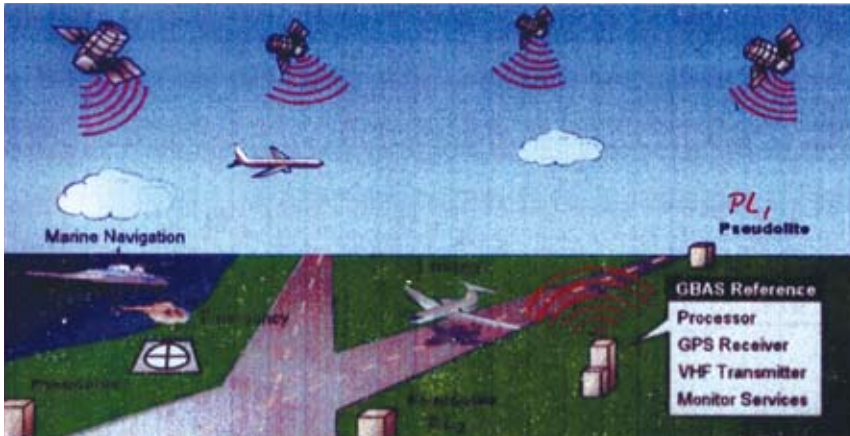
■ 曾清涼

GPS與導航有何關係

GPS是全球定位系統（global positioning system）的縮寫，這個名詞已經越來越被大眾所熟悉，它的導航技術已經深入人心。多少年來人們一直被「我究竟在什麼地方？」這個問題所困擾，也想出很多辦法試圖解決這個問題。然而沒有一個方法能夠「全天候」，不論是白天黑夜或是晴天雨天，且能在整個地球範圍內提供精確的位置坐標。直到有一天，GPS出現了。



● 具有GPS衛星導航系統的船隻



● 飛機起降的GPS導航

GPS衛星導航系統的研發早在20世紀70年代就開始了，美國國防部投入巨額的經費（不少於120億美元），終於獲得好的成果，那就是有史以來最好的導航系統。

導航是一門專業技術，其最基本的作用是由導航系統引導飛機、船艦、車輛等載具或個人，安全而準確地沿著所選的路線準時到達目的地。

古代絲綢之路的駱駝隊中，中國北方的商旅為了安全而順利地到達目標城市，他們不僅須了

解正確的前進方向，沿途還要隨時知道所在的位置和時間，並估計前進的速度，才能正確地選擇下一個驛站，以補充食物與飲水，使人畜都能得到必要的休息。

古希臘人和羅馬人在地中海區域的海上商業活動和戰爭，或是中國明代的鄭和下西洋，在茫茫的大海上，沒有地物可供辨識，若沒有導航系統是不行的。

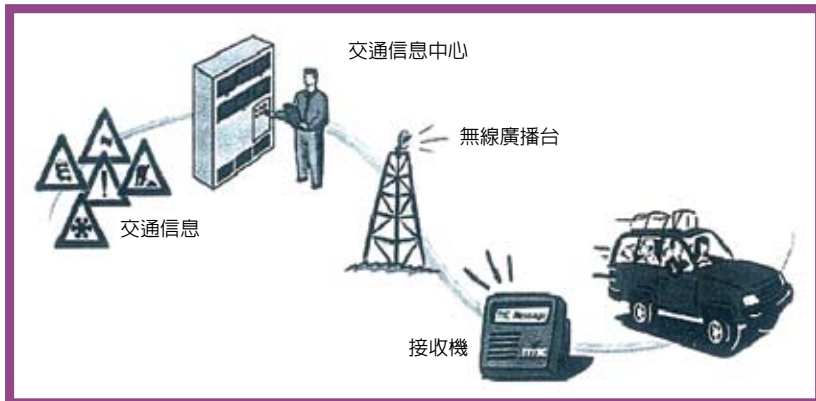
導航的基本功能是要隨時回答：「我現在在哪裡？」、「接下來要怎麼行進？」今日的GPS

