

國立中央大學

數學系
碩士論文

以點過程分析動作電位與
行為反應之關聯性

**The connection between the point process of
action potentials and the reaction**

研究生：柯正玲

指導教授：單維彰 博士

中華民國九十八年六月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(98 年 4 月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

- (V) 同意 (立即開放)
 () 同意 (一年後開放)，原因是：_____。
 () 同意 (二年後開放)，原因是：_____。
 () 同意 (三年後開放)，原因是：_____。
 () 不同意，原因是：_____。

以非專屬、無償授權國立中央大學圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名：_____ 柯正玲 _____ 學號：_____ 962201003 _____

論文名稱：_____ 以點過程分析動作電位與行為反應之關聯性 _____

指導教授姓名：_____ 單維彰 博士 _____

系所：_____ 數學 所 博士班 碩士班

日期：民國 98 年 7 月 6 日

備註：

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔，紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填聲明書，詳細說明與紙本聲明書請至 <http://thesis.lib.ncu.edu.tw/> 下載。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。
3. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館（以統一代轉寄給國家圖書館）。
4. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

數 學 學系/研究所 柯正玲 研究生

所提之論文

以點過程分析動作電位與行為反應之關聯性

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 單維彰 (簽章)

98年6月25日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

數學學系/研究所 柯正玲 研究

生所提之論文

以點過程分析動作電位與行為反應之關聯性

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人 蔡孟利
委員 單維彰
嚴健彰

中華民國 98 年 7 月 6 日

摘要

本論文討論老鼠尾巴受到刺激時，其腦部感覺區域中多個神經元，所產生的動作電位樣式。分析的資料型態是將真實訊號的動作電位，轉譯為離散的時間序列，在統計上稱為點過程。對相同強度的外部刺激，尾巴產生不同程度的反應行為，透過單位時間動作電位發生次數的統計，進行訊號和反應行為間的關聯性分析。

針對常態下訊號的討論，發現感覺神經元本身並非穩定的點過程。於是進一步對不同的反應類型，分別探討刺激前和刺激後，單位時間動作電位發生次數的變化。觀察發生次數期望值的趨勢，分析不同反應行為的訊號特徵。另外，以刺激前後動作電位的數量差，觀察不利於分析的資料點及神經元，使得資料分析的特徵更顯著。

最後藉由討論得到的樣式特徵設計演算法，對訊號進行反應行為的分類測試。並由分類的結果，觀察刺激前後不同反應行為的神經訊號，找出特徵性最好的判斷範圍。以此驗證及說明，神經訊號與行為反應的關聯性。

關鍵字：點過程、動作電位、神經訊號。

Abstract

This paper discusses the neuron in the rat brain which produces action potentials when the rate tail receives the stimulation. We translate the action potentials of real signal to the discrete sequence, which is called point process. The tail has different response to exterior stimulation of the same intensity. And we use histogram with different bin sizes to analyze the connection between the neural signals and the reactions.

Considering the normal neural signals, we find that the point process isn't stationary. So we further analyze the variation of the counts for action potentials before and after the stimulation for the different reactions. By observing the expected value of the counts, we characterize the pattern of different reactions. Moreover, the patterns can be made more notable if we observe the disadvantageous data and neurons by using the difference counts of spikes before and after the stimulation.

Finally, we design an algorithm to classify the reactions with the neural signals. And by classified results, we observe the different response from stimulation and discover the better characteristic range. It can prove and explain the connections between the action potentials and the reactions.

Keywords: point process, action potentials, neural signals.

致謝辭

在中大的日子很快接近了尾聲，在碩士班兩年的學習，最要感謝我的指導教授 單維彰老師。老師不論是學問、生活態度，甚至許多創意與靈感的分享，都讓我獲益良多。雖然老師常常因為繁忙的工作必須四處奔波，仍然堅持對爬山與教學的熱誠，這樣的生活態度讓我很嚮往與佩服。謝謝老師在論文研究的過程中，給予很多意見和想法引導我做研究的方法與態度，並在後期費心教導我寫作技巧幫助我完成校稿。

還要感謝另一位指導教授 蔡孟利老師在生物領域的教導。謝謝老師常不辭辛勞在宜蘭台北兩地奔波，給予我建議和鼓勵。特別是在暑假提供了寶貴的機會，讓我能實際接觸並操作生物實驗，對論文所討論的資料能有更深入的了解。也謝謝口試委員 嚴健彰老師的指導，讓我的論文能夠更完整。

謝謝同門的夥伴仁馨和同學元貞，雖然大家的研究方向不同，但有妳們一起上體育課，一起聊天互相打氣，總是可以回復很多元氣。研究室的小史、彥霖、釗哥、誠聰、凱媛、普普、建霖，慶幸有你們在沉悶的時期，帶來數不清笑料和趣事。不論是慶生、競賽、跑步還是打球，你們讓我在碩班的回憶變的很精采。還有系圖的熊姐，謝謝妳永遠很阿沙力地幫忙，以及熱血地分享各種資訊。另外，我的長期戰友：涵涵、翔皓、依庭、志豪，感謝你們即使分散各地打拼，仍然時常關心我的心情和進度，希望欠很久的聚餐可以趕快實行囉！

最後一定要感謝我的家人，總是給予最大的包容來支持我的選擇，在這裡與他們一起分享畢業這份喜悅。

柯正玲 於最後一個暑假

中華民國 98 年 7 月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝辭	iii
目錄	iv
圖目錄	v
表目錄	vi
1 研究動機	1
2 背景資料	3
2.1 神經電訊號的產生與傳遞	3
2.1.1 神經元	3
2.1.2 細胞膜的擴散	4
2.1.3 軸突的電性活動	6
2.2 取得訊號資料的實驗過程	7
2.3 實驗數據說明	9
3 點過程	10
3.1 卜瓦松分配 (Poisson Distribution)	10
3.2 數值模擬	12
3.3 實際訊號	20
3.3.1 訊號的卜瓦松檢驗	20

3.3.2	訊號的穩定性檢驗	23
4	刺激前後動作電位特徵	29
4.1	刺激前後動作電位發生數量	30
4.1.1	刺激前後 1 秒的討論	30
4.1.2	刺激前後固定時間的動作電位差	36
4.1.3	刺激前後每 0.1 秒的討論	41
4.2	神經元的篩選	47
4.3	固定時間的訊號數量分布	51
5	動作電位數量與刺激的關聯	57
5.1	機率分布模型	57
5.2	機率判斷法	60
5.3	機率累積判斷法	64
5.4	大小甩尾的機率累積判斷	69
6	結論與建議	72
6.1	訊號處理的說明與建議	72
6.2	研究結論與建議	73
6.3	特殊現象	75
	參考文獻	78
	附錄	79

