

應用於距離基線場絕對校正之干涉比長儀介紹 On the Väisälä Comparator for the Absolute Calibration of Baseline 史天元¹

摘 要

「長度」是基本物理量測量之一，也是國家測量製圖所需要之基本要件。距離測量儀器需要經由校正，以確認其所量測之值的不確定度，而「基線場」是目前測量儀器如電子測距儀校正之標準設施。校正之追溯，常見者為使用標準件進行比對之「相對校正」，而以「絕對校正」方式確認「基線場」標準值則較為少見。「Väisälä Comparator」(干涉比長儀)之性質為「白光干涉儀」，精度可達 10^{-7} ，亦即 0.1ppm。由於其高精度與高解析度，在芬蘭基線場於 1933 年建立時，便以為建立「基線場」標準值之「絕對校正」工具。本文謹概略介紹此一「干涉比長儀」之設計概念、基本特性，並引用近期文獻，說明其儀器形貌。

Abstract

“Length” is an important fundamental physical property, as well as a basic measurement for surveying and mapping. The instrument used for range measurement should be calibrated to confirm its uncertainty. Baseline calibration is the current well-established calibration procedure for range instruments such as EDM. Traceability is a fundamental principle of calibration. This is frequently performed in the form of “relative calibration” with “standard parts”, whereas “absolute calibration” is rarely applied. However, the “Väisälä Comparator” is an instrument capable of performing “absolute calibration” of a baseline. The design is based on interferometry of white light and can reach levels of 10^{-7} , that is 0.1ppm. Due to its high accuracy and high resolution, the “Väisälä Comparator” has been utilized as the means of absolute calibration since the establishment of a Finnish standard baseline in 1933. This note briefly introduces the fundamental principles of the “Väisälä Comparator”. Referencing recent literature, the instrument and its operation are also described.

一、前言

「Väisälä Comparator」是應用白光，以干涉方式量測距離，進行「長」距離測量的儀器。這「長」距離為相對於一公尺而言，實際應用約數百公尺的距離量測。這儀器是由芬蘭 Väisälä 教授設計，亦以其姓命名。首先要探討的是，這個名詞如何發音？在網際搜尋中，可以找到芬蘭語發音的網站：<https://forvo.com/languages/fi/>。以「Väisälä」搜尋，找到圖 1 的三個字詞。該網頁提供有音訊，說明其發音。

¹ 交通大學防災與水環境研究中心教授



圖 1：「Väisälä」搜尋成果

圖 1 的第一個字「Vaisala」發音近似「外沙拉」，重音在「外」，V 為咬唇音。第三個字「Väisälä」發音近似「韋沙拉」，重音在「韋」。所以使用芬蘭語發音時，正確應為近似「韋沙拉」。但是在部分印刷，亦有忽略字母上方音標，而為「Vaisala」者 (Sube, 2001, page 733)。Heiskanen (1950) 的標題，也使用「Vaisala」。該字以一般英文發音方式與芬蘭語相同，成為近似「外沙拉」。

「Väisälä Comparator」中第二個字「Comparator」為英文，發音為「kəm-|per-ə-tər」。依據 Merriam-Webster (2019) 的定義，為：「a device for comparing something with a similar thing or with a standard measure」。這個字是「Compare」的衍生字，「Comparator」在國家教育研究院雙語詞彙中，計量學門的中譯為「比測儀；比較儀」(國教院，2012)。

「追溯」(Traceability) 是「校正」(Calibration) 的一項重要精神。經常聽到的名詞「標準件」、「待測件」，便是藉由「比對」建立「追溯」的連結關係。「標準件」的建立，可以藉由與上一級「標準件」的比對，這是「相對校正」；同時亦可以藉由物理、化學特性已經國際標準確認的量測方式，循由標準作業程序，直接建立，這便是「絕對校正」。「Väisälä Comparator」即為具有基線場長度「絕對校正」能力的儀器，而其設計所依據之物理特性，是白光的干涉。「Väisälä Comparator」是芬蘭 Prof. Yrjö Väisälä 在芬蘭大地研究所(Finnish Geodetic Institute)服務時所設計、建造，關鍵性的論文發表於 1927-1930 年間。最初的基線場長度為 720m，目前的基線場長度是 864m，所能達成的校正精度為 10^{-7} ，亦即 0.1ppm (Heiskanen, 1950)。這條 864m 長的 Nummela 標準基線場(Nummela Standard Baseline)，歷經 80 年，迄今仍在維護良好的狀態(Jokela et al., 2009)，並且是各國標準基線場追溯的根源(李瓊武，1995)。