導航系統能夠告訴一個航行者更多的導航資訊，包括：你現在的位置（經度、緯度）、你所在位置離海平面多高、你行進的速度與方向、現在是幾點幾分幾秒。

GPS衛星只不過是個類似月亮繞地球的人造星球。人類已經利用月亮和星星做為導航工具好幾千年了。而GPS衛星在軌道上運行時還多了一個廣播電台，能發射無線電訊息給地球上的使用者。

GPS衛星上有兩個覆蓋了太陽能電池板的翅膀，用來提供衛星運轉所需要的動力。它的核心部分是一個頻率很準確的「原子鐘」，每30萬年才有大約1秒鐘的誤差。GPS衛星發射類似電話、電報的「摩斯碼」信號，就是由電子鐘振盪的頻率產生的，其廣播電台發射的信號一年365天，24小時連續工作，從不間斷。使用GPS導航系統，只需要一個GPS接收機。GPS接收機可以在地球表面任何一個地方接收，在任何天氣條件下都能使用，而且是免費的。

使用GPS導航系統，只需要一個GPS接收機，就可以在地球表面任何一個地方接收，在任何天氣條件下都能使用，而且是免費的。



● GPS導航系統使用接收機接收廣播台發射的信息



● GPS導航的掃街錄影汽車

GPS衛星是如何運作的

GPS由3部分組成。

空間部分 由24~32顆圍繞地球飛行的衛星群組成。由於衛星有時會被臨時關閉，或者以新發射的衛星替代老衛星，每顆GPS衛星的平均壽命是7.5年。因此實際有效服務的衛星

數量會有變化。

控制部分 太空中運行的GPS衛星是由美國國防部在地面的軍事基地跟蹤和控制的。控制部分專門用來計算衛星在運行軌道上的準確位置，和衛星上原子鐘同步計時的偏差量，並確保衛星的正常運轉。

用戶部分 包括飛機、船隻、汽車等各類移動載具與個人的用戶，都屬於這一部分。

這3部分是一個整體，構成完整的導航系統。就好像音樂會，指揮（控制部分）告訴合唱團（空間部分）怎麼混聲合唱？唱什麼曲目？聽眾（用戶部分）用耳朵聆聽並欣賞合唱團演唱的歌曲。

GPS衛星群全都分別送到6個離地球很遠的太空軌道上，並以南北走向繞地球運行。GPS衛星軌道的形狀是非常接近圓形的橢圓，這6個軌道均勻分布在地球周圍，每個軌道上布滿至少4顆衛星。這二十幾顆GPS衛星交織成網狀，把地球包圍在這個太空網狀軌道內。

GPS衛星在離地球表面約20,000公里的高空軌道上，靠著地球的引力驅動快速運行。究竟多快呢？大約是每秒運行4,000米。這不像那些與地球同步的通信衛星是和地球同步運轉的，形同待在太空中的一個地方不動。GPS衛星和其他恆星、行星一樣也會上升下落，它們每天繞地球兩圈。因此每天幾乎在同一時間、同一地點，可以看到同一顆GPS衛星，但實際上是每天大約提早4分鐘。

GPS衛星的體積就像一部休旅車那麼大，但因位於20,000公



● 現代化的GPS衛星外觀

里高的太空軌道上運行，因此肉眼是看不到的。由於GPS衛星的6個軌道交織成網，而又離地表面那麼遠，讓用戶在地球上任何地方、任何時間都能接收到4顆以上的衛星信號，最多可接收到10顆衛星的信號。用戶是藉由GPS接收機來接收GPS衛星發射的無線電信號，就如同使用收音機收聽廣播的道理一樣。那我們是用什麼無線電頻率收到GPS信號呢？