圖目錄

1	卜瓦松實驗模擬訊號 $a.b.c.d.$ 的點過程	13
2	卜瓦松隨機函數機率直方圖	15
3	指數分布模擬訊號機率直方圖	15
4	模擬資料 (a) 與 (b) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖	17
5	模擬資料 (c) 與 (d) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖	17
6	卜瓦松實驗模擬訊號 f 的點過程	18
7	模擬資料 (f) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖	19
8	(資料一) 平均數與變異數相對差異	21
9	(資料一) 穩定卜瓦松檢驗	24
10	(資料二) 穩定卜瓦松檢驗	24
11	(資料三) 穩定卜瓦松檢驗	25
12	(資料四) 穩定卜瓦松檢驗	25
13	(資料五) 穩定卜瓦松檢驗	26
14	(資料六) 穩定卜瓦松檢驗	26
15	(全部資料) 刺激前一秒發生次數直方統計圖	32
16	(全部資料) 刺激後一秒發生次數直方統計圖	32
17	(全部資料) 刺激前一秒發生次數折線圖	33
18	(全部資料) 刺激後一秒發生次數折線圖	33
19	(3 L 資料) 刺激前一秒發生次數直方統計圖	34
20	(3 L 資料) 刺激後一秒發生次數直方統計圖	34

21	(3 L 資料)刺激前一秒發生次數折線圖	35
22	(3 L 資料)刺激後一秒發生次數折線圖	35
23	(所有資料) 資料點的後前差值 $D(t_i)$ 直方統計圖	37
24	(左：刺激點，右：對照點) 後前差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖	38
25	對照點的後前差值 $D(t_i)$ 直方統計圖	38
26	(所有資料) 依類型分開統計 差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖	40
27	(3 L 資料) 依類型分開統計 差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖	40
28	(所有資料) 刺激前每 0.1 秒的動作電位發生次數統計圖	42
29	(所有資料) 刺激後每 0.1 秒的動作電位發生次數統計圖	42
30	(左：所有資料，右：3 L 資料) 刺激前後一秒內，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖	43
31	刺激後三秒，每0.1秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖	46
32	刺激後三秒，每0.1秒的動作電位發生次數期望值 <i>error bar</i> 圖	46
33	(不利神經元) 刺激前後每0.1秒的訊號發生次數期望值趨勢圖	49
34	(篩除後的神經元) 刺激前後每0.1秒的訊號發生次數期望值趨勢圖	49
35	(篩選前後神經元) 資料點 $D(t_i)$ 的負值比例趨勢圖	51
36	(所有資料) 每 0.5 秒前後動作電位發生數量分布圖	53
37	(篩後資料) 每 0.5 秒前後動作電位發生數量分布圖	53
38	(所有資料) 每 1 秒前後動作電位發生數量分布圖	54
39	(篩後資料) 每 1 秒前後動作電位發生數量分布圖	54

40	刺激前一秒動作電位平均發生率分類標準比例圖	59
41	刺激前後三秒，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖 . . .	76
42	刺激前後三秒，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值 <i>error bar</i> 圖	76
43	神經元訊號發生次數變化圖，資料一 (unit 1, unit 2)	81
44	神經元訊號發生次數變化圖，資料二 (unit 1, unit 2)	82
45	神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 1, unit 2)	83
46	神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 3, unit 4)	84
47	神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 5)、資料四 (unit 1) .	85
48	神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 2, unit 3)	86
49	神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 4, unit 5)	87
50	神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 6)、資料五 (unit 1) .	88
51	神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 2, unit 3)	89
52	神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 4, unit 5)	90
53	神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 6, unit 7)	91
54	神經元訊號發生次數變化圖，資料六 (unit 1, unit 2)	92
55	神經元訊號發生次數變化圖，資料六 (unit 3, unit 4)	93

表目錄

1	實驗資料說明	9
2	模擬訊號資料列表	14
3	時間範圍 T_k 對照表	16
4	(模擬訊號)不同單位長度的 $\bar{\lambda}$ 值	16
5	(模擬訊號 f) 不同單位長度的 $\bar{\lambda}$ 值	19
6	(實際訊號) 相對差異不符合標準的數量列表	22
7	(實際訊號) 時間範圍 T_k 對照表	23
8	(實際訊號) 穩定卜瓦松檢驗的統計數據	27
9	(實際訊號) 期望值趨勢線 T 檢定	45
10	(實際訊號) 個別神經元 $D(0.5)$ 值列表	48
11	資料固定時間 0.5 秒的訊號數量分布回歸線係數	55
12	資料固定時間 1 秒的訊號數量分布回歸線係數	55
13	使用機率標準判斷類型	60
14	刺激前一秒為標準，機率累積判斷結果	61
15	刺激後一秒為標準，機率累積判斷結果	63
16	刺激前後 1 秒，機率累積判斷結果比較	63
17	每 0.1 秒標準，刺激前 1 秒機率累積判斷結果	66
18	不同固定時間下，全體機率累積判斷結果比較	67
19	篩選後資料與全部資料的機率累積判斷結果比較	69

20	有甩尾的全體資料與篩選後資料，大小甩尾的機率累積判斷結果比較	70
21	機率模型不包含本身資料的機率累積判斷結果	74
22	訊號資料的檔案來源	79
23	不同資料來源的樣本個數	79

第 1 章 研究動機

由生物學中我們知道，當生物外部的接受器受到刺激，造成連結它的神經元電位活性改變，即為動作電位的產生。動作電位經由神經系統傳遞，觸發動作器而產生行為。藉由這些訊號，可以討論單一神經元或是一群同功能類別的神經元，如何分工與執行生物體內的各種機制。也就是說，生物對刺激的反應機制，是透過動作電位的發生才得以進行。所以神經訊號的實驗，通常控制一種固定的外部刺激，例如本實驗所討論的一熱刺激。針對這項刺激因素，觀察神經元產生的動作電位訊號。從這些訊號進一步討論並解釋，大腦如何藉由神經系統中的訊號傳遞來產生動作 [1]。本研究之初步動機就是想要了解，腦部特定區域探測到的多個神經元訊號，與刺激或動作有何關聯？

針對以上問題，本研究實驗的對象是訓練過的老鼠。實驗中的外部刺激，是在老鼠尾巴的固定位置，施以強度一定的雷射熱刺激。實驗所觀察的行為，是老鼠在刺激後的甩尾反應。經由儀器所紀錄的神經訊號，則是來自老鼠大腦皮層中尾巴的感覺區域。研究的目標除了對於訊號本身的分析與認識，更想要討論，甩尾反應的大小相對於神經元動作電位的特徵。也就是說，我們希望可以找出刺激後不同反應的訊號模型。最後我們希望實驗者可以直接從訊號的樣式，判斷刺激後尾巴會產生的反應類型。若能夠達到上述的目標，希望進一步的建構模型並設計學習機制，根據不同老鼠的訊號差異更新模型，達到更好的判斷。

本文後面幾章的內容安排如下。第二章概述生物訊號的基本背景，包括神經的構造與作用、動作電位的產生和原理，最後說明實驗的方法及所取得的訊號資料。本研究將訊號視為點過程，在第三章先說明點過程，以此模型驗證模擬訊號

與真實訊號。第四章開始對刺激前後的訊號資料，用不同的統計方法、觀察與分析。在第五章設計一種測試的方法，只透過對訊號樣式的分析，來判斷刺激後的反應型態。最後一章總結本研究的結果與討論。

