

如果雪山隧道裡的車像螞蟻

在我們生活的世界中，有許許多多奧秘，例如鮑魚的內殼硬度比起靠著高科技製造出來的陶瓷，是它的兩倍；犀牛角裡就算沒有活細胞也能進行修補工作；蜘蛛絲硬是比鋼鐵強韌上五倍。大自然充滿了驚奇，我們也嘗試著向自然環境尋求生活上的解答。本篇文章將剖析螞蟻世界如何營造互助交通網絡，並且以雪山隧道做為對比來呈現塞車問題，以及我們能從螞蟻行為中得到甚麼啓示。

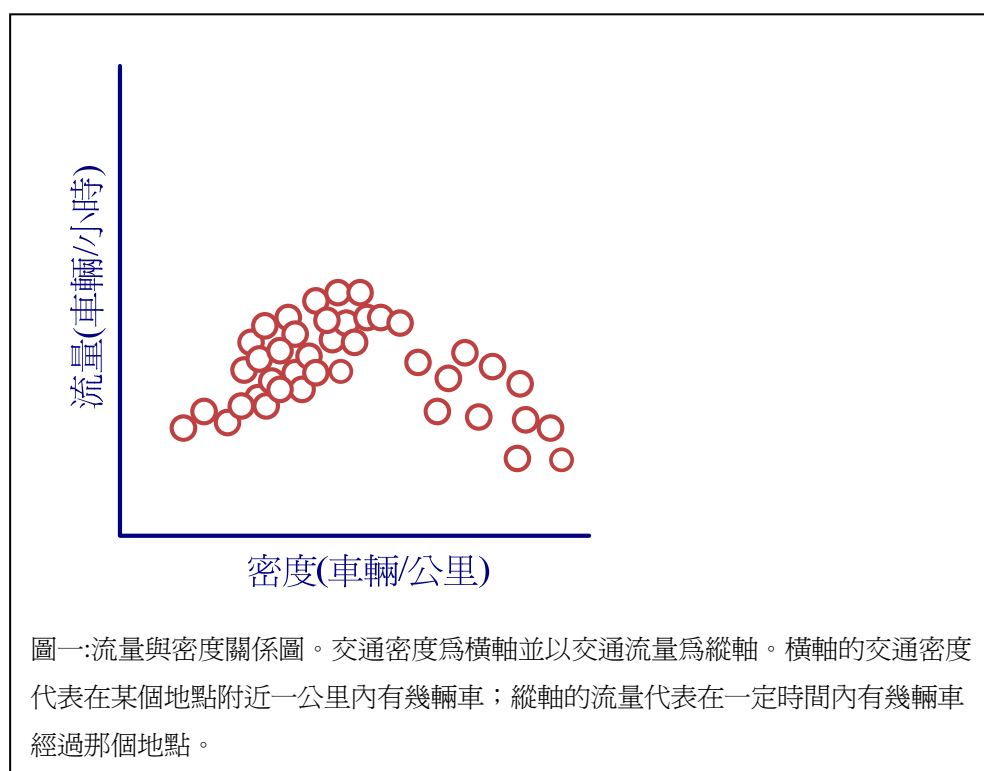
人造驚奇的雪山隧道

歷時十五年，資金耗費超過新台幣 230 億元的北宜高速公路(國道 5 號)在 95 年 6 月 16 日正式開放通車。其中雪山隧道長 12.9 公里，是國道 5 號高速公路上最長的隧道，也是世界第六長之公路隧道。雪山隧道開挖出來的土石，就多達 509 萬立方公尺，這些土石的體積相當於 2 座埃及金字塔，也和 5 座中正紀念堂差不多。雪山隧道的 1 號通風豎井，深 512 公尺，可比擬世界最高樓的台北 101 大樓的高度。當然即便雪山隧道裡藏著這麼多的豐功偉業，任誰也不願意在周末或是連續假期塞在雪山隧道裡去感受這偉大的工程，因為出遊的興致很快就會被長串車龍給消磨掉了。塞車時，我們一定恨不得車子可以長翅膀飛過車陣。如果真能飛上天，看看大排長龍的車陣也真像從人類的角度看螞蟻。螞蟻世界的數量是人類的百萬倍，他們的世界會阻塞嗎？

