

被遺忘的時間— 時間在數位典藏地理資訊中的挑戰

Lost “Time”?

- Challenges of Integrating Time into Digital Archives GIScience

蕭世瑜*

Shih-Lung Shaw

美國田納西大學地理系教授

摘要

人類的社會是用時間來安排生活作息，同時亦以時間來記錄與表達歷史的演變、文化的變遷、生存環境的改變等變化。由於絕大多數的數位典藏資料均包含了空間資訊，因此地理資訊科學在數位典藏中無疑地扮演著重要的角色；然而今日的地理資訊系統軟體卻幾乎都遺忘了時間。處理數位典藏地理資訊時，如果忽略了時間所扮演的角色，所生成的數位典藏資料庫雖然仍具有極高的資訊典藏的意義與價值，但是在需要瞭解時空變遷的學術研究及應用方面，就降低了數位典藏資料庫的可用性與實用性，許多牽涉到結合空間、時間和屬性的查詢與分析也無法處理。本文首先簡介時間的特性以及處理時空資訊時一些具有挑戰性的問題，接著本文將介紹一些時間地理資訊科學的研究與進展，希望藉由這些討論引發從事數位典藏及地理資訊科學的研究學者及其它相關領域的專家來共同探討及促進更有效處理與表達時間的方法，也希望在不久的將來，時間不再被數位典藏地理資訊科學所遺忘。

關鍵字：時間地理資訊科學、數位典藏、時空查詢與分析

*美國田納西大學地理系教授; Professor Department of Geography
University of Tennessee Knoxville, Tennessee 37996-0925 U.S.A. Phone: 865-974-6036
Email: sshaw@utk.edu

Abstract

Human society uses time to coordinate our daily activities. We also use time to record and represent changes in history, culture, environment, and other aspects of our living world. Since most archival data have locational information embedded in them, it is a logical choice of managing digital archival data in geographic information systems (GIS). However, we should notice that time is “lost” in most GIS software in the sense that there are very limited functions available for explicitly handling time in GIS databases. Although digital archives can benefit greatly from geographic information science (GIScience), it is equally important to be able to integrate time into GIS for digital archives. Without adequate functions of managing, querying, analyzing, and displaying spatial, temporal, and attribute data in an integrated environment, the value of GIS in support of research and applications is limited. This paper first discusses major characteristics associated with time and some challenges of integrating spatial, temporal, and attribute data in a GIS environment. It then provides a review of temporal GIScience research to highlight some potential approaches. Hopefully this paper will stimulate interests among GIScience researchers to pursue better ways of representing, analyzing, and visualizing digital archival data in an integrated space-time environment. We will know that we have made progress in the development of temporal GIS when time is no longer “lost” in GIS!

Keywords: temporal GIS, digital archives, space-time query and analysis

一、引言

「時間」是人類社會中不可或缺的重要元素。以個人層面而言，我們每天的生活作息均依據時間來安排；以社會群體而言，歷史的演變、文化的變遷、生存環境的改變，無一不是經由時間來記錄與表達。理論上，如果世界上的所有事物都凍結不變的話，人類社會就不需要時間；換句話說，時間觀念幫助我們瞭解及表達各種事物的變化，缺乏處理時間的能力，也就無法有效地瞭解及表達事物的轉變。如果我們思考一下今天的地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)軟體是如何處理時間以及表達各種事物隨著時間而變化，我們可能會警覺到地理資訊系統許久以來都遺忘了時間。

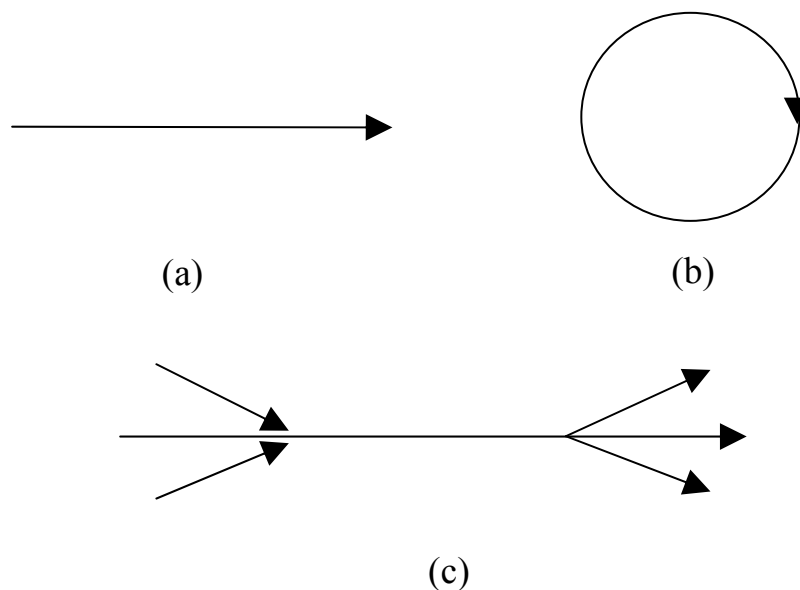
假設我們需要把清朝、日據時代，到現代的台北的街道圖均數位化存入地理資訊系統中，請問您會以何種方式存儲這些不同年代的街道圖？依據您所建立的地理資訊系統資料庫，您是否可以很容易地回答下列問題？