使用什麼頻率的電磁波

GPS衛星使用的電磁波屬於微波波段的超高頻率，以無線電從業人員稱為L波段的2個頻率帶做為載波來發射GPS信號，

分別是L1的1575.42兆赫和L2的1227.60兆赫。為什麼選用微波波段的頻率呢？因為使用一般廣播電台用的無線電波頻率，會被大氣層反射或吸收，無法把信號從太空傳播到地面。微波則可以穿透雲層、雨、霧、煙、塵土、大氣汙染物等。

GPS衛星發射3種不同的信號，是由「0」與「1」兩個數字按照二進位制特定法則組合而成的碼信號。第一種是軍用碼（P碼），第二種是民用碼（C/A碼）。這兩種碼都是用來量測GPS衛星到用戶接收機之間的空間直線距離，也稱為「測距碼」。

第三種是向所有用戶公開的導航信息，稱為「導航電文」。就像天文學上記錄恆星、行星位置的星曆一樣，讓用戶的接收機可以推算各顆GPS衛星在太空軌道運行的「瞬時位置（X、Y、Z）」。導航電文並告訴用戶有關GPS衛星的健康狀況，若是「健康」，意味著這顆GPS衛星的運作是正常的，你可以放心大膽地使用它。

C/A碼是公開碼，也稱為粗碼，調制在L1載波上，所有用戶都可以免費自由使用。每顆衛星發射不同的C/A碼，不同的C/A碼是由「0」和「1」數位組合的方式不同而形成的。因此

GPS接收機可以依接收到的C/A碼的不同，判斷這個C/A碼來自哪顆衛星，GPS衛星的身分就以C/A來辨識。

P碼是加密碼，也稱為精碼，是美國或其盟國軍方的特權用戶才可使用。P碼調制在L1和L2兩個載波上，每顆衛星發射獨有的P碼，因此接收機可以分辨出信號來自於哪顆衛星。現在市面上所販售的GPS接收機，幾乎都是採用C/A碼的民間用戶。

每顆GPS衛星把這3種信號混合在一起，同時向地球廣播。如果你試圖聽一聽，則你聽到的是一堆亂七八糟的東西，混雜在一起而分辨不清楚，就像好幾個人同時在唱歌，聽不清楚究竟是哪一首歌。但是GPS信號碼的設計和編排，卻能保證GPS接收機可以分辨而同時聽很多首歌。要完成導航定位的工作，GPS接收機必須能夠同時「看」（接收）到好幾顆GPS衛星。一般來說至少4顆，愈多愈好。但在室內、地下、水下這些接收不到衛星信號的地方，GPS導航定位的工作無法進行。

GPS衛星無法鑑別誰在接收它的信號，美國國防部也不知道，誰能給用戶寄帳單呢？因此安啦，使用GPS當然免費。操作GPS接收機，你只能盲目地相信GPS的導航定位功能。只要備好

接收機，打開電源，它很快就會告訴你在哪裡，僅此而已。但用戶也需要發揮自己的才智，不能僅是盯著GPS接收機的屏幕而發呆，你必須思考，接收機在螢幕上顯示的東西是否合乎情理？那就要了解GPS如何處理所接收到的信號，來完成GPS接收機所在位置的計算了。

如何量測距離

距離是指從一個點到另一個點之間的遠近，可以直接用尺丈量，也可以由速度和時間間接求得。比如機車的速率是每小時40公里，從你家出發，騎機車花了半個小時到達火車站，就可以由40公里/小時 × 0.5小時 = 20公里，計算出你家到火車站的距離。但這並非直線距離，要再做路徑彎曲、機車等紅綠燈、變速等的修正，這個距離才能成為空間直線距離。

GPS是用測距碼（C/A碼或P碼）來量測距離，就如同騎機車算出來的距離一樣，也是間接測量出來的，這個距離稱為「偽距」（也稱為虛擬距離）。「偽」是虛假的，「偽距」是不準確的距離，這個偽距要經過若干誤差改正，才會

