

學術論述

半球面影像在森林生態研究的應用

林登秋^{1,3)} 江智民²⁾

摘 要

林下半球面影像可為林冠結構留下永久記錄，因此在森林生態的研究上有很大的潛力。早期以人工分析影像相當耗時，近年來由於電腦影像分析技術的快速發展，使得利用半球面影像來估算林下光照及葉面積指數的應用研究日益普遍，更已推展至林冠受干擾後的回復、苗木生長、棲地品質、森林生產力及植物生理生態等的研究。由於半球影像所攝取的方位與影像範圍對所分析之光立地係數有重大影響，拍攝時鏡頭宜用自動水平架維持水平，並在架上加裝微弱光源(如發光二極體)以界定影像範圍。影像對比程度是影響分析精確度最關鍵的因素，利用天空狀態均質的陰天或日出前的清晨及日落後的黃昏拍攝影像，有助於獲得林冠枝葉與孔隙呈現高對比而較易精確分析的影像，此比事後利用軟體進行影像編修更為實際有效。此外分析者的穩定性，對結果亦有重大影響，只要透過對少量影像進行多次分析即可有效增加穩定性。林下光照多偏離常態分布並易出現空間自動相關，故不符合許多統計分析的基本假說，因此在資料處理時應對此有明確的說明處理。此外利用半球面影像所估測之光立地係數未考量實際天空狀態，因此在比較不同地點的資料時必需非常小心。

關鍵詞：半球面影像、林冠結構、林下光照環境、葉面積指數。

林登秋、江智民。2002。半球面影像在森林生態研究的應用。台灣林業科學 17(3):387-400。

Review article

Applications of Hemispherical Photographs in Studies of Forest Ecology

Teng-Chiu Lin,^{1,3)} Jyh-Min Chiang²⁾

【 Summary 】

Undercanopy hemispherical photographs provide permanent records of canopy structure, and as such have great potential for studies of forest canopy dynamics. Rapid computerized image analysis has facilitated studies of undercanopy light environments and the canopy leaf area index (LAI). Temporal and spatial variations in the undercanopy light environment and canopy LAI derived from hemispherical photographs have been used to study recovery rates of

¹⁾ 國立彰化師範大學地理系，彰化市 500 進德路一號 Department of Geography, National Changhua University of Education, 1 Ginte Road, Changhua 500, Taiwan.

²⁾ 美國肯塔基大學森林學系 Department of Forestry, University of Kentucky, Lexington, KY 40506, USA.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: tclin@cc.ncue.edu.tw

2001 年 10 月送審 2001 年 5 月通過 Received September 2001, Accepted May 2001.

* 本研究蒙國科會研究計畫(NSC89-2621-B018-004-A10)經費補助，特予致謝。

forest canopies after disturbance, seedling growth, habitat quality, forest productivity, and plant ecophysiology. The orientation and range of hemispherical photographs greatly affect estimates of light indices. A self-leveling mount equipped with an LED (light-emitting diode) should be used to level the hemispherical lens and to identify the range of the image. To obtain the best contrast possible, which is critical for image classification and the most important process in image analysis, photographs should be acquired either early in the morning just before sunrise, just after sunset but prior to dusk, or on overcast days. Obtaining images with high contrast can save time and increase the efficiency and accuracy of the image analysis. Consistency of individual analyzers is critical especially when photographs from different sites are to be compared; it could be improved by re-analyzing small numbers of photographs. Undercanopy light levels often show spatial autocorrelation and lack of independence; and therefore violate assumptions required for many statistical procedures; they must be treated explicitly. In addition, the light environment estimated from hemispherical photographs does not take into account sky conditions, so such data from different sites must be compared with care.

Key words: hemispherical photographs, canopy structure, undercanopy light environment, leaf area index.

Lin TC, Chiang JM. 2002. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan J for sci* 17(3):387-400.

一、緒言

(一) 半球面影像的本質與特色

半球面(魚眼)影像是以接近 180° 之超廣角鏡頭所攝取之影像，在森林研究的應用上一般皆是由下方向上拍攝以取得林冠的影像。林下半球面影像提供了全空域的視野所形成的圓形投影，影像的中央即為天頂，邊緣則為地平線(Fig. 1)。在由林下向上拍攝的影像中，東方在北方的逆時鐘方向，西方則在其順時鐘方向，每一個天空中的位置均可以由其天頂角 θ (即其與天頂的夾角) 和方位角 α (即其與北方的夾角) 來表示(Fig. 1A)。多數半球面鏡頭為等角投影(equiangular projection)，其影像中天頂角的角度(θ)大小與其在半徑上的距離(r)成正比(Fig. 1B)。因為這些特色，所以影像中孔隙的位置及大小可以由天頂角及方位角來精確推算。

林冠半球面影像可為拍攝當時之林冠疏密程度及孔隙分布留下永久記錄。只要知道影像攝取地之經度、緯度及海拔高度，由地球物理的推算，便可以得到當地全年之太陽移動軌跡。而由林冠孔隙在影像中的分布位置及大

小，配合太陽軌跡便能推算太陽輻射會在何時自何處直接穿透林冠孔隙，亦可估計有多少比例的直射光與散射光會從林冠孔隙進入林下，因此林冠半球面影像可以直接用來估算林下光照。雖然半球面影像的原理並不複雜，但在個人電腦發展之前，計算林冠孔隙必需耗費很大的人力與時間，因此限制了應用的普及性。1980年代開始個人電腦快速發展，許多研究團隊及個人開發出半球面影像分析軟體(Chazdon and Field 1987, Becker et al. 1989, Rich 1989, 1990)，使得影像分析計算有了快速的進步，利用半球面影像所進行之生態研究亦隨之大幅成長(Canham et al. 1994, Bellingham et al. 1996, Pearcy and Yang 1996)。

(二) 半球面影像應用在森林生態研究的歷史

半球面鏡頭(即魚眼鏡頭)乃由 Hill (1924) 設計來提供全空域的視野以研究雲的發生，在二十世紀中期開始被應用來研究森林林下的光照環境，最初的應用是將太陽軌跡圖套疊在半球