二、基本設計原理

「公尺」(meter) 的定義，歷經科學的演進，在歷史上有著不同的內涵。在 1983 年，國際度量衡大會(CGPM, Conférence générale des poids et mesures) 採用者如下：

「光在真空中於 1/299792458 秒內行進的距離」。

這個定義實踐的絕對不確定度(Absolute uncertainty)為 0.1nm，相對不確定度

為 10^{-10} 。這個定義雖然在 2002 年，CGPM 增加了根據相對論所擬的修飾條件，基本上沒有改變這個定義的實質內涵。在此之前，1889 年所做的「公尺」定義，是以鉑銥合金(Platinum-iridium)塊體標準件在水的液態與固態臨界點溫度的長度。這個定義實踐的絕對不確定度為 100-200nm，相對不確定度為 10^{-7} (Wikipedia, 2019a)。低「不確定度」的量測，亦是校正中的重要關鍵。要在這裡提出這兩個定義的原因，是「Väisälä Comparator」實務上應用一個如同 1889 年使用的原型尺一樣概念的塊規(Gauge block)。塊規是長度標準件(Wikipedia, 2019b)，由精密機械加工製成。「Väisälä Comparator」用的這個塊規長度為一公尺，採用石英(Quartz)為材料。這個石英塊規，經由干涉儀確認其長度為 1000 mm，干涉儀量測完成後的不確定度為 72nm。採用石英為材料的原因是其低熱膨脹係數(Thermal expansion coefficient)，融合後的純石英熱線性膨脹係數值為 $(5.5 \times 10^{-7} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C})$ ；以及石英物質的高熱抗力(Hellios Quartz, 2019)。以鉑金屬作為參考，在 20°C 時，鉑的熱線性膨脹係數值為 $(9 \times 10^{-6} \text{ cm/cm } ^\circ\text{C})$ ，大了純石英約 16 倍(Wikipedia, 2019c)。

這就是「標準」追溯的作為，高精度定義是最前沿，由歸屬於「實驗物理」的基礎科學中高精度定義，經由嚴謹有效的逐階段移轉，才能達成實用。在大地測量距離的案例，有了「公尺」的高精度標準件，亦即「石英塊規」，之後，實施到測量儀器所需要的長度，過程便是尺度放大(Scale up)，「Väisälä Comparator」的功能即為此。圖 2 是 Väisälä 使用的原理說明(Alexander, et al., 1998)，圖中 LS 是光源(Light Source)、BS 是分光板(Beam Splitter)、M 是反射鏡(Mirror)、PD 是光感測器(Photon Detector)。以圖 2 中光源發射出後，經由 BS 分光，一半出射至遠端反射鏡，一半反射至後端反射鏡。至遠端鏡者到達反射鏡後折回到另一個分光板入射至 PD，至後端反射鏡者經過多次反射，亦經由分光板反射入 PD。如果距離 L 是 l_0 的 8 倍，合成後因兩者光徑不同但是長度相同、相位相同，會產生干涉。如果光源是白光，產生干涉的距離差值須小於 2-3 μm (Alexander, et al., 1998)。依據 Heiskanen (1950)，差值大於 1.3 μm 時干涉即消失。這是「Väisälä Comparator」能達到高精度距離量測的原因。

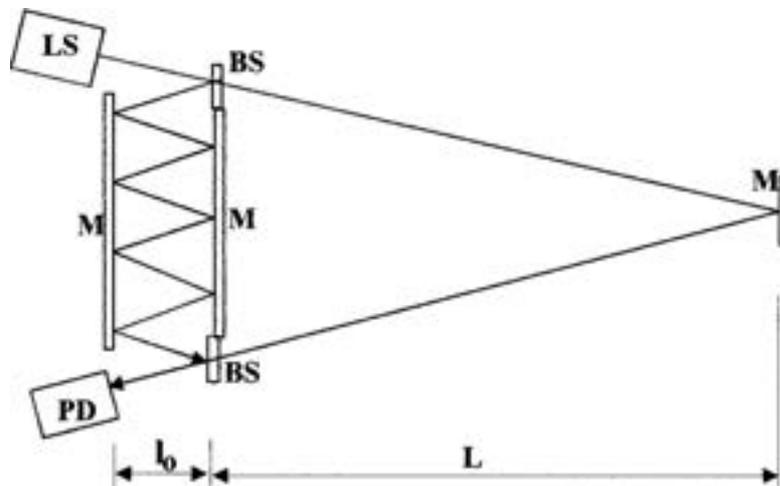


圖 2：Väisälä 長度放大說明(Alexander, et al., 1998)

