

利用最小二乘支持向量機擬合衛星星曆 對於單點定位影響之研究

The Study of the Point Positioning Influence by Least Squares Support Vector Machine Fitting on GPS Ephemerides

高書屏¹ 徐超偉²

Szu-Pyng Kao Chao-Wei Hsu

摘要

本研究主要討論利用最小二乘支持向量機擬合廣播星曆、精密星曆和精密廣播軌道改正數，分析其採樣時間、擬合方法和星曆的選取對衛星坐標的影響，並評估擬合後的衛星坐標用於地面單點定位之精度成果。根據研究數據顯示，擬合 2 小時、採樣率約 75% 的衛星星曆，其衛星坐標三維分量擬合誤差仍可在精密星曆精度範圍內。而擬合之星曆單點定位成果較傳統廣播星曆定位內精度提升 0.3~0.7m 不等，定位得到之測站三維點位更接近已知值約 1.4m。

根據研究成果可將擬合之星曆應用於簡化目前單點定位所需之衛星坐標計算流程，解決了以往因衛星速度資料的缺乏，而無法直接將精密星曆應用於單點定位的問題，也證明此研究方法能夠提供有效且通用的高精度擬合軌道，提升單點定位之精度。

關鍵字：廣播星曆、精密星曆、精密廣播軌道改正數、最小二乘支持向量機、單點定位

¹國立中興大學土木工程學系測量資訊組 副教授

²國立中興大學土木工程學系測量資訊組 碩士生

Abstract

This study presents solutions for GPS orbit computation from broadcast, precise ephemerides, and the precise broadcast orbit correction using least squares support vector machine. Moreover, it analyzes impacts of sampling time and fitting method and the choice of ephemerides on precision of orbit, also evaluates the accuracy of ground point positioning after fitting. According to the experimental results, the fitting errors of satellite's 3D coordinate components are still in the range of precise ephemerides while using LSSVM fitting with training set of about 75% sampling rate in 2 hours. The single point positioning precision of fitting ephemerides are 0.3~0.7m higher, and the positioning satellite coordinates are about 1.4m closer than that obtained from original broadcast ephemerides computing.

Results show that the proposed approach by using fitting ephemerides to reduce computation process has been adopted. The problem that the precise ephemerides couldn't directly be used in ground single point positioning due to the lack of satellite velocity measurement in the past has been solved, and also proves that the studied approach is capable of providing an effective and universal precise fitting orbit, upgrading the accuracy of ground point positioning.

Keyword: Broadcast ephemerides, Precise ephemerides, Precise broadcast orbit correction, LSSVM, Single-point positioning.

一、前言與研究動機目的

利用全球定位系統(Global Position System, 簡稱 GPS)進行地面後方交會法,以求得地面單點定位坐標時,需不斷的計算及更新衛星坐標。為了達到快速、高精度的定位需求,即時的衛星坐標除了可由廣播星曆計算得到,亦可從高精度之 Igu 極快速精密星曆獲得。直接使用星曆參數計算衛星坐標,資料龐大且計算繁雜;另外若使用多項式擬合衛星軌道時,則仰賴統計的方法以獲得最佳的擬合階數,當階數過高會影響採樣的時間過長及計算的繁雜度。故本研究利用最小二乘支持向量機擬合法以簡化運算流程、提高定位精度等。

二、最小二乘支持向量機

Suykens 於 1999 年提出了一種新的支持向量機—最小二乘支持向量機(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)。由於支持向量機之限制式為一個不等式,使得計算複雜,且需要的儲存空間大;而最小二乘支持向量機採用最小二乘法之二次損失函數(quadratic loss function)替代傳統支持向量機的不敏感損失函數,且將限制條件改為等式,使求解過程轉換為一組線性方程式,讓求解速度加快、效率高,儲存空間相對較小,更適合求解大規模的問題,在函數估中得到廣泛的運用(Suykens, 1999)。最小二乘支持向量機是由支持向量機延伸而來,同樣地會有線性問題與非線性問題,但由於本研究探討的是擬合運行衛星的坐標,衛星的軌道因受到多種因素而為一擾動軌道,故採用非線性最小二乘支持向量迴歸為佳(沈昱廷, 2011),而附加研究所加入之擬合鐘差則採用線性核函數(雷雨 等, 2013)。