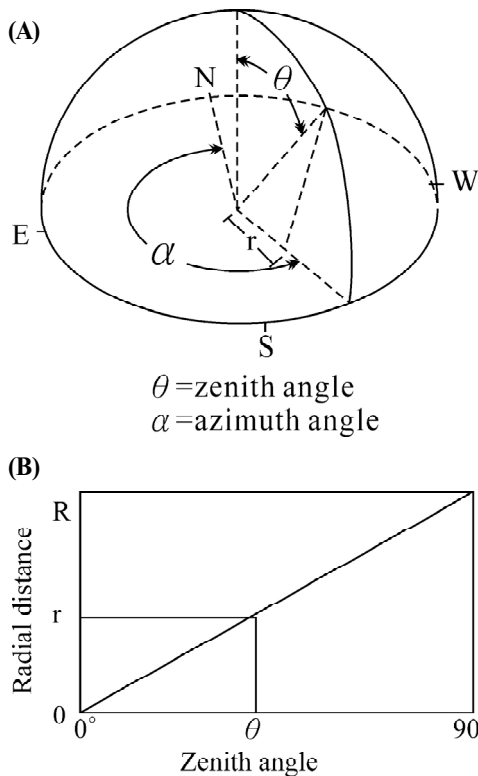


Fig. 1. Projection of a hemispherical photograph looking upward. A) Projection of a hemisphere in directions on a plane for which each sky direction can be represented by angular coordinates, a zenith angle θ , and an azimuth angle α . B) Equiangular projection with distance along the radius being proportional to the zenith angle. (Adapted from Rich 1990)

面影像上方，從而計算光照穿透林冠孔隙進入林下的情形(Evans and Coombe 1959)。Anderson (1964)在1960年代就以地球物理的原理，利用半球面影像配合太陽軌跡發展出一套相當完整的方法，可以計算出光照由不同空域穿透林冠的情形。

經過三十多年的發展，半球面影像除了被廣泛用在林下光照環境的研究之外，研究人員更透過分析半球面影像來估算林冠的葉面積指數(Bonhomme and Chartier 1972, Leong et al. 1982, Chen et al. 1991, Martens et al. 1993, Whitford et al.

1995, Comeau et al. 1998)。其中利用孔隙率(gap fraction)推估林冠結構(Campbell 1986, Marshall and Waring 1986, Norman and Campbell 1989)來計算葉面積指數已被許多半球面影像分析軟體，例如 HmiView (Delta-T 2000)和 GLA (Frazer et al. 1999)所採用。由於電腦影像分析技術的快速進步，最近幾年內相關的研究有大幅成長的趨勢，但國內一直到了最近才有研究人員將半球面影像應用來研究林下光照與林冠葉面積指數(Lin et al. 1999, 2001, Ma 1999)。本文的目的即在介紹半球面影像在森林生態的研究背景、歷史、最近發展、潛力及其限制與挑戰。

二、半球面影像在林下光照研究的應用

(一) 林下光照的重要性

由於林冠的覆蓋，成熟的熱帶及溫帶森林林下光照一般只及林外光照的5%以下(Chazdon and Fetcher 1984, Turton 1992, Smith et al. 1992, Clark et al. 1996)，使得光照成為限制此等森林林下植物生長與分布的重要因子。因此了解林下光照環境的時空變異，有助於深入探究林下植物的生長分布及生產力。由於林下小苗的生長關係著未來林分的發展及冠層樹種的組成，林下光照因其對樹苗生長的影響也關係著森林的更新(Lawton 1990)，所以定量林下光照環境為研究森林動態的重要一環。

(二) 林下光照監測之困難與限制

由於林外光照除了地形遮蔽外，並未受到林冠的影響，故在小範圍內變異不大，而可用光量子感應器(quantum sensor)在少數定點進行測量。反之在林下特別是闊葉混生林的林下，由於林冠組成十分複雜，所以林下光照在短短幾十公分內，就可能有著極大的變異。若以光量子感應器在少數定點進行測量，顯然不易得到能充分代表林下的一般光照環境。有鑑於此，部分測量光照之儀器有一長約1m之光感應桿(如 Cepetometer, Decagon Device Inc.)，可以測得稍大距離內之平均光照情形。此類桿狀儀器通常用以紀錄測量當時之光照，但光照在很

短的時間內，即可能因為天空狀態的變化而有極大的差異，例如風大雲多的日子，在一分鐘內，天空就可能由陽光普照變為浮雲遮日。無論是點狀的光量子感應器或是條狀的光感應桿，若要取得林下光照之長期變動情形，必需連接至記錄器進行長期監測，但在有限的經費下，此類方法不易在距離較遠(如 100 m)的多個地點同時進行測量。

宜蘭技術學院梁亞忠助理教授設計了軌道式測量系統，在東北部的福山試驗林研究低海拔天然闊葉林林下透光率(transmission rate)之特性，配合空間統計(spatial statistics)分析林下太陽輻射在小範圍內之空間變異特性(Liang 1998, Liang et al. 1999)。利用軌道式測量系統進行監測可以掌握斑光在小範圍內(數十公分之內)的差異，但仍難以掌握林下光照在較大範圍的變化。例如在稜線與坡面上林木組成之差異即可能造成林下光照很大的不同；不同坡向、坡度的林下光照亦會出現很大的差異(Clark et al. 1996)；在更大的尺度上，相鄰的不同林分，如闊葉林及針葉林、天然林及人工林，光照環境亦會隨之而有差異(Canham et al. 1990)。若要利用條狀測量系統來掌握林下光照在大尺度上的變異，則所需的感應器數量必然很大，再加上記錄器及接線，所需之經費使得此種監測方法的實用性大受限制。而半球面影像技術則具有取樣速度快及移動性強的優點，非常適合較大範圍長期監測林下光環境的變異。

(三) 林下半球面影像與林下光照

由半球面影像可以計算出林冠的孔隙率(gap fraction)及穿透林冠的直射與散射光立地係數(direct site factor, DSF; indirect site factor ISF)。孔隙率是指孔隙在影像中所佔的比率；光立地係數是指相較於林冠上方(或林外無遮蔽處)，林內所能獲得光照之比率。故直射光立地係數是指直射光穿透林冠孔隙進入林下的比率；散射光立地係數是指散射光穿透林冠孔隙進入林下的比率(Rich 1989)。直射光立地係數與散射光立地係數均介於 0-1 之間，當立地係數接近 1 時表示林冠少有遮蔽，故林下所能得到的光量與林