在 1930-1950 的年代裡，鈹鋼尺(Invar wire)是測量實務裡最精密的長度測量工具，一支標準的鈹鋼尺長度為 24m。因此，「Väisälä Comparator」的第一步是由 1m 石英塊規放大 6 倍，再放大 4 倍，便為 24m。Prof. Väisälä 所測量的芬蘭 Nummela 標準基線(Standard Baseline)，長度為 864m，由下列放大程序獲得： $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 4 \times 6 \times 1 \text{ m}$ 。由 1m 的原型尺塊規，一共經由六次的放大過程(Jokela, 2014)。

三、應用設計

基線場「追溯性」建立過程的起源為基本長度單元的定義，亦即「公尺」的定義；經由石英塊規的絕對校正與相對校正，由「公尺」的定義移轉得到石英塊規，成為距離校正中的第一級「標準件」；再以「Väisälä Comparator」倍數化，得到標準基線場的長度；再藉由「移轉標準」(Transfer standard)，如高精度的電子測距儀 Kern ME5000，在已經校正的基線場完成校正，成為「標準件」，以「轉移標準」測量其他標準基線，由而獲得轉移，而建立追溯體系。這一系列追溯的量測程序，其通常可達成的相對不確定度分別為：石英塊規為 4×10^{-8} 、Väisälä 方式量測的標準基線長度為 1×10^{-7} 、以電子測距儀轉移為 2×10^{-7} 至 5×10^{-7} (Jokela, 2014)。

因此，石英塊規、基線場、「Väisälä Comparator」是整個體系中的重要元件，謹介紹如後。

石英塊規

就「Väisälä Comparator」而言，石英塊規是「標準件」。在芬蘭大地研究所中所使用的石英塊規大多是中空的石英圓管，依使用的標的，如主要長度標準件 No. 29 號石英塊規，兩頭為以實心半圓球體封邊。採用圓球體的原因是要用牛頓環(Newton's ring)干涉方式確定石英塊規安置時的精確度。而用以檢查平行度的 No. 60 號石英塊規，兩頭為平面且相互平行。石英塊規本身亦需要校正。圖 3 左為在 Tuorla 實驗室中常用的石英塊規，右為在校正石英塊規的比長儀中安置石英塊規。右圖中兩個旁邊的塊規長度為 1001 mm，功能為確定兩端面板的平行，中間長度為 1000mm。在「Väisälä Comparator」的作業中，需要使用多個石英塊規，並非只有一個。在 1933 年時，共有 18 個石英塊規，該時的長度標準是鉑銥合金原器。石英塊規比對的標準件是芬蘭的第 5 號公尺原器(Prototype meter)，同時亦曾與德國的第 18 號公尺原器比對。

目前塊規校正的方式亦為應用干涉原理，且必須在嚴格溫控的穩定狀態下進行。石英塊規的絕對與相對校正，為精密之物理實驗，過程與成果在 Lassila, et al. (2003)、Jokela (2014) Section 3 中有較完整之說明。



圖 3：左為 Tuorla 實驗室中常用的石英塊規，右為在比長儀中安置石英塊規 (Jokela, 2014; Fig. 3.1)

四、基線場

標準基線場的設置是距離校正的一項重要設施，包含測量標(Survey marker)、觀測基樁(Observation Pillar)等。在芬蘭 Nummela 標準基線，測量標為設置於地面下的永久水準點。

芬蘭 Nummela 標準基線(Standard Baseline)，長度為 864m，如圖 4 所示，該基線位於森林中。在圖左下方的紅頂小屋，便是基線場的工作站，包含辦公室與儲藏室(圖 5)。在森林中可以辨識的兩條線，即為基線場的位置，平行於作者所繪製的藍線。工作小屋的經緯度約略為 (60°20'22.8"N 24°18'35.1"E, 60.339665N, 24.309746E)，由小屋為起點，基線的走向約為東北方向。



圖 4：芬蘭 Nummela 標準基線場(<https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>)



圖 5：芬蘭 Nummela 標準基線場紅頂小屋(Jokela and Häkli, 2006)

圖 4 中可以辨識的兩條線，左邊一條是 Nummela 標準基線，右邊一條是另一條基線，稱為 Nummela 校正基線(Calibration Baseline)。右邊這條的精度較 Nummela 標準基線低，但是為開放，提供各界使用(Jokela, 2019; 個人聯繫)。