我們先來看看在人類的世界裡，塞車是甚麼樣的情境。以雪山隧道為例子，在隧道內大約每隔 350 公尺，就會有一組偵測器，這些偵測器所收集的資料，由坪林行控中心的電腦處理成每 5 分鐘一筆的車流量、平均速率、平均車長及其他車流的相關訊息。這些統計量可以整理成統計圖表以方便進行流量分析。在圖一密度與流量的關係圖中，我們可以看出這一區域車流量的狀況。一般而言，我們可以將一個路段的車流狀況劃分成速率較高的穩定狀況及速率較低或交通壅塞的不穩定狀況。如果從穩定狀況進入不穩定狀況時的車流狀況稱為臨界狀況。我們稱臨界狀況對應的車輛密度為臨界密度。在臨界狀況時的流量（即為臨界流量），代表該路段的容量。當要通過該路段之車流量超過容量愈多，愈容易出現嚴重的塞車。然而，臨界流量並非固定不變，這個數值受到進入不穩定狀況前的車流狀況影響。就好像開車上路後才發現今天車子很多，但車速並不慢。但有時候即使車子不多，遇到幾輛”龜速”行駛的車，很可能就拖慢你的速度。容量是評估路段的重要參數，這個值只能根據車流從穩定進入不穩定狀況時之情形加以估計，所以容量應是不同車流狀況下臨界流率的平均值。臨界時段符合兩條件，一是車流從穩定狀況接近不穩定狀況，二是連續時段的平均速率及里程生產量都下降。簡單的說，在流量與密度的關係圖中，像圖一”人”字突出的部分就是臨界密度值。

雪山隧道北上比南下更容易塞車

我們將坪林控管中心收集的部分資料節錄出來。包括 96 年 9 月及 10 月中流率較高，而且速率變化也大的日期。北上日期包括 9 月 9 日、16 日、23 日、24 日、30 日及 10 月 14 日、21 日、28 日，南下日期分別為 9 月 22 日、23 日、24 日（中秋節假期）及 10 月 20 日、27 日。量測地點為南下 21.063K，北上 21.055K 處，兩個地點約是在雪山隧道的中間處，也是最容易塞車的地方。依照這些資料，我們找出臨界密度及其相對應的容量與速率並且整理在表一中。從表一的九月份南下的臨界密度，我們可以看出密度是 37.67，也就是一公里的車輛有 37.67 部，這表示當時當兩部車的車距距離小於 26.5 公尺時，就是進入塞車狀況了。另外從表一中，也看得出來南下北上或是不同月份的容量與臨界狀況不同。但是北上的車道容量卻明顯小於南下的車道容量，這個現象比較讓人納悶。倘未有完整研究顯示確實的原因。比較被人討論的原因是，當北上的車子大都是出遊後回程的車子，駕駛人狀況沒有比剛出遊時的精神狀況好，所以容易造成塞車。當然北上的進入口與南下的進入口有不同的路況也有可能是原因之一。另外南下車流在行經雪山隧道之前已先通過其他隧道，而北上車流則無，使得兩方向之駕駛員有不同之行爲，這也是可能原因之一。



表一：雪山隧道 96 年 9 月及 10 月部分天數的流量資料對應的臨界密度。

方向	月份	雙車道容量 (小車／小時)	平均 速率 (公里 ／小時)	密度 (小車／ 公里)
南下	9月	2,264	60.1	37.67
	10月	2,245	56.4	39.80
北上	9月	1,827	57.8	31.61
	10月	1,879	59.0	31.85

