澳門特別行政區大地基準說明

1. 前言

隨著社會的變遷與科技的進步，全球定位系統（GPS）接收技術發展爲民用已有多年了。以土地測量的角度而言，GPS 測量操作便捷、高精度、全天候，測區範圍大小均宜，且測量點間無需通視，其在本澳測繪範疇所起的作用是無可置疑的。近年來，GPS 已經逐漸取代傳統三角測量作爲平面控制網的施測方法，而隨著其他 GNSS 系統 (如 GLONASS、Galileo、Compass) 的不斷發展，衛星定位技術也邁進嶄新年代。

然而，澳門測量及製圖上所使用澳門特別行政區方格網座標與 GPS 衛星測量所採用的世界大地測量系統 84 (WGS84) 座標截然不同，加上本澳於 2008 年將澳門的座標系統連結至國際地球參考框架 (ITRF2005)上，實在有必要說明各座標系統之間的關係。本文將介紹澳門現時所使用的各個基準及座標系統，以方便公眾正確使用。

2. 澳門特別行政區大地基準的歷史背景

澳門的三角測量點起沿於 1907 年，當時對 5 個三角點進行測量，並以在青洲大馬路的兩個點作為基線，定義其中一點的座標為 (0,0)。至 1919~1920 年，初次對澳路氹近 60 個點進行三角測量；並於 1943 年對本地方格網原點進行更新，東北方向分別平移 20000 米，定義了澳門的投影座標系統。此外，亦分別於 1912 年及 1965 年透過天文觀測獲得本澳投影原點的天文座標。40 年代至 80 年代進行了多次全澳三角控制點的測量工作，建立了包括 14 個一等點及近百個二等點的澳門大地控制網。

至 1981 年，由香港皇家製圖總署的“512 Specialist Team Royal Engineers(STRE)”工程人員利用 GPS 測量技術爲澳門地區三角網的其中兩個控制點：媽閣山 (Monte da Barra)、路環最高（Coloane Alto）進行觀測並建立了以 WGS72 爲參考橢球體的座標資料。並世界性登錄與香港多普勒站（Doppler Station）相關連的編號分別爲 No.31386、No.31397 的多普勒站，開始了全球定位系統技術在澳門的應用。

1991 年香港皇家製圖總署的 512 STRE 人員再度來澳進行 GPS 測量，把澳門的三角點與香港的控制點進行 GPS 的精密聯測和平差，建立了以 WGS 84 的參考基準。控制點除“媽閣山”和“路環最高”外，分別在澳門半島和離島增加了 4 個，即總共 6 個多普勒站，組成澳門地區的首個 GPS 控制網。

於 1994 年，當時的地圖繪製暨地籍司將本澳的 GPS 網逐步擴展到 14 個一等控制點及各二等點上，並獲得一套本地方格網座標與 WGS84 座標 (以多普勒站座標為基準，與目前真正的 WGS84 座標存在差距) 之間的轉換參數，為往後的 GPS 應用建立必要的數據基礎。

踏入 21 世紀，隨著世界各地紛紛建立連續運行觀測站，本局亦配合澳門的實際需要，分別於 2002 年、2006 年及 2008 年在澳門大炮台、路環最高及氹仔大潭山建立了三個衛星定位系統參考站，全天候 24 小時收集 GPS 觀測數據及提供 RTK 訊息。2008 年利用收集所得的數據，與澳門周邊 10 個 IGS (International GNSS Service) 站進行聯合解算，確定了 3 個衛星參考站在 ITRF2005 參考框架下的座標。接著於 2009 年透過 GPS 觀測將 ITRF2005 延伸至澳門的一等控制點上，並建立了 ITRF2005 與澳門方格網座標系統之間的關係。

高程基準方面，本澳地形圖及地面上高度是參考平均海平面，是由“馬交石驗潮房”1925 年至 1964 年間 40 年的驗潮資料所確定，並使用至今。原以馬交石水準點為參考點，及後潮高資料於 1984 年改由“內港驗潮房”紀錄，而目前本澳高程系統的水準原點則設於媽閣廟前。

3. 澳門的大地基準及座標系統

3.1 澳門特別行政區方格網 (Macau Grid System)