Nummela 標準基線包含觀測樁，與地面下點位固定樁。觀測樁設置於 864 m、432 m、216 m、72 m、24 m、6 m、1m、及 0 m。觀測樁與點位固定樁間距離為 2m (Jokela, 2014; Jokela, 2019 個人聯繫)。這一種固定樁與觀測樁的設計，並非所有基線均相同，如匈牙利 Gödöllő 標準基線便採用觀測樁與點位固定樁共線的設計(圖 6)，觀測樁中空處下方地下即為點位固定樁。此外，由於溫度是距離測量重要的因素，除了設置位置需為林地，下有草、上有樹，作業時間需為氣流穩定的季節，在氣溫相對穩定的夜晚，「Väisälä Comparator」作業時，光徑仍均須量測氣溫。但是這些溫度計的吊掛設施非永久性，作業時方才設置。Nummela 標準基線為在林地中，作業時一樣要吊掛溫度計，但是攝影效果不好，故以匈牙利 Gödöllő 標準基線之圖 6 為例說明。



圖 6：匈牙利 Gödöllő 標準基線「Väisälä Comparator」作業時溫度計吊掛
(Jokela, 2014; Fig. 4.16)



圖 7：整置於經緯儀基樁上之配有共線儀燈具的 Kern DKM3
(Jokela, 2014; Fig. 4.4, Nummela 標準基線)

「Väisälä Comparator」作業中，反射鏡、光源、等多個部分，雖有許多數目不同的調整裝置，可以經由微小精細的旋鈕等達成滿足干涉的精密條件，各部仍須先以精準的測設，讓各部的起始位置準確。精準的定線包含精密水準與經緯儀定線。因此，為作業方便，另於基線一端設置經緯儀基樁，如圖 7 為在基線一端距離零號觀測樁 20m 處之經緯儀基樁，概略相對關係如圖 8 中左側的「Theodolite」標示。

五、「Väisälä Comparator」元件與操作

各部原件的相對關係可以對照圖 8。在圖中，白光為由點狀光源發出，經由「平行光管」(Collimator, 準直儀；準直光管)，使得光線方向均一。「Collimator」是一個在多樣光學測量儀器校正中使用的機具，在此主要功能是使光源發出之光線方向均一化、細小化，讓光束中所有光線彼此平行，故以「平行光管」作為譯名。到 6 公尺鏡時，分為兩束；第一束往返反射於 0 公尺鏡與 6 公尺鏡之間，之後反射至干涉觀察單元；第二束射至 24 公尺鏡後反射回干涉觀察單元。以圖八而言，第一束反射四次， $6 \times 4 = 24$ 。如果產生良好干涉，表示 0 公尺鏡至 24 公尺鏡間的距離是 0 公尺鏡與 6 公尺鏡間的 4 倍。反射鏡需調整至兩個不同路徑的光束，在望遠鏡觀測焦面相會時，傳播距離長度相等，確認的方式為兩個光束產生良好干涉條紋。光源與望遠鏡均有精細的機械與光學的元件可以調整光束(圖 9、10)。而儀器其他的部分均十分單純。直射光束與反射光束在望遠鏡的相會，需藉由許許多多鏡子的調整螺旋之操作。最後一步的精細調整機制是望遠鏡前的屏幕(Screen)與補償玻璃片(Compensator glasses)(圖 11)，以確保獲取良好精度之干涉觀測條紋，觀測人員最後校正測量時主要工作便是調整補償玻璃片的角度，藉由此獲得在呈現良好干涉條紋時所需的精細改正量(Jokela, 2014)。

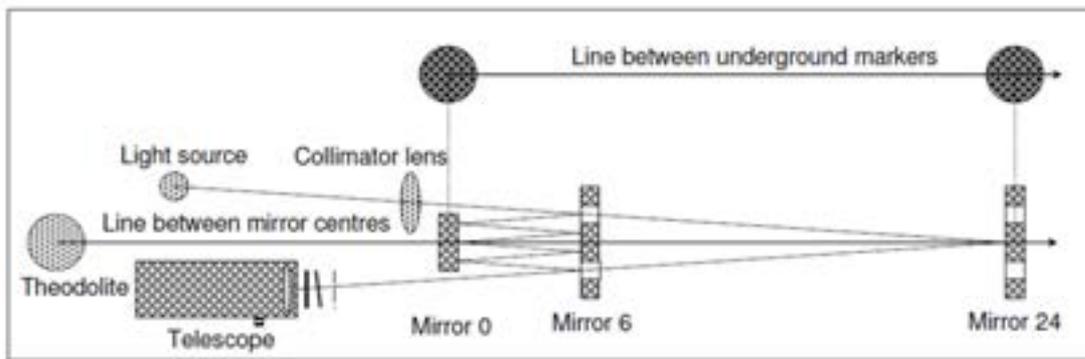


圖 8：「Väisälä Comparator」0-6-24m 干涉設置
(Jokela, 2014; Fig. 4.1)