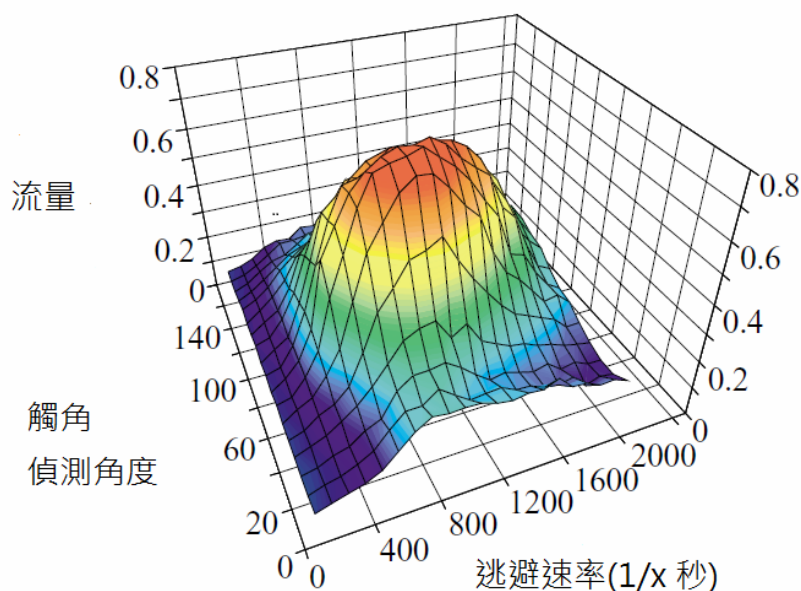
自然神奇的蟻群世界

換一個場景，我們看看螞蟻世界是不是跟人類世界一樣的擁擠。英國昆蟲學家威廉斯(C.B. Williams)曾經計算在任何時刻，地球都有一百萬兆(10 的 18 次方)隻昆蟲，其中約百分之一是螞蟻。一隻工蟻依照不同蟻種大約是在一到五毫克之間。也就是說全部的螞蟻加起來則可以得到相當於全人類的重量。(一隻工蟻體積不到人類的百萬分之一)。螞蟻被稱為社會性昆蟲，它們以合作為基礎，創造了螞蟻的王國。在螞蟻的社會中，由工蟻外出覓食，當某一隻螞蟻發現了食物，很快的就會有其他的螞蟻幫忙把食物搬回巢。他們是如何溝通的呢？螞蟻靠的是費洛蒙(Pheromone)，這也是它們溝通的基礎。費洛蒙是螞蟻分泌出來的化學物質，他們靠著味覺與嗅覺來判斷這些化學性質的意義。每種螞蟻分泌的費洛蒙不同，一般的螞蟻種類可以施放十到二十種的費洛蒙，每一種都可以傳達不同且含糊的意義。例如油酸(oleic acid)這一種化學物質對於螞蟻的意義視情境而不同。在 1958 年威爾森(E. O. Wilson)和他的同事做了一個實驗，報告中說到螞蟻會將有油酸味道的物體當成堆肥，威爾森把油酸塗在一隻活螞蟻身上，結果是那隻螞蟻被他的同伴活生生的塞到堆肥當中。之後，葛登(Deborah Gordon)做了類似的實驗，只是他用濾紙代替了活螞蟻，結果卻有兩種。有些濾紙被當成肥料，還有一些濾紙卻是被當成食物。其實這說明了一件事，不同情境下的相同化學分泌物也有不同的意含。

費洛蒙中有一種稱為”蹤跡費洛蒙”，蟻群在覓食或是返回蟻巢時需要這種費洛蒙辨別路徑。它的特性是揮發性高，大約幾分鐘到幾十分鐘就會蒸發掉了。當然如果蟻群有特定的糧庫，蹤跡費洛蒙的高揮發性恐怕不是件好事；相反的，如果食物來源經常變化，這樣的特性反而不會去干擾先後路徑的辨識。日本的山岡

亮平教授曾經對蹤跡費洛蒙做了更進一步的研究，他發現螞蟻在把蹤跡費洛蒙塗到地面上之前，會先塗上一層氫化碳，這是為了避免費洛蒙立刻被地面吸收，就像先塗上一層臘似的。氫化碳是不易揮發的化學物質，同一個蟻窩的螞蟻會分泌同一種氫化碳。另一方面在螞蟻互相清潔身體時，會一邊清理對方，一邊把體表物質塗到對方身上。牠們藉此分辨蟻窩內的其他螞蟻是敵是友，所以即使是同種的螞蟻，只要體表的碳氫化合物不同，也能讓螞蟻分辨遇到的螞蟻是否屬於同一群蟻窩的成員。