冠上方(或林外無遮蔽處)相當；反之當立地係數接近 0 時表示林冠非常鬱閉。散射光與直射光立地係數的計算不同，因為只要太陽升起，即使所在位置看不到太陽，或者太陽被雲層所遮蔽，散射光仍可進入林下，故散射光立地係數與孔隙率有密切的相關。而即使在大型的林冠孔隙下方，如果不在太陽運行的軌跡上，直射光仍無法進入。故直射光立地係數除了與孔隙率有關外，尚與孔隙的位置有關(Rich 1989)。

除了直射光與散射光立地係數之外，若在林外或林冠上方有氣象塔可提供太陽輻射的長期監測資料，如全天日輻射量(global radiation)與直射光量、散射光量、光合作用有效輻射量(photosynthetically active radiation, PAR)等佔全天日輻射量的比率，則可由直射光與散射光的立地係數推估林下直射光量、散射光量、PAR 及這些數值在短時間(以小時計)與長時間(以季節與年計)的變化。部分半球面影像分析軟體，在分析時會要求使用者輸入林冠上方(或林外)的光照資料，而在輸出時可提供林內之直射光量、散射光量及 PAR 等之估計值。

(四) 林下半球面影像在林下光照研究的應用概況

林下半球面影像在林下光照的研究應用範圍相當廣泛。除了可以直接用以探討林下光照環境之外(Canham et al. 1990, Smith et al. 1992)，亦有研究利用在林下不同高度所拍攝之半球面影像來評估林下光照環境的垂直變化及其與樹高生長的關係(Lerdau et al. 1992, Fournier et al. 1997)。而由於林下小苗的生長受光照影響甚大，因此有研究利用半球面影像所求得之光立地係數來探討林下光照與小苗生長間的關係，並進一步比較不同樹種小苗對光的需求差異及此差異在演替與林分更新上所扮演的角色(Turner 1990, Clark et al. 1993, Canham et al. 1994, Nicotra et al. 1999)。光照也會影響水的蒸發散，因此林下半球面影像也曾被用來探討林下光照與土壤水間的相關性(Lin et al. 1992, Breshears et al. 1997)，對半乾燥及有週期性旱季地區的森林而言，林下光照、土壤水分及林冠結構可能有著密切且交錯的關係，而半球面影像正可用以

探索此一糾結的現象。

針對單株植物，半球面影像也可以用來評估短時間內太陽直射光穿透植冠進入該地點(即所謂斑光 sunfleck)的時空變化情形及其對特定植物生長及生理的影響(Oberbauer et al. 1993)。Percy and Yang (1996)也利用半球面影像來探討在孔隙內、孔隙邊緣及林下的樹苗之光反應曲線(light response curve)以及同一株植物不同位置葉片的光反應曲線。此類型研究將半球面影像研究的應用伸展至植物生理生態、樹冠立體結構乃至於植物的生活史策略(life history strategies)。

許多干擾(如颱風、蟲害)對森林最明顯的影響為林冠的破壞，林冠的破壞會使得穿透林冠的光照增加，因此許多研究利用林下半球面影像來評估干擾對林冠的破壞程度以及在地景階層上，干擾受地形及植群組成等影響所呈現的空間異質性(spatial heterogeneity)。另外由於每一張半球面影像都是林冠結構的永久記錄，因此比較干擾前後在相同地點所拍攝的影像，可直接用以定量干擾對森林的破壞程度。而在干擾後不同時間所拍攝的影像則可用來探討干擾後林下光照及林冠的回復情形(Bellingham et al. 1996, Lin et al. 2001)。

除了在林木生態的研究外，由林下半球面影像所得到的光立地係數亦曾被用來評估森林棲息地的品質。一項利用半球面影像分析對過冬蝴蝶在森林棲息地選擇的研究發現，過冬蝴蝶在森林中選擇的棲息地，其直射光與散射光立地係數均只在一個相當侷促的範圍內(Weiss et al. 1991)。該研究指出此乃由於光立地係數過高處溫度較高，會提高蝴蝶的代謝而快速消耗其所貯存的脂肪；光立地係數過低則會降低蝴蝶的代謝而妨礙其在春季適當的時間遷移。

三、半球面影像與林冠葉面積指數的研究

(一) 葉面積指數之重要性

林冠是森林生態系與外在環境，如太陽輻射、雨水或其它大氣沉降物(例如氮氧化物、硫氧化物及臭氧等污染物)接觸反應的重要介面，

故林冠結構對森林生態系的能量流動、水文及營養循環均扮演著關鍵性的角色，而監測研究林冠結構及其變動也是瞭解森林生態系與環境之間交互作用的重要依據。例如，干擾(如颱風、火災)前後林冠結構變動的情形可用以評估干擾對森林生態系的影響程度，干擾後林冠回復的情形可做為森林對干擾適應的重要指標，位在不同地形的林冠在干擾前後變動的差異，則有助於瞭解地形因子如何與其它環境因子(如颱風、東北季風與日照)共同影響森林生態系的結構與功能。

葉子是林冠最重要的組成分子，也是光合作用的工廠，葉面積指數(LAI, 單位面積上的葉面積)的多寡與森林生態系的初級生產力有密切的關係(Gholz 1982, Waring 1983, Webb et al. 1983)。葉面積指數也經常被用來比較在不同環境條件下林冠發展的差異，更有研究指出，葉面積指數的變動可做為森林生態系承受環境逆壓的指標(Waring 1985)。大範圍長期的監測葉面積指數更可以用來研究林冠在地景階層上所呈現的異質性，而干擾(如颱風)前後在地景階層上葉面積指數變動的差異，亦可用以評估地形因子對於干擾的增強或緩衝的情形(Lin et al. 1999)以及不同林相適應干擾的能力。