第 2 章 背景資料

本章介紹生物訊號的背景知識，包括：神經電訊號的產生與傳遞，取得訊號資料的實驗過程。了解這些生物學上的背景知識，有助於增加數學判斷的正確性，以避免錯誤的發生。

2.1 神經電訊號的產生與傳遞

以下我們用三個小節，扼要說明神經系統的構造與作用，相關資料可參考 [3]。

2.1.1 神經元

神經系統是由產生及傳遞電化學衝動的神經元 (*neurons*)，以及幫助神經元功能的支持細胞 (*supporting cells*) 所組成。所以認識神經元的作用，就是神經訊號研究的基本問題。神經元又稱為神經細胞，是構成動物神經系統的基本單位。從外觀來看神經元長的像是擁有很多分支的大樹。神經元與支持細胞是組成神經系統的兩種主要細胞。神經元的特化使它可以對於物理及化學刺激產生反應，傳導電化學衝動並釋放化學調節因子。經過這樣的動作，神經元就能接受感覺刺激和學習記憶，或是控制肌肉及腺體。支持細胞分為很多種，且數量約為神經元的五倍之多，但作用皆為幫助神經元。

神經元依照構造和功能而分類。將衝動由感覺受器傳至中樞神經系統的稱為感覺神經元，將衝動由中樞神經系統傳至動作器的稱為運動神經元；而連絡神經元則是負責連絡或整合神經系統的功能。雖然各種神經元的大小形狀不盡相同，

但通常有三個主要的構成部份：一個細胞體、樹突與一條軸突。樹突 (*dendrites*) 與軸突 (*axon*) 是細胞體上的突起或是像樹枝一般的延伸物。細胞體 (*cell body*) 是神經元中膨大的部份，內含細胞核和尼氏小體 (*Nissl bodies*)，是神經元的營養中心，可以合成多種的巨大分子。

樹突是從細胞體的細胞質向外延伸的細小分支突起。相對於樹突，軸突是一個較長的突起。樹突是電衝動的接受區，並將接受到的電衝動傳至細胞體，而軸突則是將細胞體的電衝動傳出來。特別的是，周邊神經軸突被支持細胞－許旺氏細胞 (*Schwann cells*)－形成的髓鞘所環繞，形成神經膜。髓鞘 (*myelin sheath*) 是由許旺氏細胞，像片扁平的薄膜一層層捲繞包圍軸突而形成，外觀看起來就像一節一節的香腸。髓鞘間露出的軸突則稱為蘭氏結 (*node of Ranvier*)。因為軸突被許旺氏細胞包裹的部份如同一層絕緣物，僅剩蘭氏節的部分能夠產生神經衝動，髓鞘軸突中的神經衝動屬於跳躍式的傳遞。因此髓鞘軸突的訊號傳遞速度比無髓鞘軸突快。

2.1.2 細胞膜的擴散

在認識了神經系統主要傳遞訊號的基本細胞－神經元的組成與構造後。更進一步要了解電衝動在軸突、樹突與細胞體之間的運作。訊號的傳遞關鍵在於電衝動的產生，我們先介紹細胞膜的擴散和滲透作用，進而了解體內離子和分子如何引起動作電位的運動。

體內的所有細胞內外皆有電位差，也就是在細胞膜的兩側存在一個靜止膜電位 (*resting membrane potential*)；此電位差是由於細胞膜的通透性所造成。雖然分子或離子通過細胞膜的淨擴散，永遠是朝低濃度的方向進行，但因為細胞膜主

要由雙層磷脂質組成，所以非極性的脂溶性分子可以輕易的通過。較大的極性分子，就必須依賴特殊的載體蛋白 (*carrier proteins*) 運輸進入細胞內；這部份就不在本節的討論範圍。我們需要了解的，是同樣無法穿越磷脂質，帶電荷的無機鈉離子 (Na^+) 與鉀離子 (K^+)。這些離子的通透可以由細胞膜上的離子通道 (*ion channels*) 來達成。這些通道極為細小，是由某些橫跨細胞膜的蛋白質所形成。有些離子通道一直保持開啓的狀態，如此離子就能持續擴散的運動。但大部份的通道都不是如此，具有限制其開啓與關閉的閘門 (*gate*) 設置，如此一來，特定的生理刺激控制閘門的開關，進而改變離子通道的狀態。軸突細胞膜對於鈉離子 (Na^+) 與鉀離子 (K^+) 的通透性是由閘門所控制，此閘門會因為受到刺激而打開。而離子的淨擴散分為兩個階段進行，首先是鈉離子進入軸突，接著鉀離子移出，這樣的離子流動造成膜電位的改變，稱之為動作電位。

前面說過，離子通過細胞膜的淨擴散永遠是朝低濃度的方向進行，那麼如果逆濃度梯度——也就是從低濃度到高濃度——來移動分子和離子，就需要消耗細胞能量；這種運輸稱為主動運輸 (*active transport*)。鈉鉀幫浦 (Na^+/K^+ *pumps*) 即為其中一種很重要的主動運輸載體，可以運送兩個鉀離子進入細胞，同時將三個鈉離子趕出細胞。膜電位是代表細胞模內外的電位差，定義細胞模外的電位為 0mV ，則通常細胞內的負電位比細胞外多。神經元的靜止膜電位為 -70mV ，略高於鉀離子的平衡電位 -90mV (指防止鉀離子擴散到細胞外所需的膜電位)，於是有些鉀離子會漏出細胞膜。細胞的鈉鉀離子濃度並非在平衡狀態下，於是細胞藉由鈉鉀幫浦的主動運輸，來維持鈉離子與鉀離子濃度差的穩定。也就是說，鈉鉀幫浦可以平衡鈉離子和鉀離子的擴散來維持膜電位。

2.1.3 軸突的電性活動

特定離子通透性的改變，能夠造成部分細胞的膜電位變化。神經元的生理特色能夠產生並且傳導這些膜電位的變化，此種能力稱為神經元的興奮性或刺激性。當細胞膜對於特定的離子通透性增加，會使得離子順著濃度梯度移動，這些離子流只在擁有離子通道的特定區域進行。離子流所造成的微量電荷變化，可以藉由放置在細胞膜兩側的電極及示波器的轉換加以測量。假如適當的刺激使得帶正電荷的離子進入細胞中，造成細胞內外電位差減少，使得示波器顯示的電子線向下偏移，此電位的改變稱為去極化 (*depolarization*)。膜電位由去極化回復至靜止膜電位，則稱為再極化 (*repolarization*)，若刺激使得細胞內的膜電位比靜止膜電位的負電荷還要大，稱為過極化 (*hyperpolarization*)。

這些去極化、再極化和過極化的膜電位改變，都是因為細胞膜的淨離子流擴散而造成。電位的改變可能影響了離子閘門通道的開啓條件，稱為閾值。細胞的靜止膜電位為 -70mV ，當去極化達到閾值而引起鈉離子通道的開啓，細胞膜對鈉離子的通透性上升而順著濃度梯度進入軸突。帶正電的鈉離子大量進入細胞內，造成更明顯的去極化，使得更多的鈉離子通道開啓。於是造成鈉離子在細胞內增加的量與去極化的程度呈現正比的正回饋路線 (*positive feedback loop*)。大量的正電進入細胞內，導致膜電位及從 -70mV 激增為 $+30\text{mV}$ ，過高的膜電位使鈉離子通道陸續不活化而關閉。此時細胞的去極化仍持續著，引起了鉀離子閘門的開啓，使帶正電的鉀離子便順著濃度梯度擴散至細胞外，逐漸使再極化回復到靜止膜電位的狀態，稱為負回饋路線 (*negative feedback loop*)。這一連串鈉鉀離子的擴散與電位改變，就稱為動作電位或神經衝動 (*nerve impulse*)。膜電位由去極化到再極化，示波器中電子線所產生的一個尖峰也稱為尖峰電位或鋒值電位 (*spike*)。