面對非線性問題,可以利用事先選擇的特徵函數將輸入資料映射到更高維之特徵空間,轉化成線性問題加以解決,並巧妙的以原始資料之核函數取代高維特徵空間中點的運算。其理論部分請參閱徐超偉(2013),於此不再加以贅述。

本文徑向基核函數以單形法(simplex method)配合交叉驗證(cross validation)作為選擇最佳參數的方法,其應用上較為普遍且易於實現。單形法可以利於多維無約束之非線性優化,交叉驗證可讓模型避免過度學習(over-fitting) (Brabanter K. et al., 2010)。

三、研究方法與步驟

本研究之步驟分為以下六項加以詳細說明:

1.數據資料取得:

由 IGS 和 IGN 網站下載廣播星曆和精密星曆，利用衛星坐標解算程式解算廣播星曆得到廣播衛星軌道，而精密星曆直接提供了精密衛星軌道，得到以上兩者，即可求得精密廣播軌道改正數。

2.以 LSSVM 擬合衛星軌道建模

將時間(衛星參考時刻)作為輸入量，三維坐標和鐘差分別作為輸出量，擬合達設定之 RMSE 值。模型建立時，參數的選擇是非常重要的，本文採用 RBF 核函數擬合衛星軌道(Polona, 2009)，以線性核函數擬合精密星曆鐘差(雷雨 等，2013)。

- 初始化模:資料分成擬合點(訓練樣本)與檢核點(測試樣本)，並將所選之交叉驗證法，結合 RBF 核函數，建立最小二乘支持向量機模型框架。
- 模型訓練:將擬合點(訓練樣本)輸入至模型框架訓練。
- 模型測試:將檢核點(測試樣本)輸入至訓練完成的最小二乘支持向量機模型中，進行迴歸預測，若輸出值之均方根誤差(RMSE)大於設定之閾值，造成在多次擬合後依然無法收斂，則重新建模。

3.軌道成果比較分析

為了比較 LSSVM 與其他迴歸方法或人工智慧學習法在本實驗中擬合成果的優劣，加入 RBF 類神經網路(RBF-ANNs)、Kriging 等擬合內插法進行分析。(戴小蕾 等，2013)

4.內插或外推任意時刻的衛星坐標和鐘差

模型建立完成後，將欲預推測之時間作為輸入量，輸入模型後即可得到該時刻的輸出量(三維坐標和鐘差)。(雷雨 等，2013)

5. 載入衛星觀測量

載入衛星觀測量(RINEX-O 檔)，可得知觀測頻率(1、5、10 秒/次)、觀測時間內所接收之各顆衛星編號以及偽距觀測量。由網站下載對應的星曆資料，即可擬合出相應時刻的衛星軌道。(張嘉強 等，2009)

6.單點定位成果比較分析

將衛星觀測量和軌道三維坐標和鐘差，進行後方交會之單點定位法，並

加入適當的改正，以求得測站坐標，並分析實驗中各種擬合後的星曆用於單點定位成果優劣。

(一)單點定位

由於坊間所流傳之單點定位程式種類繁多，所包含之改正模型及成效互異，為了使得擬合之星曆和傳統讀取廣播星曆計算參數之單點定位法在同一改正條件下比較，編撰了以下四種不同資料輸入之單點定位程式。(李洪濤，2000；高成發，1999；李鵬 等，2009；郝明 等，2008；陳弘農，2006)

一.擬合精密星曆單點定位

使用擬合精密星曆衛星坐標，鐘差使用擬合精密星曆鐘差(雷雨 等，2013)。

二.擬合廣播星曆單點定位

使用擬合廣播星曆衛星坐標，鐘差使用擬合精密星曆鐘差。

三.擬合精密廣播軌道改正數、廣播星曆單點定位

使用擬合精密廣播軌道改正數、擬合廣播星曆衛星坐標，鐘差使用擬合精密星曆鐘差。

四.傳統單點定位

使用廣播星曆 RINEX N 檔計算衛星坐標、鐘差。

程式中已改正相對論效應、地球自轉效應、偽距造成之時延、對流層遲滯效應(Hopfield's model)、電離層遲滯效應(Klobuchar's model)，最後可算出測站經緯度、後方交會出測站坐標、得到 DOP 值。