(二) 葉面積指數之測量

測量葉面積指數有許多困難(Baldocchi et al. 1984, Daughtry 1990, Martens et al. 1993)，破壞性的直接砍伐測量，一般只能在非常局部的地方實行，在地形起伏多變的山地森林，其代表性有待商榷，特別是對樹種組成複雜的混生林尤其如此；用邊材面積與葉面積的關係來估算葉面積指數(Whitford et al. 1995)，需考量二者的關係不僅受局部立地狀態如坡度、水分等影響甚大，亦會隨樹種之不同而有很大的差異；以收集落葉的方式來測量葉面積指數(Marshall and Waring 1986)，需假設林分葉面積已達平衡及推算葉片的更換率。此法在溫帶落葉林中偶見應用，在混生常綠闊葉林，複雜多樣的樹種使其應用更受限制。

衛星影像的分析也可用來估算葉面積指數

(Running et al. 1986, Smith et al. 1991, Curran et al. 1992, Cheng et al. 1997, Serrano et al. 2000)。衛星影像分析技術主要是利用由紅光及近紅外光二波段的光所得到之 NDVI (normalized difference vegetation index) 或近紅外光對紅光之比值(NIR/R)，來估算葉面積指數。應用此一技術除了要處理非林冠因子(如水氣)對影像產生的影響之外，所得之 NDVI 或 NIR/R 值需先與地面利用其它方法所測得之葉面積指數進行迴歸分析，而許多研究所得之迴歸係數並不理想(Cheng et al. 1997, Ma 1999)。若地面葉面積指數實測是利用條狀光度計取得林內及林外之光照再利用孔隙率法推求，則如前所述，將因經費及時間的限制，只能在小範圍內進行。而衛星影像涵蓋的範圍卻非常大，以小區域的地面測量結果與大範圍衛星影像分析的結果進行迴歸，其有效性尚待進一步驗證。此外，由於衛星影像分析的範圍常遠大於試驗集水區的範圍，因此若要用以探討小集水區內不同地點的葉面積指數的差異，解析度是另一項必需考量的問題。

(三) 半球面影像技術在估算葉面積指數之應用

半球面影像技術以孔隙率分析法間接估算葉面積指數；近年來有許多應用孔隙率估算葉面積指數的研究發表(Campbell 1986, Martens et al. 1993)，相關的測量及分析儀器設備的快速發展，使得此一方法漸廣被接受(Norman and Campbell 1989, Fassnacht et al. 1994)。孔隙率分析法的基本概念是，林冠葉面積指數可以由測點在不同天頂角度所測得之林冠孔隙率推求(Norman and Campbell 1989)。林冠孔隙率除了可以由林冠的半球面影像算得外，亦可由地表斑光面積、或光穿透林冠的比例求得。或許因為測量葉面積指數的需求日甚，現在已有許多光學儀器可用以測量林冠的孔隙率(如 Ceptometer, LI-COR LAI-2000 植冠分析儀等)，而分析數位化的林冠半球面影像則是近幾年漸受重視的方法。

(四) 以 LI-COR LAI-2000 植冠分析儀測量葉面積指數

LI-COR LAI-2000 植冠分析儀可算是半球面影像原理的一項應用，此儀器以一個近似半球面的鏡頭在五個天頂角 7° 、 23° 、 38° 、 53° 及 68° 測得的散射光穿透率來計算光在每個天頂角與林冠的接觸次數(contact number, $K(\theta)$)，再以下列的公式求得葉面積指數(LI-COR 1992)。
$$LAI = 2[0.03K(7^\circ) + 0.10K(23^\circ) + 0.16K(38^\circ) + 0.21K(53^\circ) + 0.50K(68^\circ)]$$

但植冠分析儀在應用上研究人員看不到半球面影像，無法將影像保存，不需亦無法對影像進行處理。此種方法在農業科學上的應用非常廣泛，在森林的研究上也相當多，有興趣者可參考 Welles (1990) 及 Welles and Norman (1991) 等對此方法的深入討論。

(五) 利用半球面影像估算葉面積指數

由半球面影像所得的孔隙率，利用 Beer-Lambert Law (Martens et al. 1993) 也可以估算葉面積指數，其基本原理是穿透林冠的輻射量(或比率)會隨著葉面積的增加而減少，在假設林冠葉片無論是在水平或者垂直方向都是均勻分布的條件下，孔隙率與葉面積指數之間的關係可以用以下的公式表示(Delta-T 2000)：

$$G(\theta) = e^{-k(\theta)L/\cos(\theta)};$$

其中 G 是孔隙率、 k 是消光係數、 L 是葉面積指數、 θ 是天頂角。在估算葉面積指數的過程中，利用重覆倒置模式(iterative inversion model) 可由孔隙率的分布和天頂角間的關係求導出葉面積指數。在此所謂倒置是因為推算過程中，並非由林冠的葉子分布來推導孔隙率，而是反過來由孔隙率來推導葉子的分布從而推估葉面積指數(Delta-T 2000)。必需特別注意的是，在計算林下光照時，無論遮蔽天空的為林冠或者是地形(如山坡)，並不影響林下光地係數估測的準確性，但在計算葉面積指數時，顯然必需區分林冠與其它的遮蔽。多數分析半球面影像的軟體，均能處理此一問題，惟影像分析時需知每個影像的地形效應可能不同，必需分別處理。例如在分析由稜線至溪谷所拍攝的多個影像時，每個影像的地形遮蔽效應就會有明顯的差異。

利用半球面影像估算葉面積指數可以在相對較短時間內於較大的範圍取樣，且雖然半球面影像也是一種遙測技術，但比衛星影像較接近地面，所測量的範圍較小，除了與其它測量葉面積指數的方法如砍伐法及點狀光量子感應器(如 quantum sensor)與條狀輻射感應器法(如 Ceptometer)所得之結果較能直接比較對照外，與在集水區內的其它研究，如枯枝落葉的監測、小苗的生長與更新等能緊密結合，故應用有日漸普遍的趨勢。