圖 9 為「Väisälä Comparator」整置於第零樁與第一樁上，由第零樁向第一樁方向觀視；圖 10 為由第一樁向第零樁觀視。由此兩圖可以看到部分調整的機件。反射鏡零(Mirror 0)，即為基線的零點。

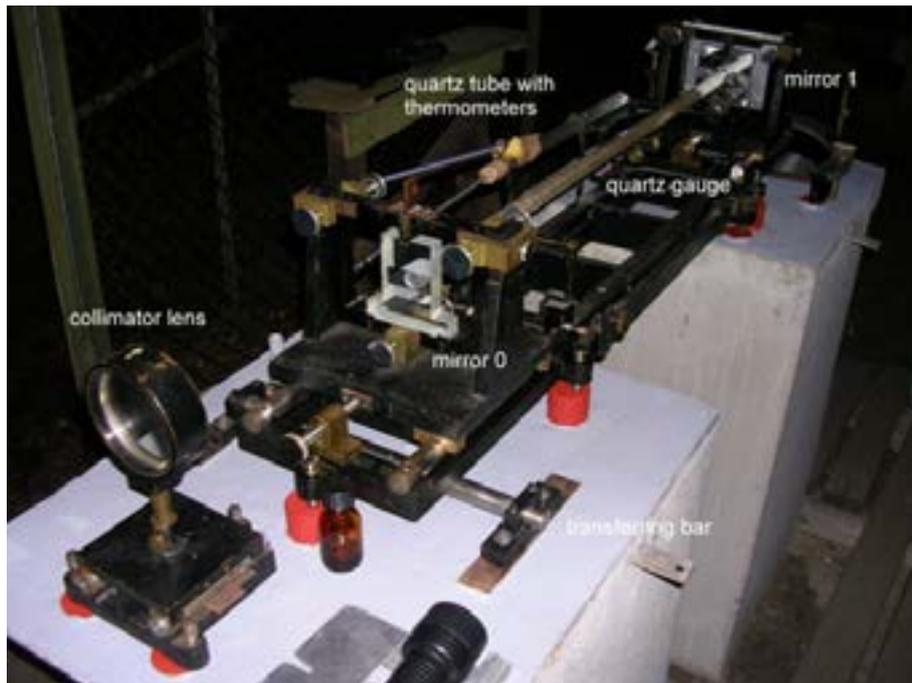


圖 9：第零樁與第一樁上儀器安置(Jokela and Häkli 2010)

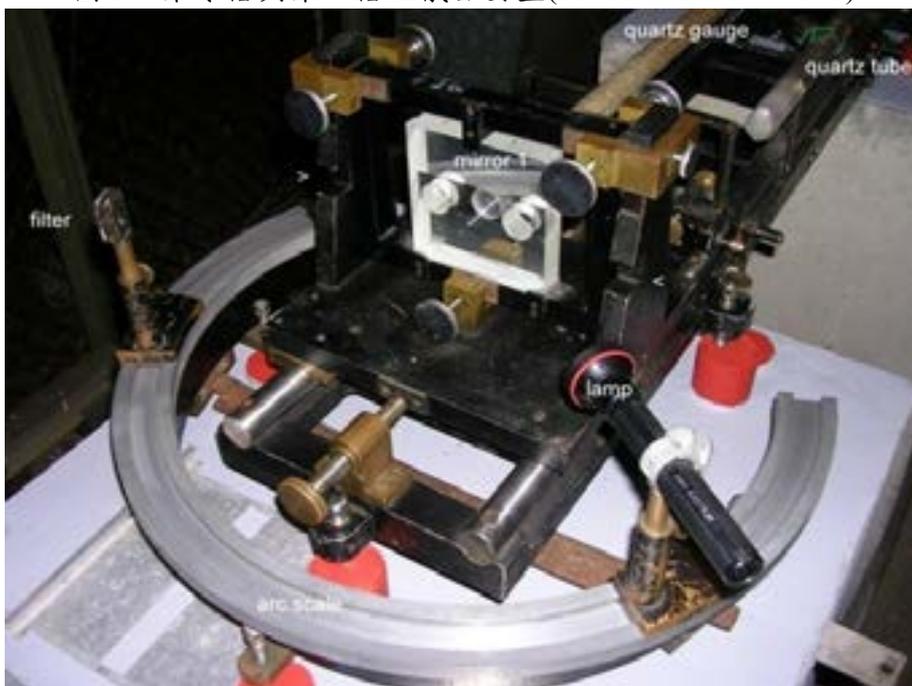


圖 10：第一樁上儀器安置(Jokela and Häkli 2010)