澳門特別行政區方格網為一投影座標系統，採用參考橢球體為國際海福特 1924，投影方式為橫軸麥卡托投影，其投影參數如表一：

參考橢球體	國際海福特 International Hayford a (長軸半徑)=6378388.0 公尺, f (扁率)=1/297.0
投影方式	橫軸麥卡托投影
原點橫軸方向的假設座標	20000.00 公尺
原點縱軸方向的假設座標	20000.00 公尺
原點緯度	22° 12′ 44.6300″ 北緯
原點經度	113° 32′ 11.2900″ 東經
尺度比率	1

表一

3.2 世界大地測量系統 84 (WGS 84)

WGS 為一全球性的地心地固座標系，是美國國防部於 80 年代制定的，由

WGS60、WGS66、WGS74 發展到目前廣泛應用的 WGS84。它的原點定義於地球質心，空間直角座標系的 Z 軸指向 IERS (International Earth Rotation Service) 定義的地極（CTP）方向。X 軸指向 IERS 定義的零度子午面和 CTP 赤道的交點，Y 軸和 Z，X 軸構成右手座標系。其橢球體的基本參數為：

長半徑 a	6378137.0 m
扁率 *f*	1/298.257223563

表二

3.3 國際地球參考框架 (ITRF2005)

ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 是由 IERS 所提供，為國際上公認精度最高，穩定性最好的參考框架。它是由多種空間觀測技術，綜合多個數據分析中心的解算結果所構建的動態地球參考框架。它的建立是為滿足對區域性及全球性地球變化之研究，如海平面之變化、地區沉降、地殼運動、板塊變形等。2006 年發佈的 ITRF2005 版本與 WGS84(G1150) 版本相差在 1-2 厘米範圍，可視為一致[1]，ITRF 採用的橢球為 GRS1980，參數如下：

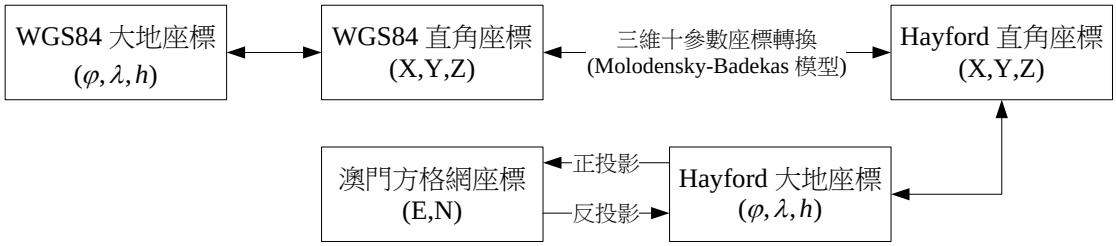
長半徑 a	6378137.0 m
扁率 *f*	1/298.257222101

表三

[1] US National Geospatial Intelligence Agency (NGA), *Addendum to NIMA TR 8350.2:Implementation of the World Geodetic System 1984 (WGS 84) Reference Frame G1150*, 2003.

4. 座標轉換

澳門特別行政區方格網座標為一平面直角座標系，WGS84/ITRF2005 則為橢球面大地座標系，它們之間必須經過座標轉換及地圖投影。本澳自 1994 年始一直沿用一套三維的轉換模式，其轉換過程如下：



由上圖的關係可以看出，在求取三維轉換參數時，需要獲得公共點的 WGS84 及 Hayford 兩套大地座標 (X,Y,Z 或 φ, λ, h)。在實際應用中，可以利用 GNSS 技術直接獲得觀測站 WGS84 座標系下的三維座標，即大地緯度 φ 、大地經度 λ 及大地高 h ；但傳統大地測量經反投影所獲得的大地座標不是真正的三維大地座標，其本質上屬於二維 + 一維的座標系統，平面座標的基準為 Hayford 參考橢球，但高程為平均海水面高而非真正的橢球高，在轉換過程中此高程的誤差會引起空間直角座標誤差。

為此，本澳於 2009 年藉著將澳門方格網座標連結至 ITRF2005，須要重新求定一套座標轉換參數的時機，引入二維 + 一維的座標轉換關係，平面使用二維六參數轉換 (附件一)，高程則利用參考橢球面與大地水準面或平均海平面之間的差距來實現，唯有這樣，水準高才能轉換為大地高 (詳見 5.)。二維的轉換過程如下：



二維 + 一維的座標轉換關係無疑是較三維合理，轉換所得座標亦不會受大地高誤差的影響，但在應用上一般需要將平面及高程部份獨立處理，較為不便。因此，本局同時提供 ITRF2005 與澳門方格網座標的三維轉換參數 (附件二)，以便使用者根據各自的需要選擇使用。