(二)實驗區測試

在擬合衛星軌道時，擬合點的分佈、密度、點的選擇等都會直接影響到擬合的成果，而衛星運動之速度相當的快，可達到每秒數公里，且衛星之參考時刻對應的空間三維坐標變化可視其為時間序列。因此如何將原本 15 分鐘區間的已知數據擬合並建立模型，再從模型內插出精度達公分甚至公厘等級的軌道成為了關鍵的問題。

回顧過去內插衛星星曆的相關文獻(Polona，2009)、(許建安，2010)、(陶庭葉，2012)、(郭秋英 等，2012)，透過在限制相同條件之下，比較分析最小二乘支持向

量機與其他不同方法對擬合衛星星曆之成效，而在目前所回顧之文獻中，成果分析精度最佳者為 2009 和 2012 年分別由 Polona 和陶庭葉所使用的 RBF 類神經網路，故本論文將以 RBF 類神經網路作為主要比較對象，並加入擅長於擬合空間距離加權插值的 Kriging 法同時比較。

然而文獻中指出人工智慧學習法(例:RBF-ANNs)，大多可以任意精度的逼近單值的連續函數。(陶庭葉，2012)考慮以上條件，本論文捨棄全擬合訓練方式，而採取更嚴苛的方式採樣訓練：以等差數列的方法挑選實驗序列始末及間距相當的中間點作為擬合點以建立模型測試內插能力，接著將等差數列間距擴大逐漸減少擬合點數量，並盡量保持資料點之間呈均勻分佈且包覆所有資料點，餘下其它點則當作檢核點，再以均方根誤差作為成果分析之依據。而比較在擬合總時間段較長的實驗區(24 小時)或短時間段(依照廣播星曆 2 小時間隔)的擬合成果，試驗提高軌道擬合精度以利於應用在單點定位上。

四、研究成果與分析

(一) 24 小時軌道擬合成果分析

由 IGS 及 IGN 網站下載 2012 年 8 月 6 日 0 時至 24 時 PG07 衛星之廣播星曆和精密星曆，並計算每 15 分鐘之精密廣播軌道改正數。分別對這三種數據資料擬合，從 24 小時共 97 筆資料中，取 1, 3, 5...95, 97 為訓練樣本，2, 4, 6...94, 96 作為測試樣本，計算其 X、Y、Z 之 RMSE 值和衛星三維點位 r 作為精度評估，以測試比較擬合長時間段時 LSSVM 和 RBF-ANNs 和 Kriging 之內插能力，實驗成果如圖 1.~圖 3.、表 1.~表 3. 所示。