- (1) 請您列出那些街道是在 1945 年台灣光復後修建的？
- (2) 請您列出那些街道的位置曾經變動過(realignment)？
- (3) 請您任選一條主要街道，然後顯示及列出這條街道從清朝到今日的變化(例如街道位置、街名等)。

您的地理資訊系統資料庫是否可以不需要使用者自己在電腦螢幕上一條條地比對街道，就可以自動地回答上述問題？如果您的答案是肯定的，恭喜您！時間在您的地理資訊系統中並未被遺忘。相反地，如果我們在處理數位典藏地理資訊時，忽略了時間所扮演的角色，所生成的數位典藏資料庫雖然仍具有極高的資訊典藏的意義與價值，但是在瞭解時空變遷的學術研究及應用方面，就缺少了有效處理時間要素的功能，而無法滿足學術研究與應用領域的需求。本文將首先簡介時間的特性以及處理時空資訊應該注意的問題，接著將介紹一些時間地理資訊科學(Temporal Geographic Information Science)的研究與進展，希望藉由這些討論引發從事數位典藏及地理資訊科學的研究學者及其它相關領域的專家來共同探討及促進更有效處理與表達時間的方法，也希望在不久的將來，時間不再是被數位典藏及地理資訊科學遺忘的要素。

二、時間的特性

時間具有多種特性，我們在處理數位典藏地理資訊時應該考慮這些特性。首先，時間最經常被概念化成為一條時間軸(timeline)，在這條時間軸上，時間永遠只向前移動，我們稱其為「線性時間」(linear time) (見圖一)。然而線性時間並非表達某些變化的最佳方式，例如季節與潮汐的變換，每日及每周的作息型態與交通流量變化，均具有某種周期性，因此「循環時間」(cyclic time)是另一種表達方式。除此之外，在歷史研究或長期規劃時，我們常有不同的假說或方案，在此情形下，我們則需要「分支時間」(branching time)來處理不同的歷史或者未來的軌跡，因此，時間不應僅是一條簡單時間軸的表達方式。



圖一：(a) 線性時間 (linear time), (b) 循環時間 (cyclic time), (c) 分支時間 (branching time)

時間具有不同的基準點(datum)及參考系統 (reference system)，例如農曆和西曆的差異、國際時區的劃分、中國歷代的紀年。這些不同的時間記錄必須能夠在資料庫中自動轉換，否則當我們比對不同事件的發生時刻或不同資料所代表的時間時，就可能發生錯誤。此外，如同空間資料可以用不同比例尺(scale)和解析度(resolution)來表達，時間資料也可以用秒、分、時、日、月、年或不規則的時間尺度來表達。一般而言，時間資料搜集的尺度和事物變化的速度相關，變化愈快，資料搜集的時間間隔愈小，如何有效地比較不同時間尺度所搜集的資料反映出的不同事物變化，是另一個必須注意的問題。

至於如何在資料庫中記錄時間，以一般地理資訊系統最常使用的關聯性資料庫 (relational database)而言，通常有三種方式。第一個方式是整張關聯表(relation table)僅有一個時間記錄(timestamp)。換言之，此張表內所有記錄的各橫行(tuple or record)均共享同一時間，這就如在同一個地理資訊系統圖層(map layer)中的所有圖貌(map feature)都屬於同一個時間。第二種方式是一張關聯表內的各橫行各自有其自己的時間記錄，這等於在同一個 GIS 圖層中的不同點、線或面可以各自擁有自己的時間記錄。第三種方式則是在每一個橫行中的個別屬性(attribute)可以有自已的時間記錄，因此同一 GIS 圖層中的每個圖貌的不同屬性均有自己的時間記錄。

時間記錄又可分為兩種，一種是記錄某個事件在現實世界中發生的時間，這種時間記錄被稱為「有效時間」(valid time)或「現實世界時間」(world time)。另一種是記錄某事件在何時被輸入資料庫，因此被稱為「交易時間」(transaction time)或「資料庫時間」(database time)。根據一個資料庫是否具有這兩種時間記錄，我們可以將其分為下列四類(見表一)(Worboys and Duckham 2005)。如果一個資料庫兩種時間記錄均無，此種資料庫稱為「快照型」(snapshot)資料庫，無法直接提供關於時間的查詢或分析。如

果某資料庫具有「交易時間」但無「有效時間」，則此資料庫可以回復到以前任何交易時間的狀態，因此稱為「卷回型」(rollback)資料庫。第三種情形是某資料庫僅記錄「有效時間」而沒有「交易時間」，這種資料庫可以追蹤各事件確實發生的時刻，因此稱為「歷史型」(historical)資料庫。如果一個資料庫同時記錄「有效時間」與「交易時間」，則其具有雙重功能，因此稱為「雙時間型」(bi-temporal)資料庫。