(六) 半球面影像在估算葉面積指數的研究概況及其與其它方法之比較

因林下半球面影像可直接利用孔隙的大小、多寡及位置來估測直射光與散射光立地係數，故在林下光照環境的應用研究範圍非常廣泛。相對的，以半球面影像來估算葉面積指數則加入了更多的假說(如林冠葉子的分布型態)，故半球面影像在估算葉面積指數的研究，多以評估其有效性、準確性及與其它估算方法所得結果的一致性為主(Whitford et al. 1995, Chen et al. 1997, Comeau et al. 1998)。被用來與半球面影像比較的方法有：破壞性砍伐法、邊材迴歸法、落葉收集法、前述的 LAI-2000 植冠分析儀以及光量子感應器的孔隙率法等(Welles 1990, Chason et al. 1991, Welles and Norman 1991, Fassnacht et al. 1994, Sampson and Allen 1995)。多數的比較研究指出，各種估算方法未能產生一致性的結果，而且難以評估熟優熟劣。但這些研究亦指出，含半球面影像在內的多數方法，對同一林分不同時期的葉面積指數估計值之變化頗有一致性，並認為這些方法雖難以測得實際葉面積指數，但可提供頗為可靠之相對葉面積指數。故利用半球面影像對特定林分之葉面積指數長期監測，不失為一個有效而便利的方法。

四、應用半球面影像之限制及誤差來源

(一) 影像攝取

為了增加影像分析的準確性，拍攝林下半

球面影像時需力求林冠枝葉與孔隙有最大的對比。為取得對比最大的影像，必需儘量降低林冠反射光線的情形。因此影像之拍攝一般均以高感光底片(ASA400 以上，黑白彩色皆可)，在天空狀態較為均質的陰天，或者在清晨日出前或日落後天黑前進行。近年來已有數位相機可以搭配專用的魚眼鏡頭，可以免去底片的使用以及之後將底片數位化的工作。目前已有研究將數位相機與傳統相機所得之結果進行比較並指出，較之傳統相機，數位相機因為免去底片安裝、沖洗、數位化等工作，故為更經濟簡便的選擇。惟或因傳統相機底片曝光不足、鏡頭品質的差異及視野的差異，造成數位相機分析的部分結果與傳統相機與底片分析所得結果有所差異(Englund et al. 2000)。

在攝取影像時，因為不同傾斜角度所看到的林冠及天空影像不同，因此拍攝影像時鏡頭必需保持水平。在平坦的林地，可利用簡單的三腳架來維持鏡頭的水平，但在每次移動腳架後均需重新調測相當耗時，加上如前所述，適合影像拍攝的時間有限，因此一般是利用自動水平架來保持水平(Fig. 2)。自動水平架可以自行設計也可以向儀器公司購買，但部分儀器公司所設計的水平架太重，在崎嶇的山地搬移相當困難。研究者應在使用半球面影像技術前對此有完整的了解，才能找到合適的水平支持系統。

除了水平問題之外，方位及影像範圍的確定亦是影像攝取時必需注意的項目。在影像分析時一般是將上方設為北方，因此拍攝時必需



Fig. 2. Self-leveling mount system for hemispherical photograph acquisition with the top of the camera oriented north.

確認影像的上方為北方，否則上下倒置，所得之直射光立地數將因太陽軌跡在影像中位置的錯誤而有重大的誤差。由於林下半球面影像的邊緣多為樹幹及樹冠密集的地平線，故呈暗色，此與底片之原色相近，易造成分析時判斷影像範圍的困難，而增加誤差的來源。為避免此一問題，可在固定相機之水平架上，於鏡頭的邊緣上下方分別加裝一個微弱光源如發光二極體(light-emitting diode, LED)，在分析影像時可藉以界定影像範圍，惟光源不可過強否則將對影像內容產生影響。

(二) 影像分析

半球面影像分析的最基本步驟為將影像分為林冠枝葉及孔隙兩類，由於林冠會阻礙光線之穿透，所以枝葉部分的影像會較孔隙為暗，據此以區分孔隙與枝葉，進而算出林冠的孔隙大小及分布位置。但林冠枝葉及孔隙的判定至今仍是此一技術最難克服的誤差來源。欲精確的區分孔隙與枝葉，影像光影的對比是最大的關鍵，由於接近地平線的地方光量偏低，故如果孔隙出現在偏暗的地平線附近，則孔隙的亮度可能較在中天位置之枝葉為低，而被誤判為枝葉。此一情形雖可藉由將影像亮度提高來進行修正，但易造成接近中天位置之枝葉被誤判為孔隙。部分影像處理分析程式特別強調是彩色的半球面影像處理分析軟體，能利用紅綠藍三色來增加影像對比的可能性(Frazer et al. 1999)，但作者經驗顯示此一功能對於林冠反射光線所造成的問題，仍難克服。大部分的事後影像編修對影像中如觀測塔等非林冠物體的修正有相當好的效果，但對於由林冠反射光所產生的問題，則非常難以進行修正。而且即使是微弱的直射光也可能造成影像分析的困難。因此雖然在黎明或黃昏時於山區拍攝影像非常辛苦，但為求分析結果之準確，若無天空狀態均質的陰天可以利用時，仍應於黎明或黃昏進行影像的拍攝。

早在 1980 年代就有研究者發展出分析半球面影像的技術及軟體(Jupp et al. 1980, Chan et al. 1986, Chazdon and Field 1987)，文獻上較常見使

用的半球面影像分析軟體有 CANOPY(Rich 1989), SYLVA (Becker et al. 1989)以及 GLI/C (Canham 1995) 等三大類。這三類軟體近年來均有重大的改變，使用更加方便。例如 CANOPY 便有完全不同的介面及操作系統而以 HemiView 的名稱問世(Delta-T 2000)，GLI/C 最近則更新為 GLA (Frazer et al. 1999)使用者可免費自網路上取得(<http://www.rem.sfu.ca/forestry/index.htm>)。在網路上還有其它分析半球面影像的共享軟體(如 WinPhot, ter Steege 1996)，有興趣的研究者可自行尋找，但正式使用前，最好將同一影像用較廣為應用的軟體比較分析，否則在文章中需對所用軟體的分析計算原理詳細介紹，讀者才得以評估該軟體的有效性。對於不同影像分析軟體特點的評析不在本文探討的範圍，多數的軟體使用說明中均可找到該軟體與其它軟體的比較。