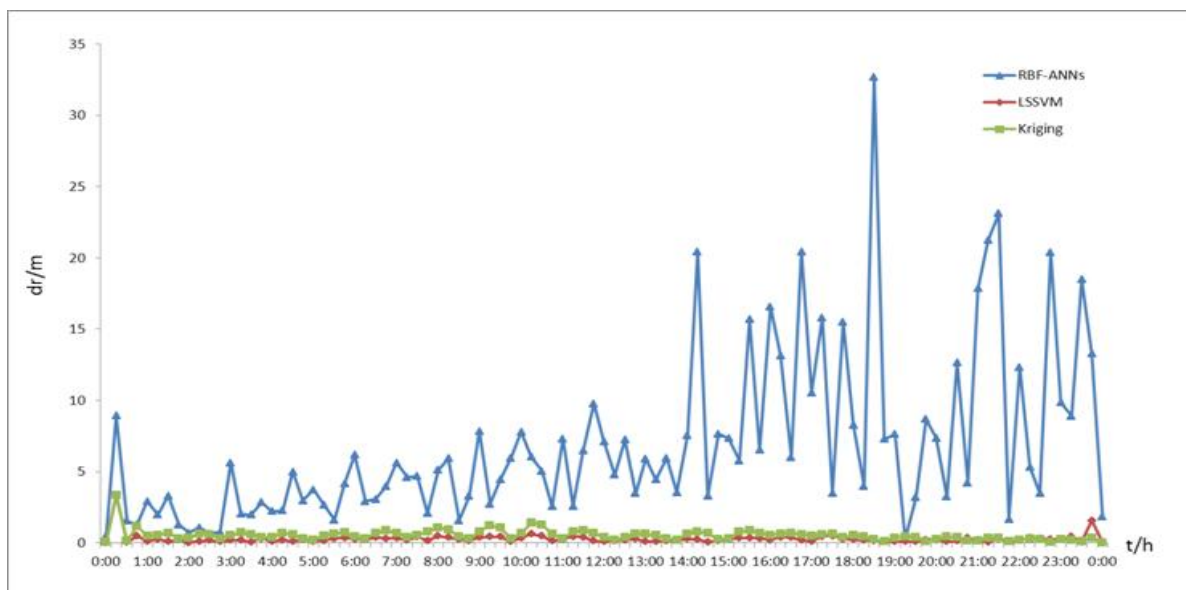


圖 1. 廣播星曆衛星三維坐標擬合差值比較圖

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	±0.350	±0.248	±0.163	±0.459
RBF-ANNS	±1.777	±2.253	±8.495	±8.967
Kriging	±0.304	±0.419	±0.757	±0.918

表 1. 7 號衛星廣播星曆軌道擬合比較表

$$r = \pm \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

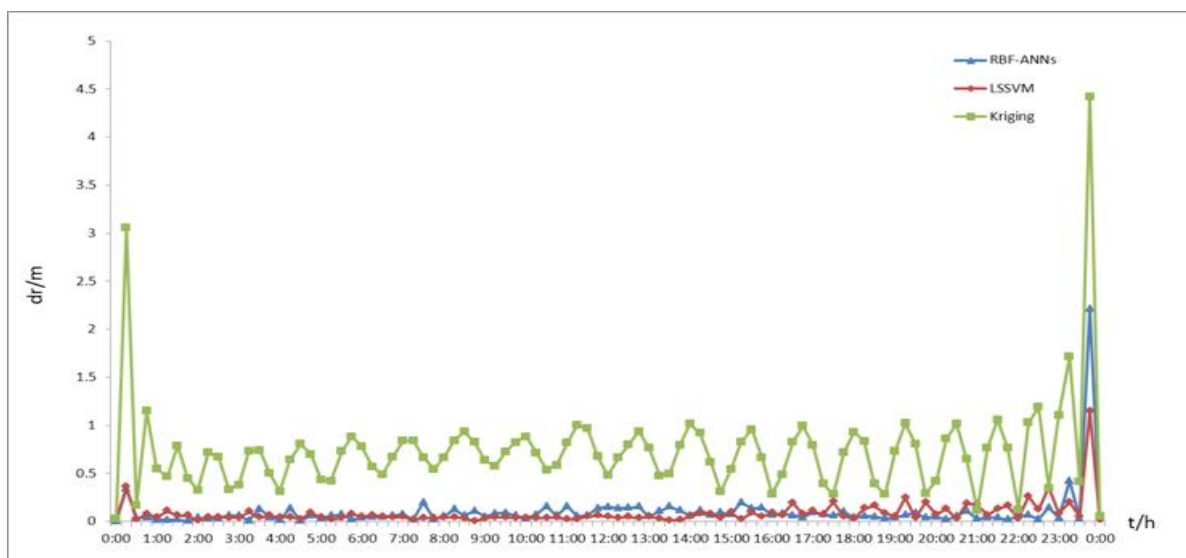


圖 2. 精密星曆衛星三維坐標擬合差值比較圖

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	±0.089	±0.095	±0.080	±0.153
RBF-ANNS	±0.026	±0.236	±0.061	±0.245
Kriging	±0.269	±0.368	±0.777	±0.901