配合基線場的設置，「Väisälä Comparator」所要測取的距離有 864 m、432 m、216 m、72 m、24 m、6 m，計六段。基線場干涉量測的標準作業程序需要兩位觀測員，依序作業。第一位觀測員觀測時，第二位協助調整反射鏡等工作。由於為使用白光干涉，觀測均於夜間進行，通常為秋季，天氣為多雲無風，至少需工作 7 小時。觀測的重要條件為空氣穩定，由而光束的折射、反射、光速、等均為穩定。



圖11：藉由屏幕與補償玻璃片的調整觀測干涉紋(修改自Jokela, 2014; Fig. 4.8；由Dr. Jorma Jokela 提供)

圖 11 中，觀測者右手旁的便是屏幕(Screen)。由目標端單一次反射的光束，經由屏幕的中間插槽(Slot，標號為 1 者)，投射到干涉觀測望遠鏡。經由中間反射鏡與零端反射鏡多次反射的光束，經由上方(標號為 2 者)與下方插槽(標號為 3 者)。干涉即為經由 1 號插槽與經由 2 號或 3 號插槽的光束產出。2 號插槽或 3 號插槽可以使用標號為 4 的滑版控制、變換。屏幕的高度可以使用標號為 5 的螺旋調整。整個觀測望遠鏡可以藉由標號 6 與 7 的螺旋以及滑軌移動、旋轉、調整傾角。標號 8 的補償玻璃片調整由中間反射鏡投射過來的光束的光徑。圖 11 中，補償玻璃片 8 位於其零位置，也就是沒有產生延遲(光徑增長)。標號 9 的補償玻璃片調整由遠端反射鏡投射過來的光束的光徑。兩個補償玻璃片的下方基座上有角度讀取設備，可以紀錄玻璃片的旋轉角度，由而可以計算增長的距離。距離的解析度為微米(micrometer)。

石英塊規採用兩個安置位態，分別為 A 與 B。以各段距離觀測的順序而言，程序如下：

第一位觀測員：

位態 A：864-432-0 → 432-216-0 → 216-72-0 → 72-24-0 → 24-6-0 → 6-1-0 →

位態 B：0-1-6 → 0-6-24

第二位觀測員：

位態 B：24-6-0 → 6-1-0 →

位態 A：0-1-6 → 0-6-24 → 0-24-72 → 0-72-216 → 0-216-432 → 0-432-864

每一次的量測作業，均由反射鏡裝置於 864-432-0 開始。當獲得清晰干涉圖像時，即完成並開展後續作業程序。完成 864-432-0 干涉後，216 反射鏡裝置上其觀測樁，開始 432-216-0 的干涉觀測。完成後，72、24、6 依序逐一進行。之後，經由 6-1-0 干涉觀測以石英塊規導入追溯標準。重覆觀測所操作的便是屏幕與補償玻璃片，由玻璃片所調整的角度，可以計算出光徑調整所影響的距離，成為距離量測中改正的一部分。

第二位觀測者作業時，不得調整任何反射鏡，必須使用第一位觀測者調整獲得之鏡位。如有需要，只可以調整光源。如前所述，每一次觀測，觀測者操作時調整的是望遠鏡前的屏幕與補償玻璃片。如果天氣改變，校正使用之光線無法控制而得不到干涉，整個校正作業失敗，擇日從頭進行。當第二位觀測者完成 0-1-6 的干涉觀測後，移除在 1m 處的反射鏡。完成 0-6-24 的干涉觀測後，移除在 6m 處的反射鏡。依次進行，直到完成 0-432-864 干涉圖像，「Väisälä Comparator」的基線場校正作業完成。依據經驗，在觀測最後的干涉條紋時，通常需要調整光源的高度。觀測程序中 0-432-864 與 864-432-0 之反射鏡設置位置均相同，使用順序相反之表達方式是因為整體作業進行的樁位順序。

「Väisälä Comparator」的觀測耗時甚久，操作需要十分仔細。而其成果化算，亦需要考量多端。由石英塊規安置的使用牛頓環，因而有這一部分的改正外，兩個不同石英塊規觀測位置的觀測間之差異亦須平差。觀測時補償玻璃片的角度，可以提供檢核量。補償玻璃片本身具有消色差(Achromatic)特性，有紅光與藍光兩個部分，在白光範圍裡，不會產生色散。再來，溫度改變導致的光線折射率、透鏡的厚度導致的光徑長度影響、鏡位中心與標石間轉移的誤差、投影的誤差，均為化算中必須考量包含的項目。降低量測的不確定度，需要十分周延的考量與化算。