想像軸突是一條走道，走道的兩側有代表鈉鉀離子通道的門，當走道起始處受到去極化的影響，使得鈉離子通道的門達到閾值而開啓，湧入許多帶正電的鈉離子進入通道，連帶影響隔壁或是附近的鈉離子門達到閾值而開啓。於是，走道此處的正電濃度就會上升，並開始向前不斷開啓鈉離子門以及增加走道的正電濃度。而每一處的鈉離子門在走道的電荷達到 $+30\text{mV}$ 時逐漸開始關閉，這時走道內過高的電位促使鉀離子門開始開啓，使得帶正電的鉀離子離開走道，直到回復到正常的膜電位狀態。所以從一開始的去極化刺激處，走道內的電位會因為上述的連鎖反應，使得動作電位向前傳遞了出去。當然這裡的傳遞，並不是訊號真的用傳的出去，而是指沿著走道產生了相同的去極化和再極化動作，使得動作電位好像被傳出去一樣，所以動作電位在傳遞過程中不會衰減，第一個動作電位和最後一個動作電位的大小相同。

而前面所說髓鞘軸突傳遞動作電位較快，是因為髓鞘軸突中髓鞘包圍造成軸突絕緣的效果，變成只有在髓鞘與髓鞘間的蘭氏結部分有離子通道。帶正電的鈉離子進入細胞內產生的去極化，只要足夠影響下一個蘭氏結中的鈉離子閘門，就能跳過髓鞘的部份進行動作電位的傳遞。這樣跳躍式的傳導，因為相同的長度只需產生較少的動作電位，所以訊號的傳遞會比無髓鞘軸突要來的快速。

2.2 取得訊號資料的實驗過程

前一小節中說明動作電位的產生與傳遞原理，本節說明如何透過電極來紀錄神經動作電位的發生，並討論訊號發生的過程樣式。因為知道了動作電位的傳遞原理，神經科學家結合電子工程，設計探針深入老鼠的腦部，對照腦部功能的區

域，探測特定的神經放電活動。

實驗的對象是一般的實驗室老鼠 (*rat*)，多探針電極固定在其腦部的尾巴感覺區域處。在安置探針的過程中，透過示波器和訊號的聲音轉換，輕微觸碰老鼠尾巴，確定探測到的訊號與老鼠的尾巴有直接的關聯。多探針電極是目前神經科學研究的標準工具，可以探測多個同區域的神經元同時產生的動作電位。這也是實驗想要紀錄的數據：多個神經元對於反應動作所產生的訊號關聯。

爲了要觀察尾巴刺激與感覺區域之神經動作電位間的關係。用固定強度的雷射熱能，對實驗的老鼠尾巴造成一熱刺激。所以討論的對象爲行爲反應與訊號點過程，這兩者間的作用關聯。除了紀錄動作電位，也將刺激的時間和老鼠的甩尾反應一併紀錄下來。原始的訊號透過儀器的數位化，以及濾波與門檻探測法篩除雜訊，再根據實驗需求作出神經元的分類，才紀錄爲訊號資料。根據神經訊號的全有全無律，和訊號傳遞過程中不會衰減的想法，分類每一隻老鼠所紀錄到的神經元數量。但是同一根探針所探測到的訊號並不一定單純是來自一個神經元。神經元密集分布在腦部，即使確定電極所偵測到的訊號與尾巴的感覺有關聯，也有可能因爲與神經元的距離遠近，或是探測到多個神經元同時產生的動作電位，而造成紀錄上波形的差異，分類也就必須隨之調整。經過分類後的訊號資料，以神經元爲單位，每一筆訊號資料的發生都來自單一的神經元。假設同一筆資料中不會有兩個神經元的動作電位，那麼只紀錄發生動作電位的時間，就將訊號資料就轉爲點過程的型式。最後每一隻老鼠所含有的訊號資料，就是每個神經元的鋒值電位發生時間點－訊號點過程，以及刺激發生的時刻。

2.3 實驗數據說明

本研究的動作電位實驗數據，來自國立宜蘭大學生物機電學系蔡孟利教授提供。訊號取得的過程，是透過探針紀錄老鼠大腦中，尾巴感覺區域的神經元電位變化。每一隻老鼠在紀錄的過程中，受到 20 ~ 30 次的雷射熱刺激。為了避免刺激過於頻繁，造成生物生理上的疲乏，而影響實驗的正確性，所以設定每個刺激前後相距約 7 ~ 10 秒作為緩衝。經由儀器所收集的數據，是每一個神經元產生動作電位的時刻，以及實驗者給予刺激的時刻。而刺激的時刻又以刺激後反應的大小，分成三類：大甩尾 (*Large*)、小甩尾 (*Small*)、不用尾 (*None*)。總共的資料包含六隻老鼠，各紀錄到不同數量個神經元，詳見表 1。

表 1: 實驗資料說明

資料編號	測到的神經元數量	刺激後大甩尾反應次數	刺激後小甩尾反應次數	刺激後不用尾反應次數	總刺激次數
資料一	2	16	6	7	29
資料二	2	17	4	0	21
資料三	5	18	2	0	20
資料四	6	11	8	4	23
資料五	7	18	2	0	20
資料六	4	15	13	2	30
總合	26	95	35	13	143

特別要說明的是，每一個資料就是一隻老鼠的實驗紀錄，當中雖然包含的神經元個數不同，但刺激的時刻會是相同的。例如，在資料一中的兩個神經元，它們的刺激時刻是相同的。所以若將每一個刺激都視為單一的資料點來看的話，大甩尾反應的資料點總共會有 408 個，小甩尾反應的資料點有 144 個，不用尾反應的資料點有 46 個。後面的章節將會用到這些資料點來作討論。

第 3 章 點過程

從前一章我們知道，動作電位是由於外部刺激使得神經元達到去極化電位，造成一個大小固定的尖峰電位 (*spike potentials*)。而根據神經系統的全有全無定律，只有電位達到閾值標準才會觸發動作電位。所以動作電位的紀錄可以表示成僅一個標記，而非一個波形。每一個標記都代表發生一個動作電位的事件。所以轉譯後的動作電位紀錄，是一種離散的時間序列。在統計學中，稱為點過程 (*point process*)。因此，大量的同步神經電位訊號，就是多維的點過程時間序列，並且是動態隨機的。換句話說，事件的發生是以某種機率模型的方式隨時間而改變 [2]。根據此觀點，我們從訊號的點過程機率分布，來探討神經元產生的動作電位。

3.1 卜瓦松分配 (Poisson Distribution)

卜瓦松過程是典型的點過程事件，其定義是在給定的連續區間內計算事件的次數，並滿足下列幾點性質：

1. 在任意兩個不相交的區間中，事件發生次數是互相獨立的。
2. 在單位時間 h 內，正好發生一次事件的次數機率近似 λh 。
3. 實際上在非常短的時間內，發生兩次或兩次以上的機率為零。