值得一提的是，不論用何種軟體進行分析，在影像分類時，均是由分析者決定一個臨界值(threshold)，一旦決定後，影像依此值分為黑白兩色，黑色部分均被判定為林冠枝葉，白色部分則判定為林冠孔隙。此值完全由分析者主觀決定，因此分析者不同，結果可能亦隨之不同。且若分析者的穩定性不足，則同一分析者在不同時間分析同一影像所取用之臨界值亦可能不同，結果自然有所差異。不同影像對臨界值的敏感度不同，以 Fig. 3 為例，若將臨界值同樣由 100 改為 120(變暗)其所估計之林下散射光與直射光立地係數之變化，上圖(Fig. 3A)分別為由 0.166 及 0.159 變至 0.149 及 0.142，下圖(Fig. 3B)則分別由 0.291 及 0.248 變至 0.255 及 0.218，同樣的臨界值改變對下圖的影響影然高於對上圖的影響。因此影像分析時可由兩人共同分析，以減少個人主觀所產生的偏差(Lin et al. 2001)。對於許多研究而言，分析者的穩定性可能較不同分析者的一致性更為重要，因為一個穩定性高的分析者若因主觀產生偏差，其偏差是一致的，因此若比較同一林分不同時期或不同林分的影像時主觀所產生的偏差，對於比較結果影響較小。作者的經驗顯示將約 20 張影像連續重複分析四次以上，每次分析後立即進行

(A) *Cryplomeria japonica*



Threshold = 100
ISF = 0.166 DSF = 0.159

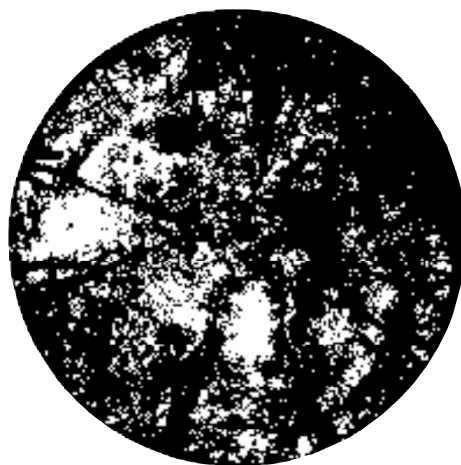


Threshold = 120
ISF = 0.149 DSF = 0.142

(B) Natural hardwood forest



Threshold = 100
ISF = 0.291 DSF = 0.248



Threshold = 120
ISF = 0.255 DSF = 0.218

Fig. 3. Changes of light indices as a result of changing thresholds of image classification.

比較，可以有效的增進分析的穩定性。此外即使有經驗的分析者也可能會出現某種分析傾向而影響分析的結果，例如在分析過程中，分析者可能會有漸漸將臨界值降低(增加亮度)以避免將接近地平線影像較暗處之孔隙誤歸為林冠枝葉的錯誤，但同時卻可能造成將接近天頂之林冠枝葉歸為孔隙的錯誤。若分析者從第一條樣線漸次分析至第六條樣線，則可能造成不同樣

線之分析標準不同的現象。如此在比較光照環境的差異時，不同樣線間的差異除了可能反應真實差異外，亦可能是分析標準不同所造成。要降低此一誤差，分析者在分析時，可將影像隨機編號後再依編號順序分析。

(三) 資料比較分析

半球面影像可以相當快速的在較大的範圍

估測林下光照環境及葉面積指數，因此相當適合用來比較不同環境下(不同林分或相同林分不同地點)的光照環境或葉面積指數。但是使用者必需注意，緊鄰地點仰視的林冠結構必然十分相似，亦即在非常接近地點所測量到的光照環境可能並非獨立的(Becker and Smith 1990)。而許多的統計分析如常用來比較平均值大小的變異數分析及探討因子間關係的迴歸與相關，均假設所取的樣本內的資料是獨立，因此研究者進行統計分析前必需先檢定樣本內資料之間的獨立性。若資料間並非獨立的，可以利用空間統計先由樣本內取得獨立的次樣本(subsample)再進行統計分析。Lin et al. (2001)在福山試驗林的研究發現 5 m 的間隔取樣，就可得到獨立的資料；Clark et al. (1996)在熱帶雨林的研究則發現間隔 15 m 以上，多數的林下光立地係數才是互相獨立的。這顯示林下光照的空間自動相關(spatial autocorrelation)情形會因森林不同而有差異，因此在取樣前，研究者應先檢驗此一問題，以避免耗費大量時間與經費攝取許多難以分析的資料。

除了空間自動相關的問題外，林下半球面影像主要的應用之一是評估林下光照，而林下光照常見的另一項問題是資料常不符合常態分布。因為在少數倒樹形成的孔隙中或林冠被破壞之處，林下光照會明顯較高，所以光照資料的分布常呈左偏(left skewed)。而常態分布也是上述統計分析時必需符合的假說，且此一問題並不能以擴大取樣間隔克服，而應以無母數統計(nonparametric statistics)來進行分析(Lin et al. 2001)。

即使是資料之間是獨立的且呈常態分佈，在進行不同地點的光照環境比較時尚需注意所比較的是實際光照或潛在光照。部分影像軟體(如 Hemiview)所提供的結果為光立地係數，此為潛在光照，為相對於林冠上方所能得到的光照比率，但此計算並不考慮天空雲霧狀況對光照的影響，因此用來比較不同地點之光照時需格外小心。例如，若以兩個森林所拍攝之林下半球面影像，估算林下光照並評估其對樹苗生長的影響時，就不能忽略天空狀況不同所產生