表 2. 7 號衛星精密星曆軌道擬合比較表

$$r = \pm\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

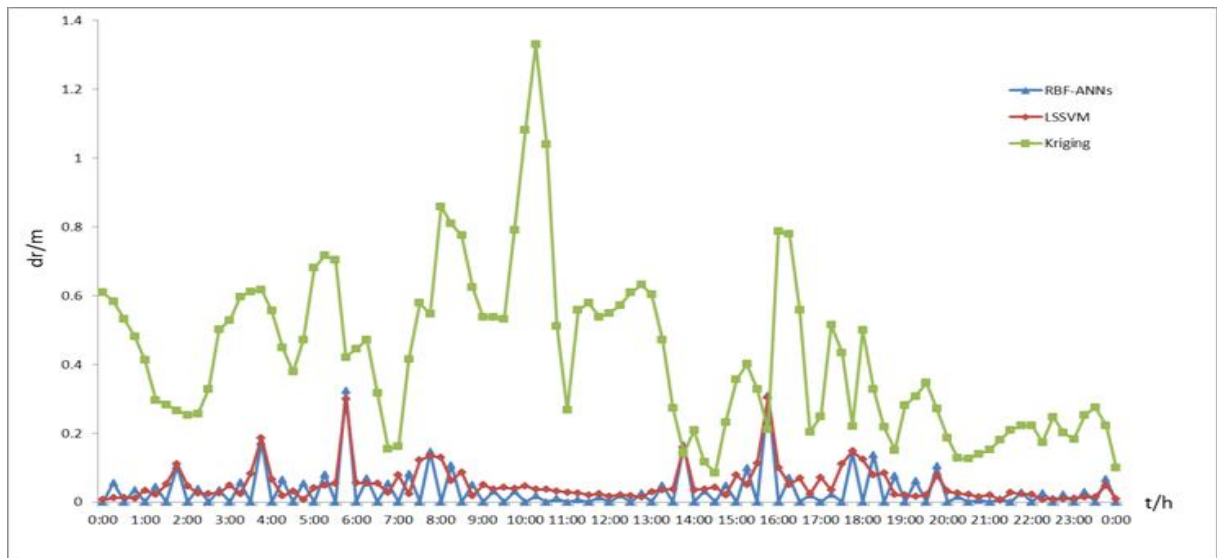


圖 3. 精密廣播改正數三維擬合差值比較

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	±0.054	±0.029	±0.038	±0.073
RBF-ANNS	±0.050	±0.027	±0.035	±0.067
Kriging	±0.228	±0.399	±0.155	±0.485

表 3. 7 號衛星精密廣播軌道改正數擬合比較表

$$r = \pm\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

從本節實驗中可以歸納：在 24 小時的擬合時間段，RBF-類神經網路不適合擬合廣播星曆及精密星曆，但在擬合精密廣播軌道改正數時表現最佳；LSSVM 在各種星曆擬合表現皆良好，唯有在擬合精密廣播軌道改正數時成果與 RBF-類神經網路擬合法在伯仲之間；而 Kriging 僅適合擬合廣播星曆衛星坐標。

(二) 擬合 2 小時星曆軌道以及改正數成果分析

由上一小節實驗成果所示，LSSVM 擬合 24 小時星曆軌道坐標，整體上雖可達到精度需求，但仍有小部分(擬合端點處)差值過大的現象發生。配合廣播星曆更新頻率，在本小節中訂定擬合時間段為 2 小時，以期能透過縮小擬合時間段降低擬合誤差。

由 IGS 及 IGN 網站下載 2012 年 8 月 6 日 0 時至 2 時之廣播星曆和精密星曆，計算每 15 分鐘之精密廣播軌道改正數，從 2 小時共 9 筆資料(ex:0:00、0:15、0:30、0:45、1:00、1:15、1:30、1:45、2:00)中，取第 1, 2, 4, 7, 8, 9 筆當作訓練樣本作擬合，其餘資料當作檢核，計算其 RMSE 值作為精度評估，以測試比較擬合短時間段時 LSSVM 和 RBF-ANNS 和 Kriging 之內插能力，實驗成果如圖 4.~圖 6.、表 4.~表 6. 所示。