表一：根據時間記錄型態的資料庫分類

有效時間 (valid time) 或 現實世界時間 (world time)	交易時間 (transaction time) 或 資料庫時間 (database time)	資料庫 (database)
無	無	快照型 (snapshot)
無	有	卷回型 (rollback)
有	無	歷史型 (historical)
有	有	雙時間型 (bi-temporal)

這些不同時間記錄的方式可以協助我們處理各種事物隨著時間的變化(change)，一般事物的變化可以分為「連續性」(continuous)與「離散性」(discrete)的變化。連續性的變化(例如溫度的改變)我們可以用插值法(interpolation)來推估任何一個時間點的值，離散性的變化(例如地震的發生)則屬於突然性的改變，不適用插值法。另外，我們應該瞭解事物可以有不同形式的變化，一件物體可以發生位置(location)的改變、形狀(geometry)的改變或者屬性(attribute)的改變。如果我們以這三種變化為基礎建立一套變化的分類系統(見表二)，這八種變化的分類對於如何處理典藏資料與地理資訊具有很重要的意義，例如我們要記錄一部運營中公車沿線上下乘客量的變化，則必需同時處理這部公車位置的移動以及上下車乘客的屬性變化。如果我們記錄的是一個颶風的變化，則不僅要處理位置的改變和屬性的改變(如風速)，也要處理暴風圈範圍的形狀改變。這些不同類型的變化，對於資料庫設計的要求也各不相同，想要建立一個資料庫能夠有效地記錄隨著時間各種事物的位置、形狀及屬性變化，並提供資料管理、查詢、分析和顯示的功能，其難度相當高。

表二：根據位置、形狀和屬性的改變對事物變化的分類

位置(location)改變	形狀(shape)改變	屬性(attribute)改變	實例
無	無	無	紀念碑
無	無	有	氣象測站(溫度)
無	有	無	湖泊
無	有	有	森林(樹種)
有	無	無	自行車
有	無	有	公車(載客量)
有	有	無	冰山
有	有	有	颱風(風速)

表四：Sinton 的時間，空間，和屬性的量度架構

	固定(fix)	控制(control)	量度(measure)
可能性一	空間位置	時間	屬性
可能性二	空間位置	屬性	時間
可能性三	時間	空間位置	屬性
可能性四	時間	屬性	空間位置
可能性五	屬性	空間位置	時間
可能性六	屬性	時間	空間位置