的影響。假設兩地所算得之平均林下光立地係數(無論直射光或散射光)分別為林外的 5% 及 3%，但前者經常雲霧迷漫，後者卻總是陽光普照，則用相對於林外的光照量高低來評估兩地的光照量或解釋兩地樹苗生長的差異，顯然是有待商榷的。部分軟體如 GLA，在計算過程中使用者可輸入研究地點林冠上方光照及雲霧狀況，因此能克服此一問題，但先決條件為在研究地點或附近有氣象的監測可以提供輻射資料以及雲霧狀況。即使是在同一個森林不同的樣線間的光照比較也需要非常小心，例如兩條樣線分別在坡度相似的南向坡與北向坡，若其直射光或散射光立地係數相當，並不能據此論定兩條樣線所得到的實際直射光量或射散光量相當，以東北部的福山試驗林為例，在夏季上午多為晴天，一過了中午則易風生雲起，故雖然直射光或散射光立地係數相同，實際光照卻可能有極大的差異。GLA 在處理雲霧問題時，可輸入研究地的雲霧指數(cloudiness index)，且可以細至以小時為單位，但一個小研究區(如一個試驗集水區)的雲霧指數是一樣的，故不能解決上述的問題。研究人員需對研究地點的地形及天氣狀況有充分的了解，才能做出較正確的比較分析。

五、結論

半球面影因能為全空域的林冠影像留下永久的記錄，從而估測穿透林冠的光照及林冠葉面積指數，故在森林生態研究上有很大的潛力。半球面影像在生態研究的範圍從林下光照的垂直分布、林冠結構變動、林下植物的生長分布、干擾的適應、森林的演替更新、土壤水及至於林下植物的生理生態等日益廣泛與深入。研究者在使用此一技術時，需對影像的特質及分析的原理與流程有充分的了解，才能在事前影像取樣點的選擇、影像拍攝時間的選定、影像的分析乃至於資料的統計分析時避免錯誤的發生，累積誤差。此發展迅速的技術，在國外已被廣泛的應用在森林生態的研究，值得國內的研究者仔細評估其特點，將其納入研

究時考量利用的方法技術之一。

謝 誌

本研究承國科會專題研究計畫(NSC 89-2621-B018-004-A10)補助、謹此誌謝。林業試驗所馬復京對文稿提供寶貴的意見，本系張仲德、蔡春華、莊志弘、陳毓禎、紀正良及林文雄同學提供影像拍攝及分析的心得意見，而利用半球面影像於福山試驗林進行研究期間，蒙行政院農業委員會林業試驗所福山研究中心多方協助，一併致謝。

引用文獻

- Anderson MC. 1964.** Studies of the woodland light climate. 1. The photographic computation of light condition. *J Ecol* 52:27-41.
- Baldocchi DD, Matt DR, Hutchison BA, McMillen RT. 1984.** Solar radiation within an oak-hickory forest: an evaluation of the extinction coefficient for several radiation components during the fully-leafed and leafless periods. *Agric For Meteorol* 32:317-22.
- Becker PF, Smith AP. 1990.** Spatial autocorrelation of solar radiation in a tropical moist forest understory. *Agric For Meteorol* 52:373-9.
- Becker PF, Erhart DW, Smith AP. 1989.** Analysis of forest light environments. I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical photographs. *Agric For Meteorol* 44:217-32.
- Bellingham PJ, Tanner EVJ, Rich PM, Goodland TCR. 1996.** Changes in light below the canopy of a Jamaican montane rainforest after a hurricane. *J Trop Ecol* 12:699-722.
- Bonhomme R, Chartier P. 1972.** The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israel J Agric Res* 22: 53-61.
- Breshears DD, Rich PM, Barnes FJ, Campbell K. 1997.** Overstory-imposed heterogeneity in solar radiation and soil moisture in a semiarid woodland. *Ecol Appl* 7:1201-15.
- Campbell GS. 1986.** Extinction coefficient for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric For Meteorol* 36:317-21.
- Canham CD, Denslow JA, Platt WJ, Runkle JR, Spies TA, White PS. 1990.** Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Can J For Res* 20:620-31.
- Canham CD. 1995.** GLI/C: software for calculation of light transmission through forest canopies using colour fisheye photography. New York: Institute of Ecosystem Studies.
- Canham CD, Finzi AC, Pacala SW, Burbank DH. 1994.** Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Can J For Res* 24:337-49.
- Chan SS, McCreight MC, Walstad JD, Spies TA. 1986.** Evaluating forest cover with computerized analysis of fisheye photographs. *For Sci* 32:1085-91.
- Chason JW, Baldocchi DD, Huston MA. 1991.** A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agric For Meteorol* 57:107-28.
- Chazdon RL, Fetcher N. 1984.** Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 72:553-64.
- Chazdon RL, Field CB. 1987.** Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73:525-32.
- Chen JM, Black TA, Adams RS. 1991.** Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agri For Meteorol* 56:129-43.
- Chen JM, Rich PM, Ower ST, Norman JM, Plummer S. 1997.** Leaf area index of boreal

forests: theory, techniques, and measurements. *J Geophys Res BOREAS Special Issue 102 (D24):29429-44.*

Cheng CC, Chiou CR, Chen YC. 1997. Applying a remote sensing method for estimating leaf area index of Taiwan plantations. *Taiwan J For Sci 12:309-17.* [in Chinese with English summary].

Clark DB, Clark DA, Rich PM. 1993. Comparative analysis of microhabitat utilization by saplings of nine tree species in neotropical rainforest. *Biotropica 25:397-407.*

Clark DB, Clark DA, Rich PM, Weiss SB, Oberbauer SF. 1996. Landscape-scale evaluation of understory light and canopy structure: methods and application in a neotropical lowland rain forest. *Can J For Res 26: 747-57.*

Comeau PG, Gendron F, Letchford T. 1998. A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixedwood stand. *Can J For Res 28:1843-50.*

Curran PJ, Dungan JL, Gholz HL. 1992. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM. *Remote Sensing Environ 39:3-13.*

Daughtry CST. 1990. Direct measurement of canopy structure. *Remote Sensing Rev 5:45-60.*

Delta-T. 2000. HemiView canopy analysis software: user's manual. Vers. 2.0. Cambridge, UK: Delta-T Devices. 85 p.

Englund SR, O'Brien JJ, Clark DB. 2000. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densitometry for measuring forest light environments. *Can J For Res 30(12):1999-2005*

Evans GC, Coombe DE. 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J Ecol 47:103-13.*

Fassnacht KS, Gower ST, Norman JM, McMurtrie RE. 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forest. *Agric For Meteorol 71:183-207.*

Fournier RA, Rich PM, Landry R. 1997. Hier-

archical characterisation of canopy architecture for boreal forest. *J Geophys Res BOREAS Special Issue 102(D24):29445-54.*

Frazer GW, Canham CD, Lertzman KP. 1999. Gap Light Analyzer (GLA), vers. 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Burnaby, British Columbia: Simon Fraser Univ. and Millbrook, NY: Institute of Ecosystem Studies. 40 p.