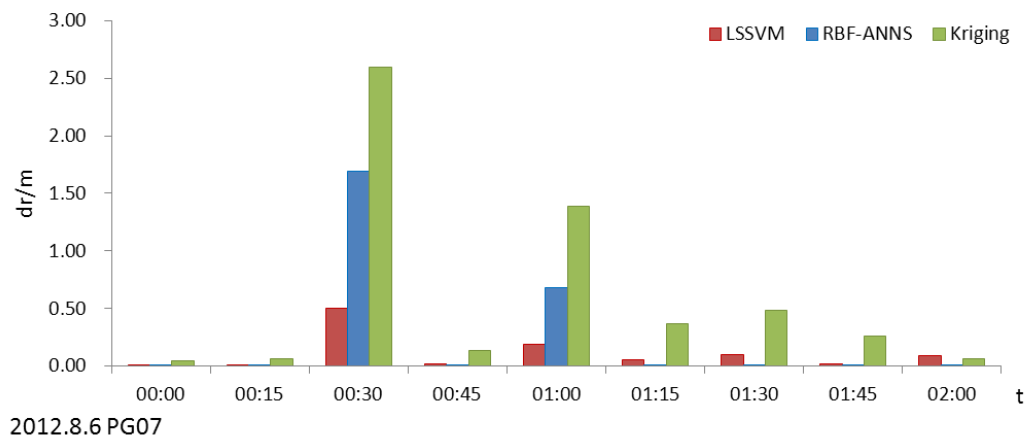
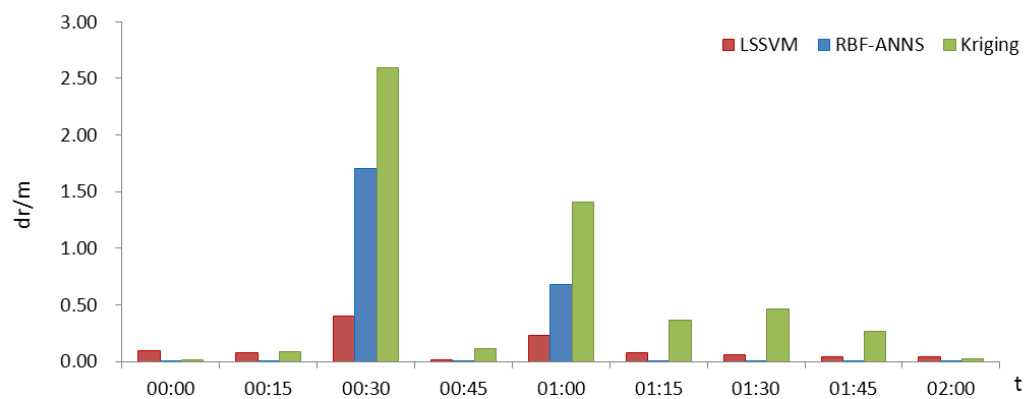


圖 4. 擬合 2 小時廣播星曆軌道差值圖

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	0.073	0.099	0.138	0.185
RBF-ANNS	0.412	0.445	0.039	0.608
Kriging	0.415	0.522	0.754	1.007

表 4. 2 小時廣播星曆軌道擬合比較表

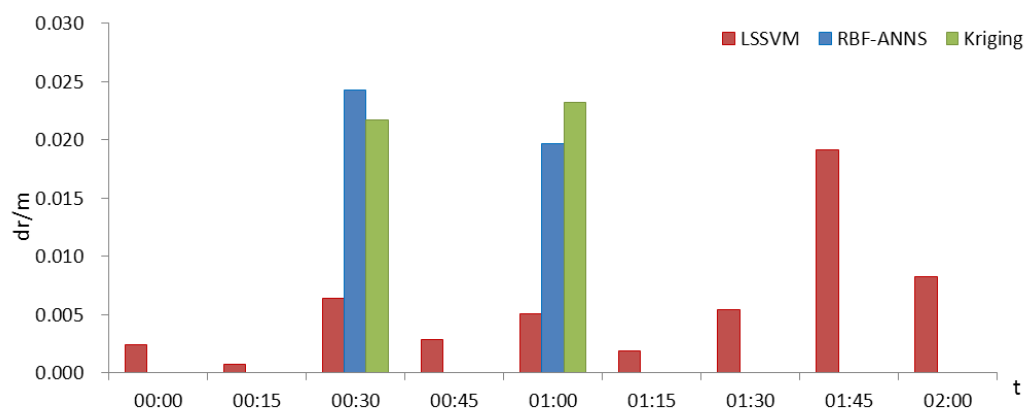


2012.8.6 PG07

圖 5. 擬合 2 小時精密星曆軌道差值圖

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	0.070	0.085	0.122	0.164
RBF-ANNS	0.415	0.447	0.038	0.611
Kriging	0.418	0.524	0.753	1.008