5. 高程基準轉換

澳門採用的高程系統為平均海平面水準高，此高程值 (H_L) 是地面點到平均海平面的距離，而 GNSS 橢球高 (H_{WGS}) 是地面點沿參考橢球的法線方向到參考橢球面的距離，它們之間存在一個差值關係：$H_L = H_{WGS} - diff$。這個差值是不規則變化的，在不同地點是不等的，可以通過數學手段來擬合出一個差值模型。方法是利用均勻分佈在全澳的觀測重合點的水準高程及 WGS84 高程，並選用一個多項式高程擬合模式，求取有關擬合參數 (附件三)；透過 GNSS 觀測獲得橢球高的測量點則可利用已知參數求取其高程差值，從而由上述關係式得出水準高程。

6. 座標轉換例子

二維轉換		1	2	3
ITRF2005 大地座標	緯度	22° 11′ 40.000″ N	22° 09′ 30.000″ N	22° 07′ 20.000″ N
	經度	113° 32′ 50.000″ E	113° 32′ 50.000″ E	113° 34′ 50.000″ E
	橢球高 (m)	10.00	20.00	30.00
ITRF2005 投影座標	E 座標 (m)	21108.83	21109.12	24548.52
	N 座標 (m)	18012.07	14013.39	10015.35
澳門方格網座標	E 座標 (m)	20800.08	20802.10	24243.21
	N 座標 (m)	18145.04	14146.39	10149.87

三維轉換		1	2	3
ITRF2005 大地座標	緯度	22° 11′ 40.000″ N	22° 09′ 30.000″ N	22° 07′ 20.000″ N
	經度	113° 32′ 50.000″ E	113° 32′ 50.000″ E	113° 34′ 50.000″ E
	橢球高 (m)	10.00	20.00	30.00
ITRF2005 直角座標	X 座標(m)	-2360431.93	-2361038.62	-2364796.74
	Y 座標(m)	5416409.60	5417801.75	5417816.89
	Z 座標(m)	2394366.28	2390667.16	2386967.10
Hayford 直角座標	X 座標(m)	-2360227.87	-2360836.14	-2364595.60
	Y 座標(m)	5416714.29	5418105.72	5418119.66
	Z 座標(m)	2394521.78	2390822.68	2387124.02
Hayford 大地座標	緯度	22° 11′ 44.325″ N	22° 09′ 34.327″ N	22° 07′ 24.381″ N
	經度	113° 32′ 39.220″ E	113° 32′ 39.286″ E	113° 34′ 39.342″ E
	橢球高 (m)	13.89	23.79	33.54
澳門方格網座標	E 座標 (m)	20800.08	20802.10	24243.21
	N 座標 (m)	18145.04	14146.39	10149.87
	平均海平面高 (m)	13.89	23.79	33.54

GNSS 高程擬合轉換		1	2	3
澳門方格網座標	E 座標 (m)	20800.08	20802.10	24243.21
	N 座標 (m)	18145.04	14146.39	10149.87
ITRF2005 大地高程	橢球高 (m)	10.00	20.00	30.00
平均海平面高程	擬合高程 (m)	13.88	23.78	33.54

附件一：澳門大地基準轉換及地圖投影數據
ITRF2005/WGS84 與澳門方格網座標系統之間的二維轉換

本局於 2008 年利用本澳三個衛星定位系統參考站，將本澳的座標系統連結至國際地球參考框架(ITRF2005)上，參考時間為 2008 年 5 月 17 日 12:00 時 (曆元：2008.37568)。ITRF2005 與本地方格網座標的二維轉換關係如下：



澳門 TM 投影參數	
投影方式	橫軸麥卡托(TM)投影
原點橫軸方向的假設座標	20000.00m
原點縱軸方向的假設座標	20000.00m
原點緯度	22° 12′ 44.6300″ 北緯
原點經度	113° 32′ 11.2900″ 東經
高程基準面	平均海平面
尺度比率	1