六、結語

「距離」，是一項基本的量測量。距離測量儀器的校正，亦因而是基本的測量工作的一環。「Väisälä Comparator」是目前實務上唯一能提供由一公尺標準件，經由白光干涉而達成尺度精準放大的儀器。雖然，並非所有基線均需以「Väisälä Comparator」校正，實務上目前是以精密電子測距儀作為轉移標準(Transfer standard)。精密電子測距儀經由在精密方式如「Väisälä Comparator」測定的基線場校正後，便成為標準件，可以用以校正其他基線。所有的大地測量標準基線，仍可以追溯到「Väisälä Comparator」。由 1927 年芬蘭 Prof. Yrjö Väisälä 發明這一方法，迄今將近百年，仍然是一項重要的距離測量儀器與作業方法，而且其原理與作業方式頗為有趣。

目前，雷射干涉儀(Laser Interferometer)是另一種提供高精度長度量測的儀器(Loughridge & Abramovitch, 2013)。儀器設計的原理與「Väisälä Comparator」不同，在要求高精度量測時，雷射光束的頻率需要經過校正。雷射干涉儀的測量距離，

文獻中所記載的達到 50m，而且是在室內(Jeong et al., 2006; Šiaudinytė, 2015)。「Väisälä Comparator」的作業操作，雖然受到空氣穩定性影響甚大，但是實務上有許多成功案例，是確實可於室外執行，並可以達到 864m。「Väisälä Comparator」的重要性與顯著價值即為此。

七、致謝

民國 108 年 8 月 29 日，第 38 屆「測量及空間資訊研討會」於國防大學理工學院舉辦時，該日下午安排參訪校園內標準基線，由理工學院林玉菁教授陪同健行科技大學張嘉強教授講解，除了基線場之介紹，並講述建場事蹟，並展示當年隨同國民政府播遷來台之「Väisälä Comparator」儀器(儀器箱上之封籤註明於民國 35 年從蘇州運台；張嘉強，2019；個人聯繫)。位於理工學院校園的桃園標準基線場，於 1993 年 2、3 月間，由芬蘭大地研究所 Prof. Markku Poutanen 與 Mr. Raimo Konttinen 以「Väisälä Comparator」完成基線校正測量(Poutanen, 1995)，測量成果為：

0-24m	24019.85 ±0.01 mm
0-216m	216017.05 ±0.03mm
0-432m	432012.76 ±0.05mm

張嘉強教授為當年參與建場人員，施測時工業技術研究院兩位工程師，陳清標博士、李瓊武博士，亦在場協同參與作業。理工學院基線場其後之維護，為以經過 Nummela 標準基線場校正之高精度電子測距儀 Kern Mekometer ME5000 檢測。在張嘉強教授講述中，對於整體測量工作中的大地基線長度標準校正，以及芬蘭大地研究所在建場時的協助，娓娓道來中均有觸及，引發本文寫作動機。謹此感謝林玉菁教授及其他多位理工學院教師、同學的投入，籌辦如此具有內涵的會議與活動；同時感謝張嘉強教授的講解，以及本文成稿後的檢閱。李瓊武博士長年執行標準基線維護與使用，在台灣長度基線的設立，留下重要的一頁。本文承蒙李博士檢閱，謹此致謝。

本人首度了解「Väisälä Comparator」，是於加拿大新布朗斯維克大學(University of New Brunswick)就讀期間，在 Prof. Adam Chrzanowski 講授的 Geodetic Survey 課程中。回想 1987 年的往事，除了想要感謝 Prof. Chrzanowski 內容豐富的課程，也要感謝當年協助個人學習的陳永奇教授。即以「Väisälä Comparator」為例，若非能有陳教授耐心、殷切的補充說明，「Väisälä Comparator」對本人而言並非容易明白。本文成稿後，承蒙陳永奇教授指正，一同敬此致謝。

本文擬稿期間，逾十次請教芬蘭 Dr. Jokela Jorma，對於釐清各項問題，均獲得耐心解說，並同意本文圖片使用。本文中圖 11 即為 Dr. Jokela Jorma 特地為本文所註記，並配合完整詳盡的文字說明。謹此深致謝意。

八、後記

本人由張嘉強教授得知有關民國 35 年從蘇州運台的「Väisälä Comparator」，除觀測儀器外，並有一組兩支石英塊規。感謝理工學院林玉菁教授的協助查找，已確