成為準確的空間直線距離。

GPS信號是用電磁波來傳播，而電磁波以每秒大約30萬公里的光速向地球廣播，這可比機車快多了，大約只需要0.07秒就能傳播到地球表面。如果以機車的速率加快到光速來比喻，以電磁波的傳播時間替代騎機車所花的時間，GPS信號從衛星傳播到接收機的時間乘上光速，就得到「偽距」。時間的量測若準確到百萬分之一秒（微秒），偽距量測就能準確到0.3公里（300,000公里/秒 × 10⁻⁶秒）。

要如何準確測得GPS信號傳播的時間呢？必須用準確到奈秒以上的鐘錶，因為GPS衛星發出的信號是以光速前進的。

GPS信號什麼時候發出是由衛星上的鐘來記錄，而這個GPS信號在什麼時候收到，則由GPS接收機的鐘來記錄。把這兩個鐘所記錄的時間相減，就是這個GPS信號傳播的時間。但誰知道GPS衛星的鐘和接收機的鐘是不是走得一樣準呢？是不是同步計時呢？

實際上，GPS衛星的鐘和接收機的鐘是不一樣準的，衛星上用的是體積比較大，穩定性很高、很昂貴而非常準確的

「原子鐘」。但接收機用的是跟手表差不多的「石英鐘」。石英鐘的準確度比原子鐘差了幾千倍到幾萬倍，但是很便宜。接收機的鐘可能會快一些或慢一些，很難調整到和衛星的鐘同步計時。不同步計時就會導致GPS信號傳播時間的量測誤差很大，因而造成計算的距離誤差很大，這就是為什麼叫做「偽距」的道理。偽距的誤差大，當然就影響後續的位置計算結果。

要多少顆衛星才夠用呢

假如手持一支GPS接收機，開機看看，接收機收到一顆GPS衛星信號，從導航電文中獲知衛星的位置，還測出接收機到衛星的偽距，假設是22,800公里。這就是說：「你是位於該顆衛星為球心，22,800公里為半徑的圓球面上的某一個地方。」但是這個球面實在太大，不能確知在球面上的何處。

我們再接收第二顆衛星的訊號，假設測得的偽距是23,500公里，那你也是在第二顆衛星為球心，半徑23,500公里的球面上某個地方。數學和幾何學告訴我們：「你就是在這兩個球



● 地面上的GPS三維定位與飛船的導航都是從一個點的定位開始的

面的交會區域內。」這個區域的範圍雖然縮小了，但還是不知道究竟在哪裡。

如果再接收第三顆衛星的訊號，假設測得的偽距是24,200公里，那你又是位於第三顆衛星為球心，半徑24,200公里的球面上的某個地方。由於這3個球面相交的交點只有兩個，你的位置就在這兩個點上，但是究竟哪個點才是你的位置呢？你的GPS接收機會幫你解決這個問題，因為你是在地球上，地球也是一個大球，你的位置就是這兩個點中落在地球上的這一個，如此你的位

置就確定了。

在地理學中，地球上的位置是用經度、緯度和海拔高的三維座標來表示，數學上還可以換算為歐氏幾何的X、Y、Z卡式座標來表示。地圖上也可以用南北向坐標（N）、東西向坐標（E）及高程（H）來表示，但都是指同一個位置。GPS接收機可以同時接收3顆衛星的訊號，測得3個偽距，利用數學的代數方程式求解3個球交會點的3個座標。知道這3個座標（經度、緯度及高程），就等於你的位置已經確定了。在代數方程式求解時，稱這3個座標為「未知數」。

前面說過，這3個偽距都有時鐘不同步的大誤差在內，如果不拿掉，代數方程式求解出來的座標會差到幾公里。如果不同步的時間差大到萬分之一秒，偽距誤差就達到30公里，可想而知時鐘不同步的誤差，影響位置的座標計算有多麼嚴重。這可能使位於台南市的用戶，算出來的座標卻偏到高雄市的某個地方。這個問題非得解決不可。