則稱為有參數 $\lambda > 0$ 的一個近似卜瓦松過程 (*approximate Poisson process*)。此過程所得的機率分配，稱為隨機變數 X 服從卜瓦松分配，其機率質量函數 (*p.m.f.*) 為：

$$f(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

其中參數 $\lambda > 0$ ，為單位時間中事件的平均發生次數 (*mean rate*)。

卜瓦松分配是很重要的離散型分配，並且應用廣泛；通常用來描述次數發生的機率分配。神經訊號的數據以 1 ms (0.001 s) 為單位，每一個單位時間上，動作電位只有發生與不發生兩種情形。根據卜瓦松點過程的定義，我們假設動作電位的點過程資料服從卜瓦松分配。令 $N(a_i, b_i]$ 為時間區間 $(a_i, b_i]$ 中所發生的事件次數，其中 $a_i < b_i \leq a_{i+1}$ ，由式(1)可推導：

$$Pr\{N(a_i, b_i] = n_i, i = 1, \dots, k\} = \prod_{i=1}^k \frac{[\lambda(b_i - a_i)]^{n_i} e^{-\lambda(b_i - a_i)}}{n_i!}. \quad (2)$$

將區間長度 $(b_i - a_i)$ 定為單位時間，其平均數 $\lambda(b_i - a_i)$ 代替了式(1)中的 λ 。

卜瓦松分配的最大特性，是在區間 $(a_i, b_i]$ 內事件發生的平均數 $M(a_i, b_i]$ 和變異數 $V(a_i, b_i]$ 相等，即

$$M(a_i, b_i] = \lambda(b_i - a_i) = V(a_i, b_i].$$

並且

$$\lambda = \frac{V(a_i, b_i]}{(b_i - a_i)}.$$

所以說，若動作電位的發生是符合卜瓦松過程，則以固定的單位時間長度 $\Delta t = |b_i - a_i|$ ，所計算出來的平均值以及變異數就應該相等，並由上面的式子可以算出其平均發生次數 λ 。

穩定的卜瓦松分配 (*stationary Poisson process*) 除了卜瓦松的基本定義條件，令外符合下列的條件：

- 對任意有限個單位時間所構成的範圍，其事件數一定都符合卜瓦松分配。
- 機率分布是穩定的，只與單位時間 $(a_i, b_i]$ 長度有關，與範圍的端點位置無關。

所以卜瓦松點過程在不同的時間區域下，其單位時間的平均數與變異數會相同，並且變異數與單位時間長度的比值會趨近一個常數。也可以說，取一段任意位置與長度的時間範圍，計算出來的 λ 值會穩定趨於一常數值，而不會隨著選取範圍的位置或長度而改變。如此則可以說這樣的資料符合穩定的卜瓦松分配。依照此想法在下一小節設計演算法，並驗證實驗紀錄的訊號性質。

3.2 數值模擬

上一小節所提出檢驗方法，是測試訊號點過程是否為穩定卜瓦松分配。我們先以數值模擬出一筆穩定的卜瓦松點過程訊號，驗證此測試方法的結果與標準。模擬訊號的方式，若使用卜瓦松分配的隨機函數進行模擬，所建構出的數據為每個單位時間內的發生次數，而並非像實際訊號的點過程時間資料樣式，列出動作電位的發生時間點。所以我們將藉由另一個機率模型－指數分配 (*exponential distribution*) 來建構模擬訊號。

假設時間隨機變數 τ 代表區間 $(a_i, b_i]$ 的長度。那麼根據卜瓦松分配，在長度為 τ 的區間中發生 0 次事件的機率，從式2 可以推導出

$$Pr\{N(0, \tau] = 0\} = e^{-\lambda\tau}. \quad (3)$$

由上式 3 得知 $e^{-\lambda\tau}$ 是在長度為 τ 的區間中沒有發生事件的機率。因此在隨機區間中，從起始點到第一次發生事件的時間長度大於 τ 的機率分配，是一個服從參數為 $1/\lambda$ 的指數分布，當 $\tau > 0$ 時的機率密度函數 (*p.d.f*) 為

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau}$$

我們常令 $\theta = 1/\lambda$ ，隨機變數 τ 的 *p.d.f.* 即為

$$f(\tau) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{\tau}{\theta}}$$

於是給定變數 λ' 決定參數為 $\theta = 1/\lambda'$ 的指數分配隨機函數，模擬兩兩動作電位的間隔時間。再將時間累計轉換後，建構出一筆類似實際資料型式的事件 (動作電位) 發生時間模擬訊號，圖 1 是對模擬訊號的前 40 秒點過程作圖，可以明顯看出相對於 λ' 值大小的訊號差異。將這筆訊號驗證是否符合普瓦松分配，再進行穩定普瓦松分配的檢驗。

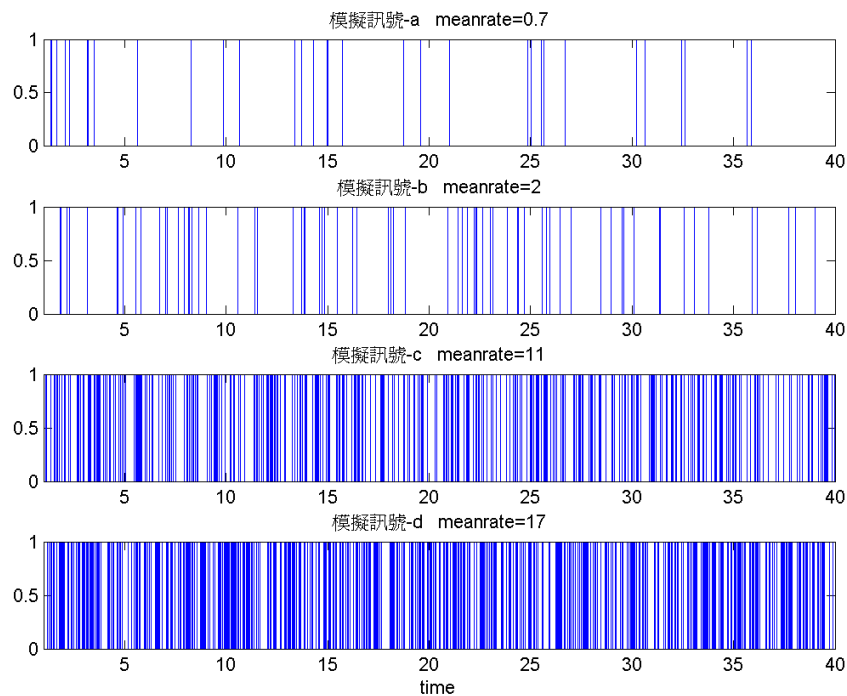


圖 1: 卜瓦松實驗模擬訊號 *a.b.c.d.* 的點過程

模擬出四筆參數為 λ' 的訊號，計算出其平均每秒的發生次數與變異數，平均與變異數的相對差異皆在 5% 以下。由於間隔時間服從指數分配，而單位時間發生次數的平均數與變異數相等 (見表 2)，確定此模擬訊號的點過程確實符合普瓦

表 2: 模擬訊號資料列表

模擬訊號 編號	參數 λ'	平均數 M	變異數 V
a	0.7	0.71	0.72
b	2	2.03	1.97
c	11	10.87	11.45
d	17	16.89	16.84

每筆訊號的事件總次數 = 5000 次

松分配，即為普瓦松點過程。另外統計訊號每秒的發生次數直方圖 (圖2)，與相同條件下，用普瓦松隨機函數造出的數據機率直方圖 (圖3) 分布也確實相同。表 2 中的 λ' 是給定的變數，而 M 值則是實際訊號的平均每秒發生次數，所以四筆訊號應為服從參數為 λ' 的普瓦松分配。