認石英塊規一支遺失、一支破損。當年一同來台的觀測儀器不敵歲月，散失、鏽蝕，與石英塊規一同見證了時光的無情。委請 Dr. Jokela Jorma 查找芬蘭當年協助國民政府設置基線場的文件，也尚無消息。本文定稿此刻，謹此向前輩宿昔的努力與功績致敬，並盼此文能為此一事蹟，在時光洪流中留下一個不相稱的小小註記。

九、參考資料

- 1.李瓊武，1995。國家標準基線之建立及應用，地籍測量，14(2):21-29。
2. 國 教 院 ， 2012 。 Comparator ， <http://terms.naer.edu.tw/search/?q=comparator&field=ti&op=AND&num=10&q=noun:%22%E8%A8%88%E9%87%8F%E5%AD%B8%E5%90%8D%E8%A9%9E%22&field=&op=AND> ， 最近訪查 ， 2019/09/02 。
- 3.Alexander M. Chekhovsky, Anatol N. Golubev, Michael V. Gorbunkov, 1998. Optical pulse distance-multiplying interferometry, Appl. Opt. 37, 3480-3483 (1998); <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-37-16-3480>, last accessed on 2019/09/04.
- 4.Heiskanen, W., 1950. The Finnish 864 m-Long Nummela Standard Base Line Measured with Vaisala Light Interference Comparator, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02525926.pdf>, last accessed on 2019/09/02.
- 5.Hellios Quartz, 2019. Quartz properties, <https://www.heliosquartz.com/prodotti/proprieta-del-quarzo/?lang=en>, last accessed on 2019/09/05.
- 6.Jeong, Don Young, Ho Suhng Suh, Jong Ahn Kim, Jae Wan Kim and Tae Bong Eom, 2006. 50 m Linear Measuring Interferometer for Calibration of Survey Tape, Korea Research Institute of Standards and Science, http://www.aspe.net/publications/Annual_2006/POSTERS/2METRO/2FORM/2071.PDF, last accessed on 2019/11/02.
- 7.Jokela, J., P. Häkli, 2006. Current Research and Development at the Nummela Standard Baseline, Proceedings of XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2006. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2006/papers/ps05_02/ps05_02_02_jokela_hakli_0371.pdf, last accessed on 2019/09/15.
- 8.Jokela, J. and P. Häkli (2010). Interference measurements of the Nummela Standard Baseline in 2005 and 2007. Publ. Finn. Geod. Inst. 144. 85 p. https://www.researchgate.net/publication/279512686_Interference_measurements_of_the_Nummela_Standard_Baseline_in_2005_and_2007, last accessed on 2019/09/25.
- 9.Jokela, Jorma, 2014. Length in Geodesy – On Metrological Traceability of a Geospatial Measurand, Doctoral dissertation, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland, <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/14055>, last accessed on 2019/09/05.
- 10.Lassila, A., J. Jokela, M. Poutanen and J. Xu, 2003. Absolute calibration of quartz bars of Väisälä interferometer by white light gauge block interferometer. Proc. XVII IMEKO World Congress, June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia, p. 1886–1890.
- 11.Loughridge, Russell, Daniel Y. Abramovitch, 2013. A tutorial on laser interferometry for precision

- measurements, Conference Paper in Proceedings of the American Control Conference, DOI: 10.1109/ACC.2013.6580402.
12. Merriam-Webster, 2019. Comparator, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/comparator>, last accessed on 2019/09/02.
 13. Poutanen, M., 1995. Interference Measurements of the Taoyuan Standard Baseline, publications of the Finnish Geodetic Institute, No. 120.
 14. Šiaudinytė, Lauryna, 2015. Modelling of linear test bench for short distance measurements, ACTA IMEKO, 4(2):68-71.
 15. Sube, Ralf, 2001. Langenscheidt Routledge German dictionary of physics, Volume 1, Psychology Press.
https://books.google.com.tw/books?id=vai7wiq5HIYC&pg=PA733&lpg=PA733&dq=vaisala+comparator&source=bl&ots=_Ky5b6IbQ4&sig=ACfU3U1iPHCLT0uQXdqCAsGe9eLEAReSPg&hl=zh-TW&sa=X&ved=2ahUKewiy0Lud0K_kAhUJyIsBHQFEBpI4ChDoATAJegQICBAB#v=onepage&q=vaisala%20comparator&f=false, last accessed on 2019/09/91.
 16. Wikipedia, 2019a. Metre, <https://en.wikipedia.org/wiki/Metre>, last accessed on 2019/09/04.
 17. Wikipedia, 2019b. Gauge block, https://en.wikipedia.org/wiki/Gauge_block, last accessed on 2019/09/04.
 18. Wikipedia, 2019c. Thermal expansion, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion, last accessed on 2019/09/05.