三維定位的位置誤差

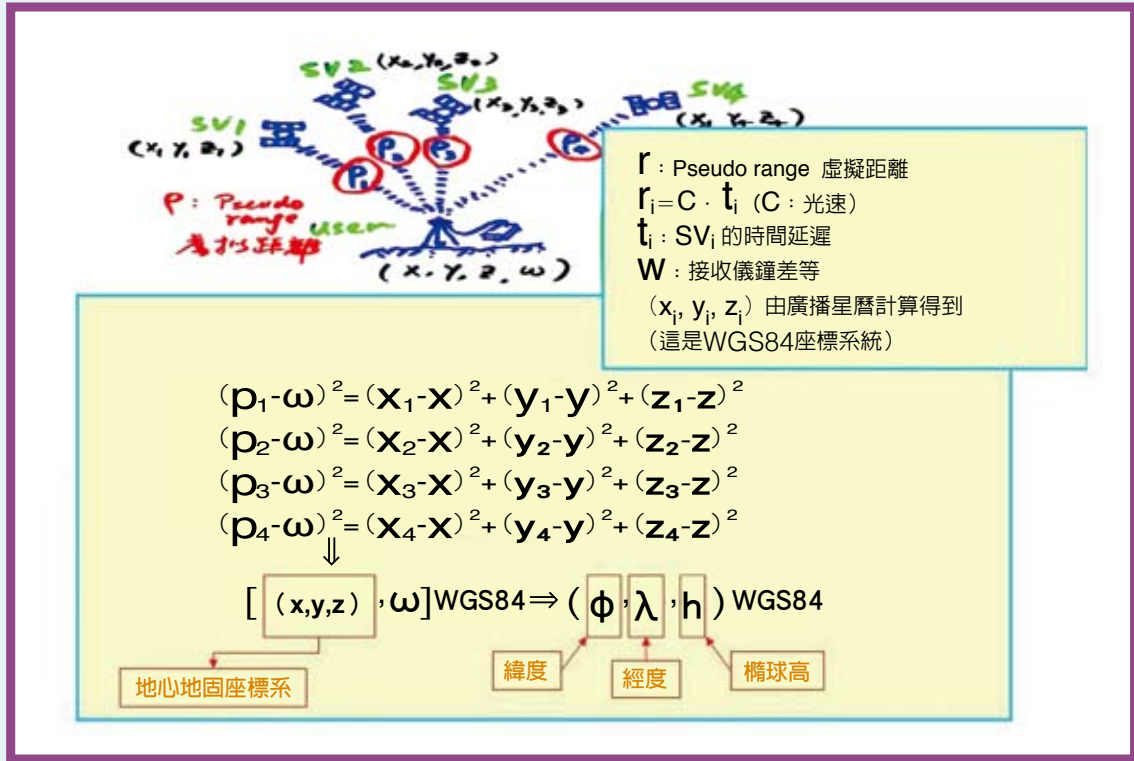
所有GPS衛星的鐘都是很準確的原子鐘，也都由美國國防部所掌管的「控制部分」來做原子

鐘的同步處理，因此衛星上的原子鐘同步得很好。接收機的鐘和所有的衛星鐘就只有一個不同步的「時間差」（簡稱為鐘差）。同一個時刻，接收機測得的偽距（虛擬距離）都有鐘差造成的距離誤差。就把這個鐘差也當作未知數處理，把經度、緯度、高程再加上鐘差一併引入代數方程式中，同時解算這4個未知數，時鐘不同步的問題就能解決。

現在有4個未知數，即經度、緯度、高程和鐘差，於是還需要再測量第四顆衛星的偽距才能求解。有了這4個偽距，能夠列出4個代數方程式，這4個未知數正好可以解算出來。由此可知，求解位置的3個座標（常稱為三維定位），至少需要同時觀測4顆GPS衛星，測得4個偽距才行。若觀測的衛星多於4顆，仍然可以求解，但是少於4顆衛星就求解不出來了。