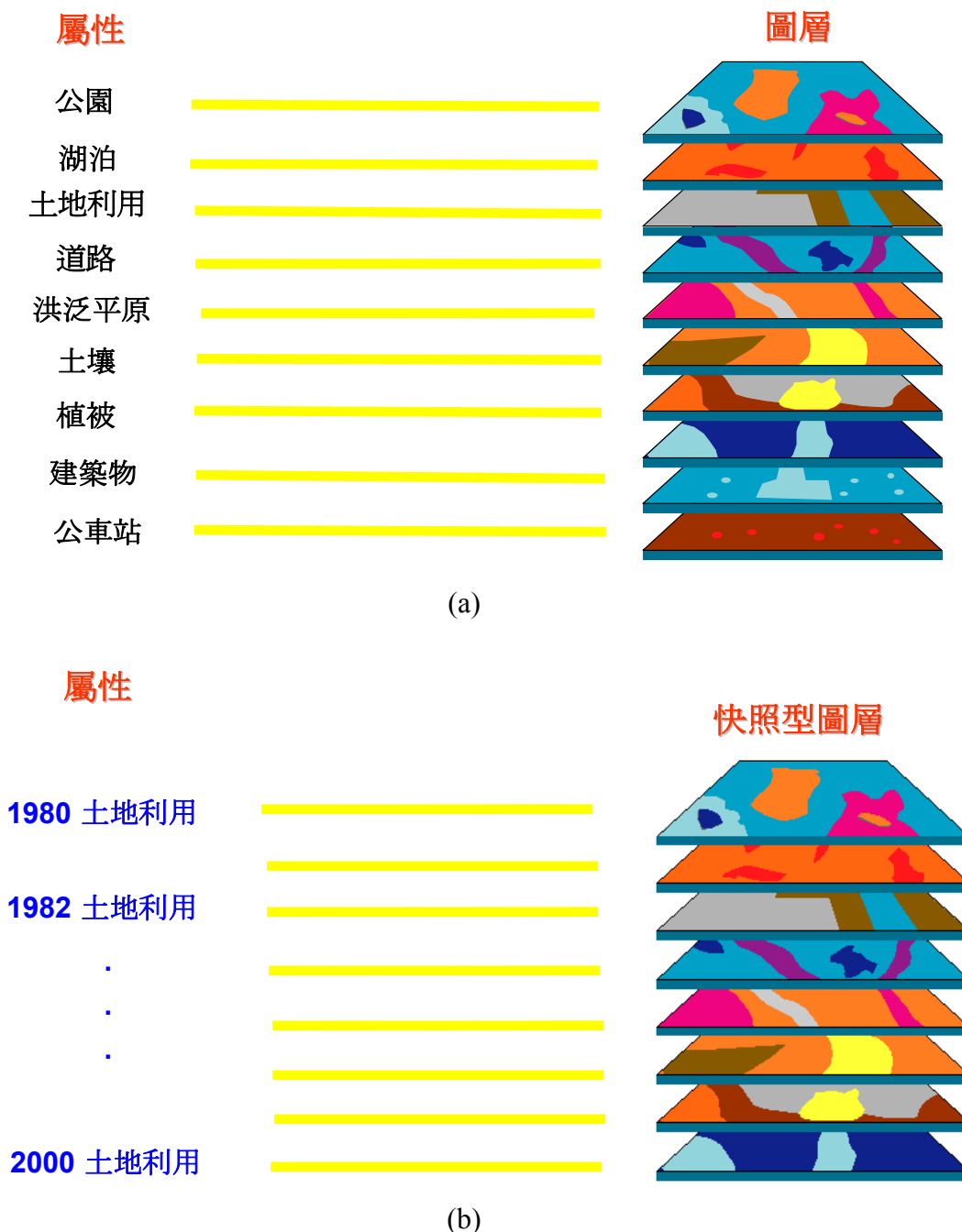
另外我們應注意到的是在處理各種事物的時間資料時，它們可能是時間段(time interval，例如上午 8 至 10 時)、時間點(time point，例如上午 8 時 25 分)、時間延續期(time duration，例如上午 8 時起 2 小時後結束)，或者上述三種時間記錄的組合(例如某教授於上午 9 時至 11 時待在台大地理系館，下午 1 時 20 分再度於台大地理系門口出現，接了某同事後立即駕車離去，下午 3 時返回地理系館並停留了 1 小時 30 分鐘後離開)。上述的時間組合記錄已經不再是處理單一事件，而是處理隨著時間演變的一個「過程」(process)。其實我們研究的對象經常都包含一個或多個過程，例如都市化(urbanization)、土地利用改變(land use change)、人口遷移(population migration)等，均不僅是取幾個時間點的「快照」(snapshot)即可代表其整個演變的過程。因此我們如何能夠建立起反應出演變過程的數位典藏地理資料庫，是一個值得我們追尋的目標(例如 Pang and Shi 2002, Brown et al. 2005)。

三、時間地理資訊系統的研究與發展

地理資訊系統從 1960 年代開始發展以來，重心一直放在空間資料的處理，經過了半個世紀的發展，地理資訊系統在管理、查詢、分析及顯示空間資料上有許多值得稱許的進步與突破。地理資訊系統的普及性也從八十年代後期起急速成長，今日由於 Google Map，Google Earth 及其它 Web 和 Mobile GIS 的廣泛應用，更使得地理資訊系統進入了一般人的日常生活之中，這種發展提供了地理資訊科學繼續向前邁進的環境，同時也向地理資訊科學提出了更多的挑戰。在這許多挑戰之中，其中一項就是如何將時間成功的整合到地理資訊系統中。以最被廣泛使用的 ESRI 地理資訊系統軟體產品而言，一直到 2010 年夏天發佈的 ArcGIS 10，ESRI 才開始提供某些處理時間的功能，這些功能對用戶而言代表了一個好的開始，但是對於滿足時空分析的需求，仍有待許多進一步的發展。

傳統上，地理資訊系統將空間資料存於不同的圖層(layer)中，各圖層間僅有空間的關聯性，而無時間的關聯性(見圖二(a))。如果某一主題(例如土地利用)有在不同時間搜集的資料，我們通常將其依據不同的時間存入不同的圖層(見圖二(b))，這就是典型的「快照型」(snapshot)地理資訊系統。此種表達方式實際上並未將時間真正地整合入地理資訊系統資料庫，時間僅是一個隱含(implicit)的資料，因此這種方式無法有效地處理

各圖層、個別圖貌(map features)，以及屬性(attributes)在時間上的相互關係，任何要查詢、分析或顯示各種資料隨著時間的變化及相互影響均非常困難或者無法實現。地理資訊科學界已經關注此問題許久，尤其是從 Gail Langran 博士論文研究有系統地討論了時間地理資訊系統(temporal GIS)後(Langran 1989 & 1992, Langran and Chrisman 1998)，這個課題就一直被探討，許多不同處理時間的方法也被地理信息科學和其它相關領域的學者提出(請參考 Peuquet 2002)。本文接下來選擇性地介紹過去二十年來被提出過的一些時空整合方法，由於篇幅限制，有些相關的文獻無法在本文中討論(例如 moving objects databases, Wolfson et al. 1998, Güting et al. 2000)，請讀者見諒。