再回到螞蟻前進的話題。我們已經知道螞蟻會排成一排，並且沿著蹤跡費洛蒙前進。所以對螞蟻和車子而言，想同之處是都會排隊前進。然而螞蟻與車子有甚麼差異呢？庫辛教授（I. D. Couzin）和他的研究小組提出相關的實驗。我們從他們的實驗中可以對照出螞蟻的速度與密度的關係，他們的結果如圖二。

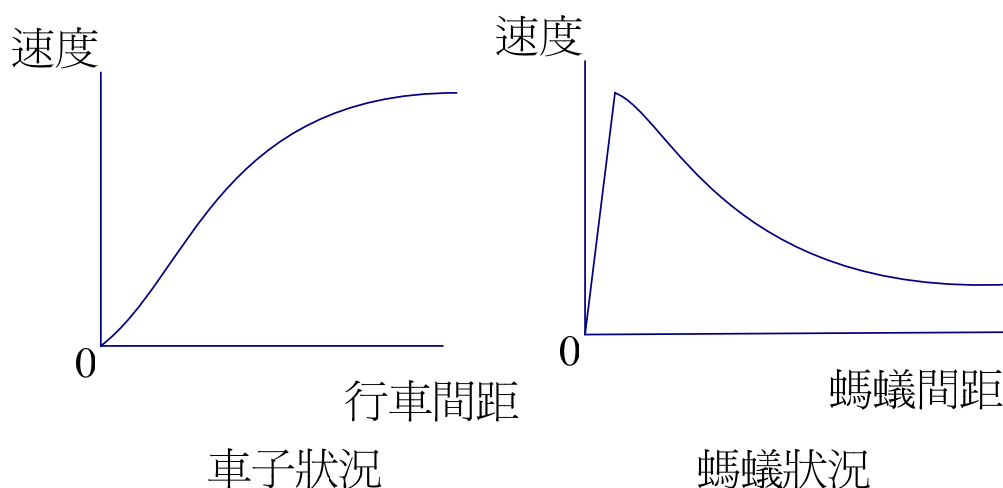


圖二：軍蟻(*army ant*)的流量與偵測角度和躲避速率的關係圖。當軍蟻的偵測角度小時，它比較容易發生碰撞，相反地，當軍蟻的偵測角度比較大時，偵測行為反而拖累它的速度。另一方面當軍蟻的躲避速率小時，它也比較容易發生碰撞，相反地，當軍蟻的躲避速率比較大時，反而造成它一些無謂的原地打轉。也因此從圖中，看得出來當躲避速率與躲避速率在中間值時，是整個螞蟻群流量較大的時候。(註一)

當我們駕駛汽車時，會根據視線範圍內所觀察到的情境開車。不過就像我們所提過的，螞蟻不是根據視覺而是依據嗅覺行動。事實上，螞蟻是需要其它螞蟻的費洛蒙才能行動得比較快，他們是靠著群體互助合作而延伸出不同於人類的交通

系統。當螞蟻前進的時候，它的一對觸角的活動角度決定了它偵測的範圍，這個活動角度將會影響這一隻螞蟻的前進速度。另一個也會造成影響的因素是螞蟻爲了避免與其他螞蟻相撞的躲避速率。從庫辛教授等人的研究中，我們可以看得出來上述的兩個因子影響螞蟻前進速度的關係。