二維六參數轉換公式：

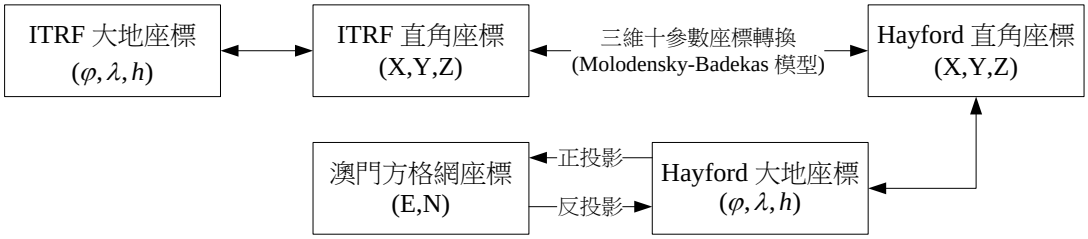
$$\begin{bmatrix} E_2 \\ N_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ dN \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ N_0 \end{bmatrix} + (1+m)\begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_1 - E_0 \\ N_1 - N_0 \end{bmatrix}$$

其中 dE, dN 為平移參數，α 為旋轉參數，m 為尺度參數，E_0, N_0 為旋轉中心，E_1, N_1 為原座標系下平面直角座標，E_2, N_2 為目標座標系統下的平面直角座標。

二維六參數	由：ITRF2005/WGS84 至：澳門方格網	由：澳門方格網 至：ITRF2005/WGS84
旋轉原點	E_0：21995.742m N_0：14829.896m	E_0：21688.365m N_0：14963.270m
E 方向平移量	-307.377m	307.377m
N 方向平移量	133.374m	-133.374m
旋轉量	-1′ 29.586″	1′ 29.586″
尺度比率	-6.513 ppm	6.513 ppm

附件二：澳門大地基準轉換及地圖投影數據
ITRF2005/WGS84 與澳門方格網座標系統之間的三維轉換

本局於 2008 年利用本澳三個衛星定位系統參考站，將本澳的座標系統連結至國際地球參考框架(ITRF2005)上，參考時間為 2008 年 5 月 17 日 12:00 時 (曆元：2008.37568)。ITRF2005 與本地方格網座標的三維轉換關係如下：



三維十參數轉換公式：

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} + (1+m)\cdot R \cdot \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

$$R(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix}$$

其中 dX, dY, dZ 為平移參數，α, β, γ 分別為 X,Y,Z 軸旋轉量，m 為尺度參數，X_0, Y_0, Z_0 為旋轉中心，X_1, Y_1, Z_1 為原座標系下空間直角座標，X_2, Y_2, Z_2 為目標座標系統下的空間直角座標。

三維十參數	由：ITRF2005/WGS84 至：澳門方格網	由：澳門方格網 至：ITRF2005/WGS84
參考橢球體 A	GRS 1980	國際海福特
參考橢球體 B	國際海福特	GRS 1980
轉換模式	莫洛金斯基-巴德卡斯	莫洛金斯基-巴德卡斯
旋轉原點	X_0：-2361757.652 m Y_0：5417232.187 m Z_0：2391453.053m	X_0：-2361554.788 m Y_0：5417536.177 m Z_0：2391608.926 m
X 方向平移量	202.865 m	-202.865 m
Y 方向平移量	303.990 m	-303.990 m
Z 方向平移量	155.873 m	-155.873 m
X 軸旋轉量	34.067″	-34.079″
Y 軸旋轉量	-76.126″	76.126″
Z 軸旋轉量	-32.647″	32.660″
尺度比率	-6.096 ppm	6.096 ppm

澳門 TM 投影參數	
投影方式	橫軸麥卡托(TM)投影
原點橫軸方向的假設座標	20000.00m
原點縱軸方向的假設座標	20000.00m
原點緯度	22° 12′ 44.6300″ 北緯
原點經度	113° 32′ 11.2900″ 東經
高程基準面	平均海平面
尺度比率	1

附件三：水準高程與 WGS84 高程的轉換

水準高程(H_L)與 WGS84 高程(H_{WGS})的關係式：$H_L = H_{WGS} - diff$ ------ (1)

多項式高程擬合公式：$diff_i = a_1 + a_2E_i + a_3N_i + a_4 E_i^2 + a_5 E_i N_i + a_6 N_i^2$ ------ (2)

利用重合點求得的擬合參數：

a_1=	-5.1810704571	a_4=	-0.0000000017
a_2=	0.0001223073	a_5=	-0.0000000007
a_3=	-0.0000163659	a_6=	0.0000000001

應用例子：於一控制點進行 GNSS 觀測，獲得 WGS84 的經緯度及橢球高 (22° 11′ 40.000″ N，113° 32′ 50.000″ E，10.00 m)，經投影及二維六參數轉換得本澳方格網 E,N 座標為 (20800.08 m, 18145.04 m)，代入式(2) 得 diff=-3.88m，再代入式(1)，得 H_L = 13.88 m。