Gholz HL. 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology 63:469-81.*

Hill R. 1924. A lens for whole sky photographs. *Q J R. Meteorol Soc 50:227-35.*

Jupp DLB, Anderson MC, Adomeit EM, Witts SJ. 1980. PISCES: a computer program for analyzing hemispherical canopy photographs. Canberra: CSIRO Tech Memo 80/23. 25 p.

Lawton RC. 1990. Canopy gaps and light penetration into a wind-exposed tropical lower montane rain forest. *Can J For Res 20:659-67.*

Leong W, Lemeur R, Yoon PK. 1982. Characterization of leaf area index and light penetration of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. By hemispherical photography. *Rubber Res Inst Malaysia 30:80-90.*

Lerdau MT, Holbrook NM, Mooney HA, Rich PM, Whitbeck JL. 1992. Seasonal patterns of acid fluctuations and resource storage in the arborescent cactus *Opuntia excelsa* in relation to light availability and size. *Oecologia 92: 166-71.*

Liang YC, Kuo SR, Hsu SH, Shen CW. 1999. The development of translocatable cable tram system for solar irradiation measurement. *Q J Chin For 32:481-94.* [in Chinese with English summary].

Liang YC. 1998. Solar irradiation under forest canopy of a natural broad-leaved forest at Fu-Shan in northeastern Taiwan [dissertation].

Taipei, Taiwan: National Taiwan Univ. 123 pp. [in Chinese with English summary].

LI-COR 1992. LAI-2000 plant canopy analyzer operating manual. Lincoln, NE: Li-Cor. 90 p.

Lin TC, Hamburg SP, Hsia YJ, Lin TT, King HB, Wang LJ, Lin KC. 2001. Influence of typhoon disturbances on the understory light of a subtropical rain forest in northeastern Taiwan. *J. For. Res.* (accepted).

Lin TC, Lin TT, Chiang ZM, Hsia YJ, King HB. 1999. A study on typhoon disturbance to the canopy natural hardwood forest in northeastern Taiwan. *Q J Chin For* 32:67-78. [in Chinese with English summary].

Lin TC, Rich PM, Heisler DA, Barnes FJ. 1992. Influences of canopy geometry on near-ground solar radiation and water balances of pinyon-juniper and ponderosa pine woodlands. *Proceedings of 1992 American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting, 1992 Albuquerque, NM.* p 285-94.

Ma SM. 1999. Using SPOT remote sensing image to estimate leaf area index and litterfall in Nanjenshan forest ecosystem [thesis]. Pingtung, Taiwan: National Pingtung Univ Sci Tech. 74 p. [in Chinese with English summary].

Marshall JD, Waring RH. 1986. Comparison of methods of estimating leaf area index in old-growth Douglas-fir. *Ecology* 67:975-9.

Martens SN, Ustin SL, Rousseau RA. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *For Ecol Mgmt* 61:91-108.

Nicotra AB, Chazdon RL, Iriarte SVB. 1999. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. *Ecology* 80:1908-26.

Norman JM, Campbell GS. 1989. Canopy structure. In: Mooney HA, Rundel PW, editors. *Plant physiological ecology.* New York: Chapman and Hall. p 301-25.

Oberbauer SF, Clark DB, Clark DA, Rich PM, Vega G. 1993. Light environment, gas exchange, and annual growth of saplings of three species

of rain forest trees in Costa Rica. *J Trop Ecol* 9: 511-23.

Pearcy RW, Yang W. 1996. A three-dimensional crown architecture model for assessment of light canopy carbon gain by understory plants. *Oecologia* 108:1-12.

Rich PM. 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos, NM: Los Alamos National Lab Rep LA-11732-M. 80 p.

Rich PM. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Rev* 5(1):13-29.

Running SW, Peterson DL, Spanner MA, Perry DA. 1986. Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology* 67:273-6.

Sampson DA, Allen HL. 1995. Direct and indirect estimates of leaf area index (LAI) for lodgepole and loblolly pine stands. *Trees* 9: 119-22.

Serrano L, Gamon JA, Penunelas J. 2000. Estimation of canopy photosynthetic and nonphotosynthetic components from spectral transmittance. *Ecology* 81:3149-62.

Smith AP, Hogan KP, Idol JR. 1992. Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in lowland tropical moist forest. *Biotropica* 24:503-11.

Smith NJ, Borstad GA, Hill DA, Kerr RC. 1991. Using high-resolution airborne spectral data to estimate forest leaf area and stand structure. *Can J For Res* 21:1127-32.

Ter Steege H. 1996. WinPhot 5.0, a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. Georgetown, Guyana, The Netherlands: Tropenbos, Guyana Rep 95-2, Tropenbos Guyana Programme.

Turner IM. 1990. Tree seedling growth and survival in a Malaysian rain forest. *Biotropica* 22:146-54

Turton SM. 1992. Understory light environments in a northeast Australian rain forest before and after a tropical cyclone. *J Trop Ecol*

8:241-52.

Waring RH. 1983. Estimates of forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv Ecol Res* 13:327-54.

Waring RH. 1985. Imbalanced forest ecosystems: assessments and consequences. *For Ecol Mgmt* 12:93-112.

Webb WL, Lauenroth WK, Szarek SR, Kinerson RS. 1983. Primary production and abiotic controls in forests, grassland, and desert ecosystems in the United States. *Ecology* 64:134-51.

Weiss SB, Rich PM, Murphy DD, Calvert WH, Ehrlich PP. 1991. Forest canopy structure at overwintering monarch butterfly sites: measurements with hemispherical photography.

Conserv Biol 5:165-75.

Welles JM. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Rev* 5:31-43.

Whitford KR, Colquhoun LJ, Land ARG, Harper BM. 1995. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurements, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agric For Meteorol* 74: 237-49.

Welles JM, Norman JM. 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron J* 83:818-25.