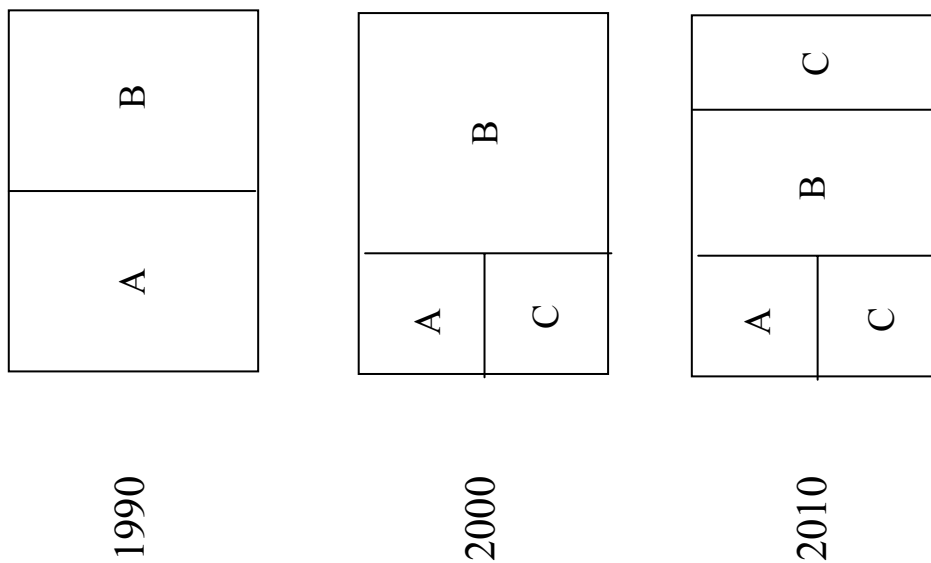


圖二：(a) 地理資訊系統將的圖層(layer),(b) 快照型”(snapshot)地理資訊系統圖層

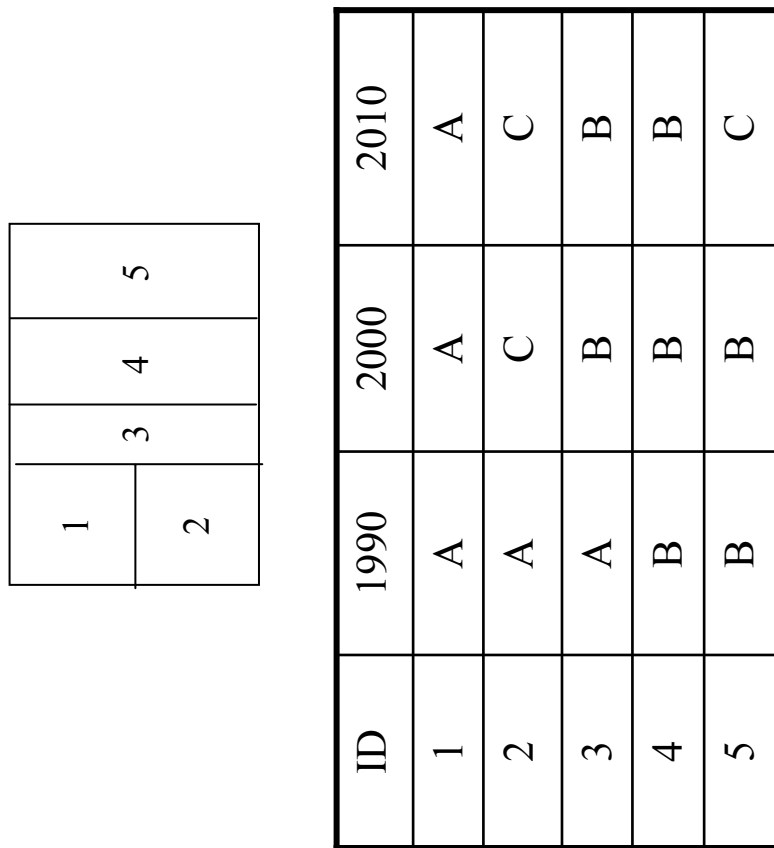
以「快照型」地理資訊系統為基礎，有些學者提出了「時空組合」模型(space-time composite model)來結合時間和空間資料(Langran and Chrisman 1988, Langran 1992)；例如假設我們將 1970、1980、1990、2000 和 2010 的土地利用圖數位化儲存入地理資訊系統中的不同圖層，我們可以將這些圖層全部疊加(overlap)在一起，產生一個組合了不同時間的土地利用圖層。在這個組合圖層中，每一個多邊形(polygon)均記錄了其和每一個原始圖層間的時間關係，而且不同年的屬性資料也全部保存在此組合圖層的資料庫中。圖三提供了一個時空組合的例子，由 1990、2000 和 2010 三個不同時間的圖層疊加後，產生了一個新的時空組合圖層，我們可以清楚地追蹤每一個多邊形隨著時間的變化，此方法因此比傳統快照型地理資訊系統提供了較佳的隨著時間變化的查詢功能，但是此方法的缺點是儲存了大量的重覆資料(redundant data)，而且任何資料更新均須重新進行疊加運算產生新的時空組合圖層。Shaw and Xin (2003)使用時空組合模型在 ArcGIS 的開發環境中實現了前面討論的 Sinton 量度架構，進行了交通和土地利用之間時空互動的研究。