接著討論這些訊號是否為穩定的普瓦松點過程。根據上一小節的討論，在符合普瓦松分配之下選取不同長度的時間範圍，以單位時間長度為 Δt 計算平均數與變異數，估計出來的平均發生次數 $\lambda = \frac{V(\Delta t)}{\Delta t}$ 會趨近一個常數，則可以說這樣的資料符合穩定的普瓦松分配。設不同長度的時間範圍為 T_k ，針對單位時間 Δt 計算模擬訊號的 λ 值，記為

$$\bar{\lambda}(T_k) = \frac{V_k}{\Delta t}.$$

其中 V_k 是在單位時間長度為 Δt 所計算的變異數。因為配合實際訊號的時間長度，我們固定討論模擬訊號之中 5 ~ 30 秒的時間；之後檢驗的時間全長皆為此 25 秒的時間。固定 T_k 的起始邊界為第 5 秒，結束的邊界隨著 T_k 的長度改變而決定，對照列表 3。表 3 中的 n 值是 T_k 範圍的分段個數：

$$n = \frac{\|T_k\|}{\Delta t}$$

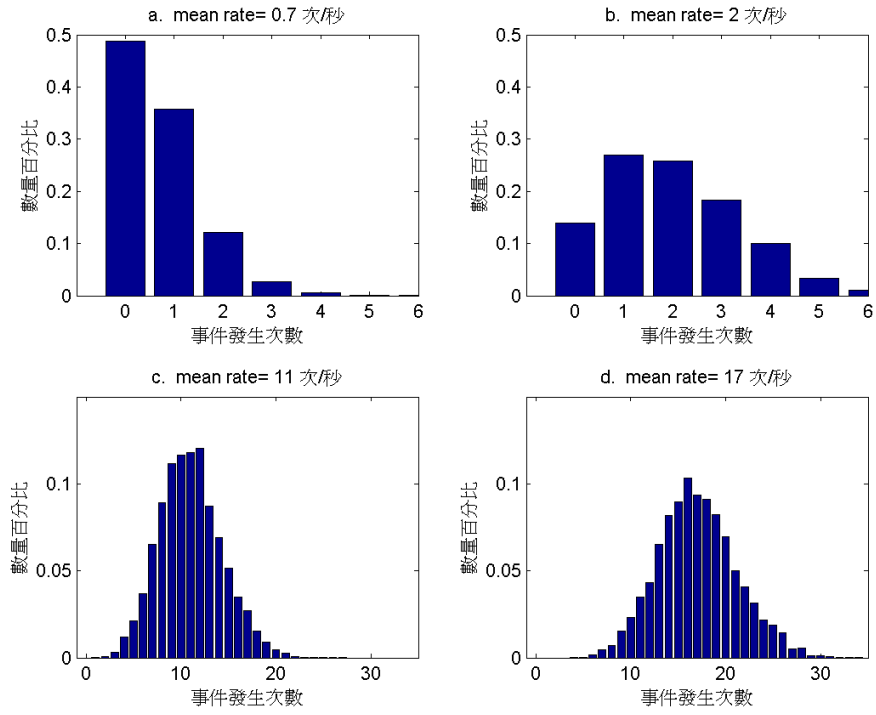


圖 2: 卜瓦松隨機函數機率直方圖

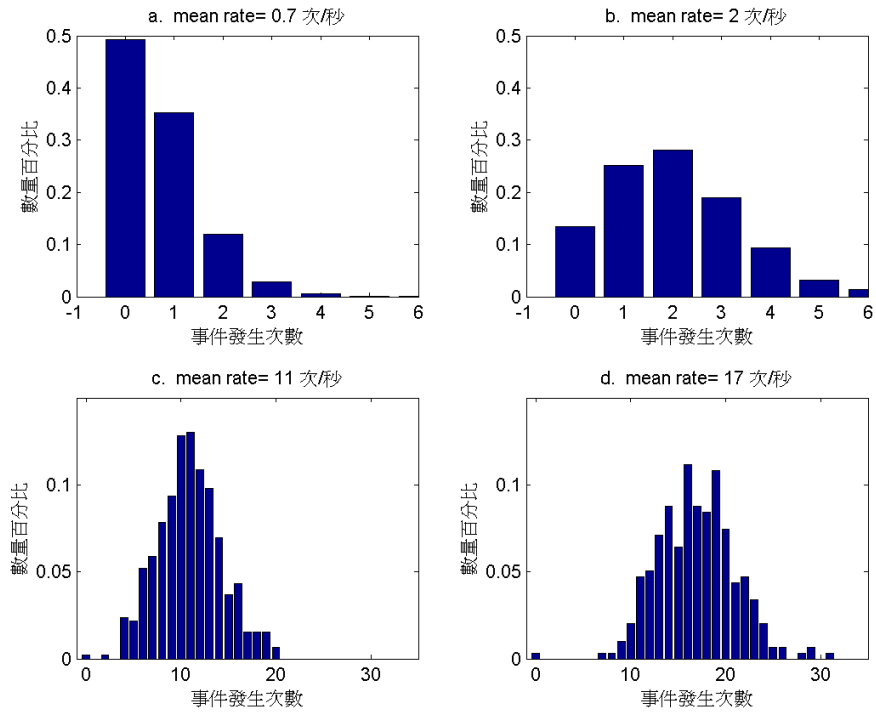


圖 3: 指數分布模擬訊號機率直方圖

單位時間長度設為 0.1 秒是關係到 n 值的大小，若 Δt 取 1 秒則最小範圍 T_7 的 n 值只有 15，容易造成統計分析上較大的誤差。

表 3: 時間範圍 T_k 對照表

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7
T_k	[5,30]	[5,27]	[5,25]	[5,23]	[5,22]	[5,21]	[5,20]
n	250	220	200	180	170	160	150

$$\Delta t = 0.1 \text{ 秒}, \quad n = \frac{\|T_k\|}{\Delta t}。$$

在範圍 T_k 內計算以 Δt 為單位長度的事件發生平均數 M_k 與變異數 V_k 。 T_k 的範圍每次大約縮小 $|T_k|$ 的 10%，實際選取範圍對照表 3。觀察 $\bar{\lambda}(T_k)$ 的穩定程度，且理論上這個穩定的 $\bar{\lambda}$ 值，應該會接近模擬訊號本身的平均發生次數 λ 值。圖 4、圖 5 是 $\bar{\lambda}(T_k)$ 的趨勢圖。表 4 列出模擬訊號 $\bar{\lambda}$ 值的平均數、全距與變異係數。我們用全距與變異係數來判斷 $\bar{\lambda}$ 的變動程度：變異係數代表 $\bar{\lambda}$ 值相對於期望值的平均變化率，全距則代表 $\bar{\lambda}$ 值變動的範圍。在全距很小且變異係數也很小的情況下，才能夠確定 $\bar{\lambda}$ 的確不會因為範圍 T_k 的選取不同而劇烈變動。以全距、變異係數確定 $\bar{\lambda}$ 值呈現穩定的狀態之後，我們用平均數確認其是否接近訊號的理論平均發生次數 λ' 。