庫辛教授等人的研究中，軍蟻在往返於蟻窩與採食處的路上會整齊的分道，避免彼此碰撞，它們的分道通常是三道（但並非所有種類的螞蟻都會自動分道）。中間一道是返回蟻窩的螞蟻所形成的，左右兩旁的是則是外出覓食的蟻群。也因為外出覓食的軍蟻是在兩側，所以它們的躲避速率會大於在中間蟻道的返巢螞蟻。另外值得一提的是軍蟻的互助充分表現螞蟻的社會性昆蟲的特色。當成排的螞蟻往前進時，前面的螞蟻會避免與其他迎頭而來的昆蟲或是障礙相撞，而後頭的螞蟻就不會執行這樣的動作。如此一來，造福了整個蟻群的行走速度。考慮現實生活中車子前進的狀況，車道上的其他車子對我們而言只是妨礙自己前進。如果車子多了，行車間距變短後，車速會減低。所以開車時，我們都希望行車間距大一點，車速也會比較快。一旦行車間距大到一定程度，車子當然會以接近法定速限的速度行駛，所以最後會趨近某一個法定速限的速度。然而螞蟻的情況卻不是如此，兩隻螞蟻間的距離短一點時，對整個蟻群反而能前進得比較快。因為蹤跡費洛蒙揮發性高，前面的螞蟻留在地面上的費洛蒙經過一段時間就會蒸發，因此趁費洛蒙尚未蒸發時，後面的螞蟻才能毫不猶豫的跟上前面的螞蟻，這也暗示在螞蟻間距小的時候，螞蟻才能毫不猶豫的快速前進。這個現象可以從圖三中看得出來。



圖三:車子與螞蟻的速度與間距比較。車子的間距愈大車速愈快。當螞蟻的間距非常小的時候，也會變得難以前進，所以速度也會減低。之後過了一個門檻後，當螞蟻的間距越短，就越能藉由費洛蒙的指引，迅速前進。一旦螞蟻間距過大，費洛蒙的效力減弱，速度也會減低。距離大到一定程度之後，費洛蒙就會失效，這時候螞蟻就只是沒目的的似的四處探索。

如果讓螞蟻的合作精神進入到雪山隧道

雪山隧道裡的車速限制在去年(97年3月)改成80公里。主要是希望藉由提高車速來改善車流量。然而另外一項限制是兩車車距限制為50公尺。這一個車距的問題曾出現在現在很紅的電視節目百萬小學堂裡。但是為甚麼是50公尺呢?車輛駕駛員在警覺狀況時的反應時間通常大約只有0.7秒,在平常狀況下的反應時間則很少超過1.5秒,因此美國的公路設計以2秒的反應時間來檢定公路設計的安全標準。也就是說當時速90公里時,兩車車距為50公尺時,剛好有2秒的反應時間。從表一中,我們可以推算出雪山隧道在臨界容量時,南北向的平均車距大約各需3.2秒及3.9秒,這些數字超過於維持安全行車所需之2秒。也因此,車距被學者指為雪山隧道塞車的原因之一。事實上當駕駛人駕車行經隧道時,受到視線與空間的影響,會造成心理與身體上的負擔,部分駕駛人則會感到緊張,也因此拉大了車距,也是造成雪山隧道車距較大的原因。當車距較大,代表密度較小,也就是限制了車道容量。當然就更容易會有塞車狀況。如果雪山隧道裡的車子像螞蟻,那麼後方的車子會跟隨前方的車子,前方的車子會將前方的車況充分讓後方來車之道,也避免讓後方的車子碰撞前方。這或許在目前的科技上還達不到。但從這一觀點來看,在人類的生活中,我們可以藉由新科技的開發與創造,讓我們的車子日新月異,一部高性能的法拉利即使進了會塞車的雪山隧道,也與其他車子的作用無異。但是一群能合作的螞蟻卻能實現較高利益。也就是說螞蟻藉由群體的力量發揮了比單隻螞蟻能達到的更快的速度。人類的生活中也漸漸的利用科技效法生物中的智慧。比如說車載感測系統,每台車配戴著感測器來幫忙知道目前的車流狀況以選擇最佳路徑。或許下次看到螞蟻時,停下腳步看看它們,我們的生活或許會有改變。

註一:本文圖二依 I. D. Couzin, ,, N. R., "Franks Self-organized lane formation and optimized traffic flow in army ants," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 270, No. 1511. (22 January 2003), pp. 139-146. 文中的圖 2 進行修改畫製。其餘本文中出現的圖皆為作者所繪。