根據時空組合模型的缺點，有些學者提出了「修正模型」(amendment model) (例如 Hazelton et al. 1990, Kelmelis 1991)，此方法是儲存一個「起始狀態」(basic state)的資料庫，然後僅記錄接下來的改變，由於此方法不需重覆處理沒有改變的資料，因此資料量相對減少，但是要重建某一特定時間的圖層，則較費時間。Peuquet 和 Duan(1995)採用了類似的想法提出了「以事件為基礎的時空模型」(event-based spatiotemporal data model, ESTDM)，其基本觀念是將所有造成改變(change)的事件(event)依照時間的次序排成一個「事件目錄」(event list)，此事件目錄中最早的時間點記錄了完整的基本圖層(base map layer)，其後的時間點則僅記錄改變。Peuquet 和 Duan 將此方法實現於柵格地理資訊系統，由於柵格 GIS 中每個格子(grid cell)的形狀和位置是固定的，因此每個實體(entity)的身份(identity)固定不變；然而在向量地理資訊系統中，由於每個圖貌(feature)均各自有其形狀和位置且會隨著時間改變，如果將 ESTDM 應用到向量地理資訊系統就會遭遇到如何認定每個實體的身份是否發生了改變的問題，例如一個聚落從早期的一個小村莊，發展成一個小鎮，再和鄰近的小鎮合併成爲一個城市，雖然這個聚落基本位置沒變，但是其形狀和特性均已隨著時間改變，此聚落是否仍應被認爲是同一個身份或是已改變的身份，成爲在向量地理資訊系統中處理改變的資料一個非常具有挑戰性的問題。如果我們要完整地表達這個都市化的過程，前面所討論的分支時間就可用來表達這些不同實體的身份轉變以及分合關係，此種表達方式可以大幅提高數位典藏資料庫的價值與實用性。

快照型 (snapshot) 圖層



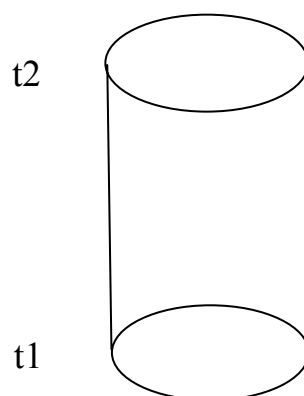
時空組合 (space-time composite) 圖層



圖三：從「快照型」圖層生成「時空組合」圖層

Worboys(1992,1994, 1998)則提出從面相對象(object-oriented)出發的「時空對象模型」(spatiotemporal object data model)以及「空間-雙時間地理資訊系統」(spatio-bitemporal GIS)。時空對象模型以離散對象(discrete objects)的方式來表達不同的實體，每個離散對象由「時空元素」(spatiotemporal atoms)所組成，每個時空元素俱有(x, y)二維座標加上時間(t)的第三維座標(見圖四)。空間-雙時間地理資訊系統則是同時記錄本文前面介紹的「有效時間」和「交易時間」，由於大多數的商用 GIS 軟體仍使用關聯性資料庫，因此 Worboys 的時空對象模型並未被廣泛使用。Yuan(1996, 1999)則提出了「三個領地」(three-domain)的觀念，也就是除了空間與時間外，再加上「語義」(semantic)來更有效地處理較高層次複雜的時空查詢。語義領地(semantic domain)可以用來表達分類(categories)、概念(concepts)、實體(entities)、事件(events)或過程(processes)。空間、時間、和語義之間則透過「領地連結」(domain links)來組合彼此間的關係。這個觀念和 Peuquet 與 Qian (1996)提出的結合空間，時間和圖貌(feature)的「三合一」模型(Triad model)有異曲同工之處。