GPS的三維定位有多準？根據統計資料，使用C/A碼定位，水平方向（經度、緯度）可以準確到10~15米。垂直方向（高程）差一些，但也能準確到25~40米。然而，隨著技術的提升，在2015年之後，三維定位的準確度會改善一倍。

GPS衛星在空中的幾何分布



● GPS定位原理

會影響到定位的準確度（常稱為精度）。不是在天上的任何位置的GPS衛星都可以用於定位，必須考慮的是「它們在天空中的位置」合適嗎？如果是，就挑選並納入。我們以天頂（你站直了，你的頭頂的方向）為中心，把天空均勻地分成四塊（四個象限）。如果GPS衛星都集中在某一個象限內，那就是幾何分布很差，雖然你還是可

以求解到位置的3個坐標，但是精度會很差，甚至差到很離譜的地步。

為了得到最佳的三維定位結果，最理想的衛星分布是什麼樣的呢？以四顆衛星為例，一顆衛星在天頂，另外三顆等距離地分布在周圍，就是最佳的分布，這就是衛星的幾何分布。分布的好壞要如何表示呢？最常用的就是「PDOP」

值，PDOP是position dilution of precision的縮寫，翻譯為「位置精度因子」。

PDOP數值愈小表示衛星的幾何分布愈好，當然定位的精度就愈高。通常取PDOP<5時才用來進行GPS三維定位。因此，每次定位一定要先查看PDOP值，如果GPS接收機不顯示PDOP值，它一定有其他的方法來指示「衛星分布差」，這

只有GPS定位的結果，還是不能導引你如何到達目的地，電子地圖是不可或缺的。

如果GPS三維定位很準，但是電子地圖不準確，在電子地圖上顯示的你的位置就會錯誤。

這時候常常會誤解為GPS不準，但經驗告訴我們，電子地圖不準的可能性比較大。

種情況下的定位結果就不要用。PDOP值對定位精度的表示是一個乘數的作用，若PDOP=2，接收機定位的誤差是PDOP=1的2倍。同理，PDOP=3，定位的誤差是PDOP=1的3倍。

隨著經驗的累積，你會發現，選用的衛星越多，PDOP值變小的可能性就越大。另外，如果有遮蔽物體，例如附近的高樓、車子、你的身體、山壁等擋住了部分天空，使衛星信號進不到接收機，PDOP值也會變得很大，怎麼辦呢？先看看周圍是不是遮擋物體很多，如果是，只好避開這個被遮擋的地方。

如果不是遮擋的問題，再看看是不是自己的身體或汽車擋到了衛星信號傳播的方向，最後再試一試面向赤道，通常那個方向的衛星顆數會多一些。再不然就要檢查是否有太多「不健康」的衛星，使衛星數不夠，或接收機本身有問題等。

假如你需要追求1~2米的定位精度用來標示一個地下管線

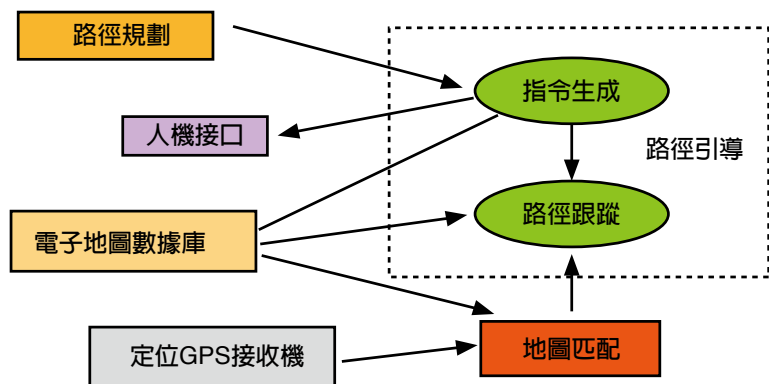
孔蓋的位置或行道樹的位置等，就要多挑選一台GPS接收機安置在基地站（已知位置的站台），用來改正更多偽距內的誤差，使偽距更趨近於真實距離。三維定位計算的結果的誤差變小，精度自然就提高。這種定位方式稱為「DGPS」，通稱為「差分GPS」定位。這種定位法的處理技術比