表 4: (模擬訊號)不同單位長度的 $\bar{\lambda}$ 值

模擬 訊號	λ'	$\bar{\lambda}$		
		平均數	全距	變異係數
a	0.7	0.81	0.12	6%
b	2	1.99	0.3	6%
c	11	10.84	0.29	1%
d	17	15.92	1.89	4%

驗證的時間範圍全長為模擬訊號的 5 ~ 30 秒。

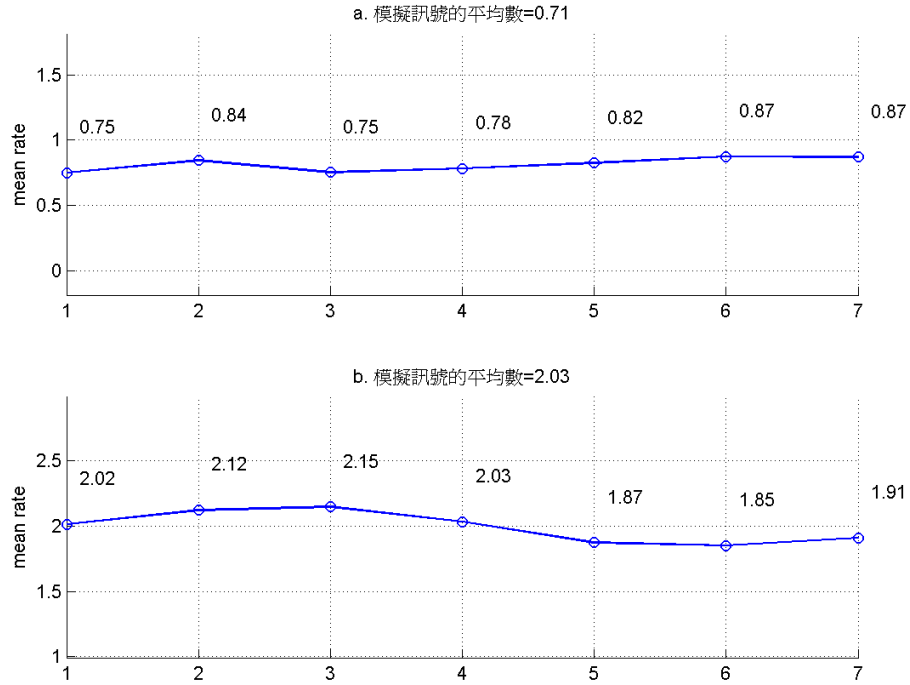


圖 4: 模擬資料 (a) 與 (b) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖

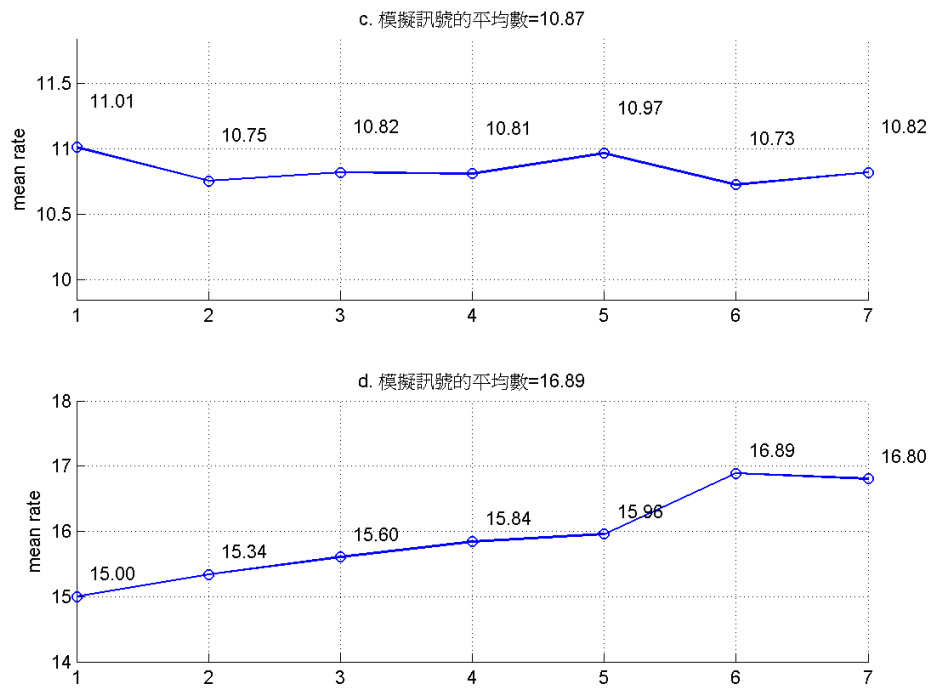


圖 5: 模擬資料 (c) 與 (d) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖

表 4 中的資料， $\bar{\lambda}$ 的變異係數最高為 6%，且全距在 2 以下，代表不同範圍長度估計的 $\bar{\lambda}$ 的變動很小。而 $\bar{\lambda}$ 的平均數也的確接近模擬訊號原始的 λ 值。所以我們判斷，這四筆訊號的確是穩定的卜瓦松點過程。特別要注意的是，分割的段數 n 需夠大，否則測試出的 $\bar{\lambda}$ 會跟著變異數劇烈偏移，就無法達到測試的目的。這裡因為配合之後實際數據可以討論的時間長度，時間範圍都固定在 25 秒內。所以若 Δt 設為 1 秒， n 值數量會在 25 以下，所得到的結果的可信度不高。

前面的模擬訊號是以相同的 λ' 所建構出來，在任何範圍所估計出的 $\bar{\lambda}$ 值會相似。我們已經知道，參數 λ' 相同的普瓦松實驗訊號模擬，固定單位時間長度 Δt ，在不同的時間範圍估計的平均發生率，會是穩定且趨近一常數的。為了模擬一個不穩定的卜瓦松點過程訊號，我們建造模擬訊號 f ，其全長時間為 40 秒，前 20 秒的參數是 $\lambda = 2$ ，後 20 秒的是 $\lambda = 11$ 。圖 6 就是模擬訊號 f 的點過程圖示，其前後 20 秒明顯可以看出發生次數的不同。雖然分別來看其點過程還是符合普瓦松分配，但整體而言，並沒有穩定的平均發生率 $\bar{\lambda}$ 。

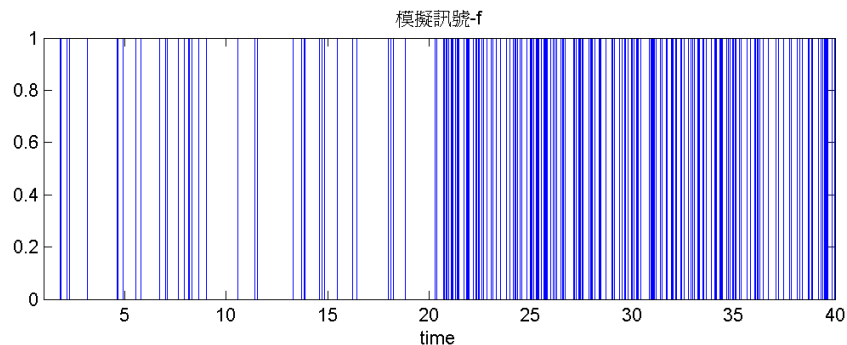


圖 6: 卜瓦松實驗模擬訊號 f 的點過程

圖 7 為模擬訊號 f 在 T_k 範圍估計的 $\bar{\lambda}$ 值趨勢圖，平均發生率的確呈現變動的狀態。對照表 3 中 T_k 的時間範圍，可以知道 $T_1 \sim T_6$ 的時間範圍內包含了兩種不同的平均發生次數訊號，所以 $\bar{\lambda}$ 值並變異很大。而 T_7 的資料範圍為 [5, 20]