圖四：Worboys 的「時空元素」



近年來由於全球衛星定位(Global Positioning System, GPS)，手機定位和 Wi-Fi 定位的進步與普及，搜集個人或任何移動物體時空軌跡資料的方便性已大為提高，成本亦大為下降，因此引發了許多學科及應用領域對處理及分析時空軌跡資料的興趣。例如，資訊科學界進行了許多「移動目標資料庫」(moving objects database)的研究，醫學與公共衛生界則用個人時空軌跡資料來協助研究人類健康與疾病和日常生活時空環境之間的關係。地理資訊科學界的許多學者也結合了時間地理學(Time Geography)的觀念發展時空地理資訊系統(例如 Buliung and Kanaroglou 2006; Kwan 2000; Kwan and Lee 2003; Miller 1991; Neutens 2010; Shaw et al. 2008, Shaw and Yu 2009; Yu 2006; Yu and Shaw 2008)，這些研究對於人類活動的時空型態分析(例如 Kwan 1999 & 2000)、種族隔離(例如 Wong and Shaw 2010)、基於位置的服務(Location based service – LBS，例如 Shaw 2010)等不同領域均開拓了新的研究和應用方向。本文作者在美國國家科學基金會的資助下，開發了一套時空地理資訊系統，可提供管理、查詢、分析和顯示個人活動的時空資料以及和其它人與物在實體空間(physical space)及虛擬空間(virtual space)中的互動(例如通過網際網絡或手機的互動)，這個軟體的顯示單元已包裝成 ArcGIS 的擴

充組件(extension)，任何人均可以從作者的網站(<http://web.utk.edu/~sshaw/NSF-Project-Website/default.htm>)免費下載。

近年亦有學者提出可以適用於各種情況的四維 GIS 通用理論架構，例如 Goodchild et al. (2007)建議使用「地理元素」(geo-atom)為最小單元來組成「地理場」(geo-field)、「地理個體」(geo-object)，以及用來處理兩地之間時空互動的「地理雙極」(geo-dipole)。Pultar et al. (2009)及 Pultar et al. (2010)根據這個理論架構將「地理元素」實現為「時空點」(space-time point)，開發出「擴展性動態地理資訊系統」(Extended Dynamic GIS – EDGIS)，具有處理混合性地理場和地理個體時空資料的功能，並且提供了一個動態 GIS 介面的設計，此方向的研究可以說是 Worboys 時空對象模型的延伸發展。

四、結語－為何數位典藏與地理資訊科學需要考慮時間？

基於前述時間地理資訊科學研究發展的回顧，可以看見地理資訊科學界過去二十餘年來一直在尋求更佳的方法將時間整合進地理資訊系統，雖然商業地理資訊系統軟體一直忽略了處理時間的功能，並不代表時間對於處理數位典藏地理資訊不重要。相反地，沒有明確的處理時間功能的數位典藏系統，雖然達到了典藏資訊的目標，但是其實用價值卻受到很大的限制。本文討論的時間特性指出了整合時間、空間與屬性的各種挑戰，僅使用一條簡單的時間軸並無法解決各種時空查詢與分析的需求。ESRI 從今年發行的 ArcGIS 10 開始提供一些基本的處理時間的功能，我們可以預期學術界和一般使用者都會開始對時間資訊的處理與分析投入更多的關注。ESRI 在 2010 年二月於加州 Redlands 總部舉辦了一次 Space-Time Modeling and Analysis Workshop(<http://www.redlandsgisweek.org/participate/space-time.html>)，美國地理學會 (Association of American Geographers - AAG)也將於 2011 年開年會時舉辦一場 Special Symposium of Space-Time Integration in Geography and GIScience(<http://www.aag.org/cs/giscience-research>)，這些會議反映出了時空資訊的整合與分析在地理學界及地理資訊科學界均已成爲一個熱門的研究課題。

絕大多數的典藏資料，無論是以住址、地名、地標、座標、地圖或航空照片等形式，均包含了空間資訊，因此地理資訊系統在數位典藏中扮演著重要的角色。同時，任何的典藏資料都一定有它代表的時間，沒有處理時間功能的地理資訊系統就無法整合典藏資料中的時空特性，許多牽涉到結合空間、時間和屬性的查詢也就無法回答。如果您的數位典藏資訊系統對本文引言中所舉例的問題無法有效地處理，那麼時間地理資訊系統就有潛力增進您的數位典藏資訊庫的可用性與實用性；然而誠如本文所指出的，研發出一個全方位的時間地理資訊系統仍有許多難度甚高的挑戰，希望本文能夠引起數位典藏及地理資訊科學的專家學者共同探討及促進更有效處理與表達時間的方法，讓時間不再被數位典藏及地理資訊科學所遺忘！

致謝

本文其中部份研究成果由美國國家科學基金會資助(NSF Grant No. BCS-0616724)