較複雜，本文就不再多加敘述。

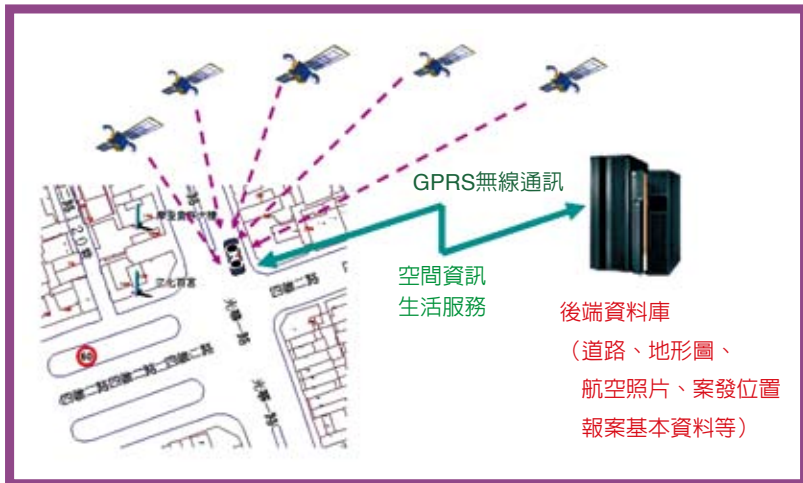
GPS接收機附有導航地圖嗎

只有GPS定位的結果，還是不能導引你如何到達目的地，電子地圖是不可或缺的。在人們日常生活中，地圖發揮了重要的角色，出外旅遊、開車時更是。

- 隨著車輛行駛，路徑導引會根據車輛當前的位置、方向及行駛的道路，不斷更新上述信息。
- 當轉彎或變換車道時，螢幕上的視頻或聲音播報會提醒駕駛預先準備，並做必要的路徑改變。



● 路徑導引



● 無線數據傳輸



● 結合雷射槍的GPS三維定位應用

電子地圖具有地圖內涵，能夠傳輸，並能在螢幕上動態顯示和即時處理圖像資料。GPS可即時提供你現在的位置（where），接收機結合了電子地圖，就能把位置顯示在電子地圖上。接收機的導航功能會提供路線選擇，還具有導引路徑（how），帶路抵達（go to），何時（when）到達目的地等功能。城市的街道會構成棋盤式的道路網，GPS接收機在選擇路線時，會按「短捷」、「直伸」、「先幹道」、「後巷弄」的方式提供導引服務。

如果GPS三維定位很準，但是電子地圖不準確，在電子地圖上顯示的你的位置就會錯

誤。這時候常常會誤解為GPS不準，但經驗告訴我們，電子地圖不準的可能性比較大。因此電子地圖要常檢核，即時更新，以免道路、地形變了，電子地圖如果還是舊的，就會導引到錯誤的道路或地方。

為什麼GPS定位在地圖上的座標差很大？另一個原因可能是座標系統不一樣所造成的。GPS的座標系統是美國國防部所建立的，稱為WGS84，台灣的電子地圖使用的座標系統是不一樣的。是否已做了轉換？這個問題在使用GPS接收機時要先查明，否則GPS定位以及導引錯誤的問題必然會發生。

現在，若非地形因素的

限制，使衛星數接收不足或信號不良，否則有了好的GPS接收機，配上正確的操作、合用的電子地圖，再加上腦袋的判斷，就能夠讓你行動自如，迷路問題不再發生。行動中還可透過網路獲取其他資訊，使開車更順心。

曾清涼
成功大學地球科學系

有了好的GPS接收機，配上正確的操作、合用的電子地圖，再加上腦袋的判斷，就能夠讓你行動自如，迷路問題不再發生。