表 5. 2 小時精密星曆軌道擬合比較表



2012.8.6 PG07

圖 6. 擬合 2 小時精密廣播軌道改正數差值圖

RMSE(m)	X	Y	Z	r
LSSVM	0.0002	0.0074	0.0018	0.0076
RBF-ANNS	0.0087	0.0038	0.0044	0.0104
Kriging	0.0003	0.0099	0.0038	0.0106

表 6. 2 小時精密廣播軌道改正數擬合比較表

綜合本小節成果，利用 LSSVM 擬合 2 小時星曆資料以內插區間任意時刻的坐標是完全可行的。

(三)單點定位成果分析

經過前兩小節的實驗測試，LSSVM 無論在擬合廣播星曆、精密星曆和精密廣播軌道改正數皆有高通用性和高精度的表現，甚至也能擬合精密星曆所提供之鐘差，因此單點定位程序中所使用之各類星曆軌道坐標以及鐘差，均採用 LSSVM 加以擬合。(雷雨 等，2013)

由 IGS 及 IGN 網站下載 2010 年 5 月 24 日 0 時~24 小時之廣播星曆和精密星曆，切割成 2 小時(7200 秒)的時間段，利用前敘方法擬合出每 10 秒 1 筆的廣播星曆、精密星曆、精密廣播軌道改正數(擬合精密星曆部分均已加入擬合鐘差)，對應 TC02 測站之衛星觀測資料(RINEX 0 檔-10 秒 1 筆)2010 年 5 月 24 日 0 時 0 分 0 秒~24 時 0 分 0 秒，進行單點定位，檢視其較差和內精度。

實驗假設:利用擬合方法加密之不同類型星曆軌道坐標，對同一基站(TC02)進行單點定位，其多路徑效應誤差、接收儀相位中心誤差以及雜訊干擾...等影響 GPS 觀測量的因素，可視為相同，實驗成果如圖 7.、表 7.~表 8. 所示。

已知點 TC02 空間直角坐標 X: -2971880.493 Y: 5009439.772 Z: 2590395.420

單位:公尺

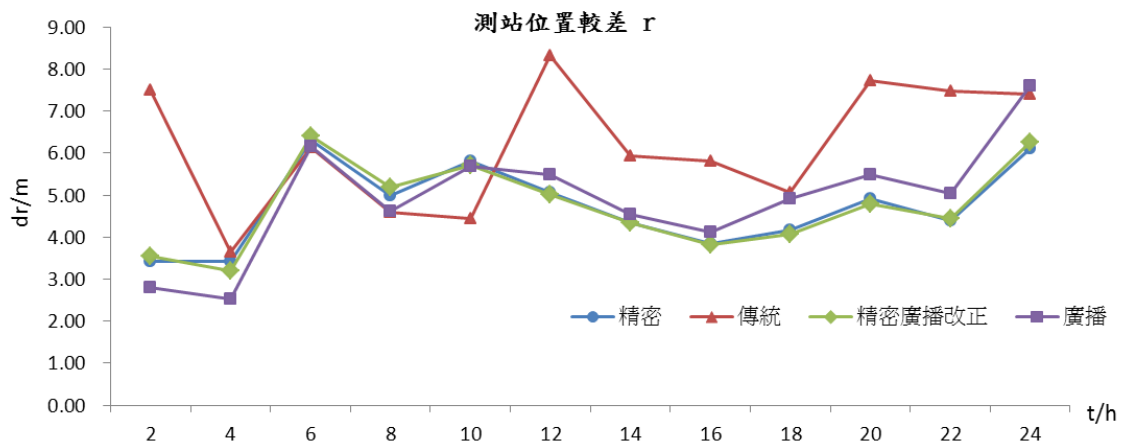


圖 7. TC02 測站 5 月 24 日 24 小時單點定位成果比較圖

	測站空間直角坐標			內精度	
	X	Y	Z	水平方向	垂直方向
平均					
精密	-2971877.108	5009442.399	2590394.897	0.75	1.60
傳統	-2971877.364	5009442.452	2590397.155	1.23	2.30
精密廣播	-2971877.041	5009442.151	2590395.31	0.87	1.70
廣播	-2971877.062	5009442.227	2590395.402	1.15	2.06