參考文獻

- Allen, J., 1983. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM* 26, 832-843.
- Brown, D., Riolo, R., Robinson, D., North, M., Rand, W., 2005. Spatial process and data models: toward integration of agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems* 7, 25-47.
- Buliung, R., Kanaroglou, P., 2006. A GIS toolkit for exploring geographies of household activity/travel behavior. *Journal of Transport Geography* 14, 35-51.
- Goodchild, M., Yuan, M., and Cova, T., 2007. Towards a general theory of geographic representation in GIS. *International Journal of Geographic Information Science* 21, 239-260.
- Güting, R., Böhlen, M., Erwig, M., Jensen, C., Lorentzos, N., Schneider, M., Vazirgiannis M. 2000. A foundation for representing and querying moving objects. *ACM Transactions on Database Systems* 25, 1-42.
- Hazelton, N., Leahy, F., Williamson, I., 1990. On the design of temporally-referenced, 3-D geographical information systems: development of four-dimensional GIS. *Proceedings of GISILIS '90* Vol. 1, 357-372.
- Kelmelis, J., 1991. *Time and Space in Geographic Information: Toward a Four-Dimensional Spatio-Temporal Data Model*. Ph.D. dissertation. The Pennsylvania State University.
- Kwan, M-P., 1999. Gender and individual access to urban opportunities: a study using space-time measures. *The Professional Geographer* 51, 210-227.
- Kwan, M-P., 2000. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. *Transportation Research C* 8, 185-203.
- Kwan, M.-P., Lee, J., 2003. Geovisualization of human activity patterns using 3D GIS: a time-geographic approach. In: Goodchild, M., Janelle, D. (Eds.), *Spatially Integrated Social Science*. Oxford University Press, Oxford, 48-66.
- Langran, G., 1989. A review of temporal database research and its use in GIS applications. *International Journal of Geographical Information System* 3, 215-232.
- Langran, G., 1992. *Time in Geographic Information Systems*. London: Taylor & Francis.
- Langran, G., Chrisman, N., 1988. A framework for temporal geographic information. *Cartographica* 25, 1-14.

- Miller, H., 1991. Modeling accessibility using space–time prism concepts within geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 5, 287–301.
- Neutens, T., 2010. *Space, Time and Accessibility: Analyzing Human Activities and Travel Possibilities from a Time-Geographic Perspective*. Ghent, Belgium: Ghent University.
- Pang, M., Shi, W., 2002. Development of a process-based model for dynamic interaction in spatio-temporal GIS. *GeoInformatica* 6, 323-344.
- Peuquet, D.J., Duan, N., 1995. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. *International Journal of Geographical Information Systems* 9, 7–24.
- Peuquet, D. J., and Qian, L., 1996. An integrated database design for temporal GIS. *Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vol. 2, 1–11.
- Peuquet, D., 2002. *Representations of Space and Time*. New York: The Guilford Press.
- Pultar, E., Raubal, M., Cova, T.J., and Goodchild, M.F., 2009. Dynamic GIS case studies: wildfire evacuation and volunteered geographic information. *Transactions in GIS* 13. 85-104.
- Pultar, E., Cova, T.J., Yuan, M. and Goodchild, M.F., 2010. EDGIS: a dynamic GIS based on space time points. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 329-346.
- Shaw, S-L., 2010. Implications of location-based service on human activities (基於位置服務與人類活動的關係和影響), *Communications of the China Computer Federation (中國計算機學會通訊)* 6, 32-37 (in Chinese).
- Shaw, S-L. and Xin, X., 2003. Integrated land use and transportation interaction: a temporal GIS exploratory data analysis approach. *Journal of Transport Geography* 11, 103-115.
- Shaw, S-L. and Yu., H., 2009. A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical–virtual space. *Journal of Transport Geography* 17, 14-149.
- Shaw, S.-L., Yu, H., Bombom, L., 2008. A space–time GIS approach to exploring large individual-based spatiotemporal datasets. *Transactions in GIS* 12, 425–441.
- Wolfson, O., Xu, B., Chamberlain, S., Jiang, L., 1998. Moving objects database: issues and solutions. *Proceedings of Tenth International Conference on Scientific and Statistical Database Management*, IEEE Computer Society, Washington DC, 111-122.
- Wong, D., Shaw, S-L., 2010. Measuring segregation: An activity space approach, *Journal of Geographical Systems*, in press, DOI 10.1007/s10109-010-0112-x.
- Worboys, M., 1992. A model for spatio-temporal information. *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vol. 2, 602–611.
- Worboys, M., 1994. Object-oriented approaches to geo-referenced information. *International Journal of Geographical Information Systems* 8, 385–399.

- Worboys, M., 1998. A generic model for spatio-bitemporal geographic information. In: Egenhofer, M.J., Golledge, R.G. (Eds.), *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems*. Oxford University Press, New York, 25–39.
- Worboys, M., Duckham, M., 2005. *GIS: A Computing Perspective*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Yu, H., 2006. Spatio-temporal GIS design for exploring interactions of human activities. *Cartography and Geographic Information Science* 33, 3–19.
- Yu, H., Shaw, S.-L., 2008. Exploring potential human activities in physical and virtual spaces: a spatio-temporal GIS approach. *International Journal of Geographical Information Science* 22, 409–430.
- Yuan, M., 1996. Modeling semantics, temporal, and spatial information in geographic information systems. In: Craglia, M., Couclelis, H. (Eds.), *Geographic Information Research: Bridging the Atlantic*. Taylor and Francis, London, pp. 334–347.
- Yuan, M., 1999. Use of a three-domain representation to enhance GIS support for complex spatiotemporal queries. *Transactions in GIS* 3, 137–159