表 7. TC02 測站 5 月 24 日單點定位成果比較表

	與已知值較差			
	X	Y	Z	r
平均				
精密	2.75	2.87	0.52	4.73
傳統	3.13	2.68	1.74	6.17
精密廣播	2.82	2.77	0.53	4.73
廣播	2.93	2.65	0.45	4.91

表 8. TC02 測站 5 月 24 日單點定位較差表

如圖 7.和表 7.、表 8. 所示，擬合精密星曆單點定位成果坐標，平均值之較差小於傳統單點定位約 1.44 公尺，定位內精度提高約 0.48~0.7 公尺。擬合精密廣播軌道改正數單點定位成果坐標，平均值之較差亦小於傳統單點定位約 1.44 公尺，定位內精度提高約 0.36~0.6 公尺。而擬合廣播星曆單點定位成果坐標，平均值之較差亦小於傳統單點定位約 1.26 公尺，定位內精度提高約 0.08~0.24 公尺。

五、結論

利用 LSSVM 擬合 2 小時以及 24 小時廣播星曆軌道坐標、精密星曆軌道坐標和精密廣播軌道改正數之成果皆表現良好，在此證明了 LSSVM 擬合各星曆之高精度和高通用性。擬合精密星曆和精密廣播軌道改正數之單點定位法，定位之三維點位較傳統定位法更接近已知值約 1.4 公尺，定位內精度提高約 0.3~0.7 公尺；而擬合廣播星曆軌道之單點定位法定位成果提升有限。

本研究所使用之單點定位方法，僅採用單頻偽距觀測值、非差相位觀測，即使已加入導航電文中提供的改正模型，電離層、對流層折射影響依然甚鉅。建議在爾後能用其他更精確的定位方法，如採雙頻 GPS 偽距和載波相位觀測值的無電離層組合...等精密單點定位，以確切判斷高精度軌道對單點定位成果之影響。

六、參考文獻

- 李洪濤 (2000) GPS 應用程序設計，科學出版社。
- 李鵬、熊永良、黃育龍、楚亮(2009) GPS 星曆精度對精密單點定位的影響，測繪科學，第三十四卷，第二期，第 15-17 頁。
- 沈昱廷 (2011) 以最小二乘支持向量機擬合區域性大地起伏值之研究—以台中地區為例，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- 郝明、丁希杰 (2008) GPS 精密單點定位的數據處理方法綜述，測繪工程，第十七卷，第五期，第 60-62 頁。
- 高成發 (1999) GPS 測量，人民交通出版社。
- 張嘉強、黃立信、李信佑 (2009) GPS 內插觀測資料應用於中基線動態定位之測試評估，中正嶺學報，第三十七卷，第二期，第 87-103 頁。
- 許建安 (2010) 廣播星曆擬合內插方法之研究-以台中市 TC02 GPS 基站為例，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
- 郭秋英、郝光榮、陳曉岩 (2012) 中長距離網路 RTK 大氣延遲的 Kriging 插值方法研究，武漢大學學報，資訊科學版，第 37 卷，第 12 期，第 1425-1428 頁。
- 陳弘農 (2006) 模擬 GPS/Galileo 雙衛星系統於台灣地區導航定位之研究，國立中興大學土木工程學系測量資訊組碩士論文。
- 陶庭葉 (2012) 利用 RBF 神經網路對 GPS 廣播星曆插值，大地測量與地球動力學，第 32 卷，第 2 期，第 44-46 頁。
- 雷雨，趙丹寧 (2013) 基於最小二乘支持向量機的鐘差預報，大地測量與地球動力學，第 33 卷，第 2 期，第 91-94 頁。
- 戴小蕾、樓益棟、李文 (2013) GPS 兩種廣播星曆參數擬合及外推精度分析，大地測量與地球動力學，第 33 卷，第 1 期，第 53-58 頁。
- De Brabanter K., Karsmakers P., Ojeda F., Alzate C., De Brabanter J., Pelckmans K., De Moor B., Vandewalle J., Suykens J.A.K. (2010), LS-SVMlab Toolbox User's Guide version 1.8, ESAT-SISTA, K.U.Leuven, Lirias number: x., Internal Report 10-146.
- Polona (2009) ,GPS orbit approximation using radial basis function networks. *Computers & Geosciences.*,vol.35, no.7,pp.1389-1396.