秒，只包含了 $\lambda' = 2$ 的模擬訊號，所以 $\bar{\lambda}(T_7) \approx 2$ 。從表 5 中明顯可以看到訊號 f 的全距與變異係數皆很高，表示 $\bar{\lambda}$ 並不穩定；此訊號為非穩定的卜瓦松點過程。

表 5: (模擬訊號 f) 不同單位長度的 $\bar{\lambda}$ 值

模擬 訊號	λ'	$\bar{\lambda}$		
		平均數	全距	變異係數
f	2,11	5.62	5.68	0.43

驗證的時間範圍全長為模擬訊號的 5 ~ 30 秒。

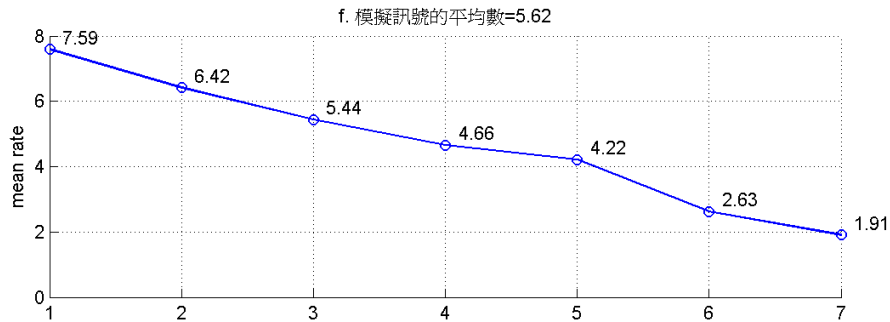


圖 7: 模擬資料 (f) 的 $\bar{\lambda}$ 趨勢圖

在本章節的模擬測試針對訊號的點過程檢驗，可以歸納出幾點的討論與說明：

1. 穩定卜瓦松點過程的訊號，估計的 $\bar{\lambda}$ 不會隨著範圍而改變，唯有單位時間 Δt 的長度會改變 $\bar{\lambda}$ 的值。參數 $\bar{\lambda}$ 來自變異數 V 與單位時間的比值，模擬訊號的 λ' 值越大，也就是每秒的發生次數越多。這時要特別注意單位時間長度 Δt 的問題，若選取的範圍太小，而單位時間太大，則計算的結果不可靠。

2. 非穩定卜瓦松點過程判斷的依據，是 $\bar{\lambda}$ 隨著時間範圍而變動。以定義來說，是任意選取的範圍時間中不一定符合卜瓦松分配，但在特定的時間區段上是符合卜瓦松分配的訊號。
3. 根據以上兩點，穩定卜瓦松過程的測試首要檢驗的，是針對訊號上特定時間區段的訊號是否符合卜瓦松分配。但由於正確的時間長度並不確定，所以改以檢驗長度較小的範圍，若每個小範圍的訊號都符合卜瓦松分配，則可以說訊號的確是卜瓦松點過程。符合卜瓦松點過程下的訊號，再討論 $\bar{\lambda}$ 是否穩定。

3.3 實際訊號

對實際的訊號，我們想要知道神經元在常態下，訊號點過程的發生機率模型是否符合穩定卜瓦松過程。透過上一節模擬訊號的穩定卜瓦松檢驗方法，檢驗尚未刺激前神經訊號的一般狀態。能夠用來檢驗的常態訊號資料，只有從開始紀錄到第一次刺激前的時間，長度大約在 15 ~ 25 秒左右。在第一小節先驗證這六筆神經訊號點過程是否符合卜瓦松分配，接著第二小節檢驗其穩定性。

3.3.1 訊號的卜瓦松檢驗

設計檢驗的方法，依時間先後排列隨機取樣 20 段長度為 1 秒的時間，以 0.01 秒為單位長度 Δt 計算平均數 M 與變異數 V 。符合卜瓦松分配的最大特性是平均數與變異數相同，計算平均數與變異數的相對差異來判斷訊號短時間內是否為卜瓦松點過程。因為這個檢驗的判斷標準來自相對差異，所以我們用已知為

卜瓦松點過程的模擬訊號 $a \sim d$ 和模擬訊號 f 作測試，並觀察其相對差異的大小。前四筆穩定卜瓦松模擬訊號，進行測試得到的結果，大部份的相對差異幾乎控制在 10% 以下。而非穩定卜瓦松模擬訊號 f 的取樣，產生多個較大的相對差異，甚至超過 20%。因為此模擬訊號的平均發生次數不穩定，雖然隨機選取的時間區段長度很短，仍然可能選取到包含不同 λ' 的範圍，所以計算的平均數與變異數就會產生較大的相對差異。於是我們採用相對差異 20% 以下作為標準，並假設取樣檢驗後，超過此標準的數量佔全部的 1% 以下為正常。也就是說，我們能夠接受不符合標準的數量是 2 個以下。

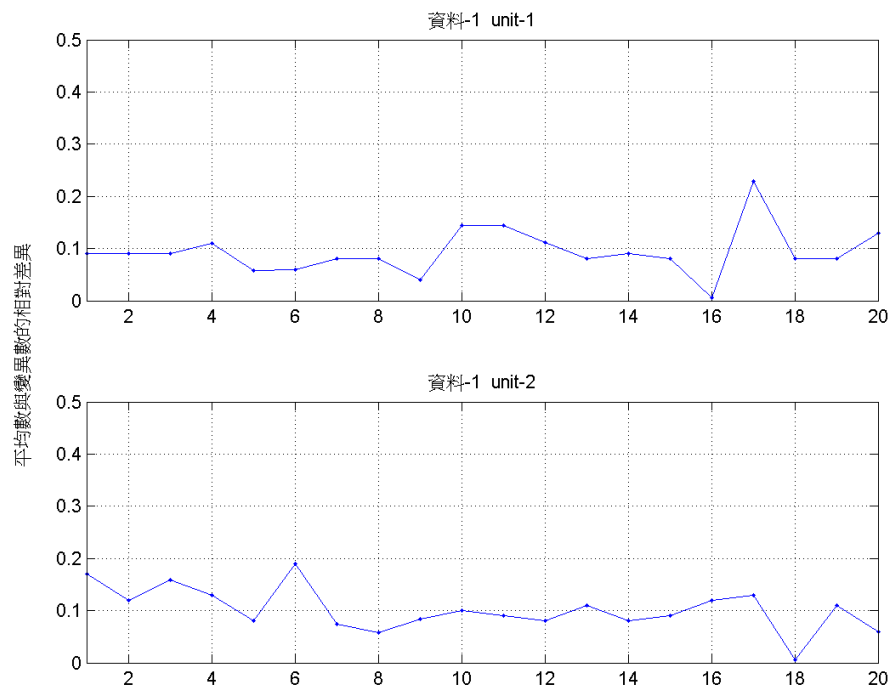


圖 8: (資料一) 平均數與變異數相對差異

實際數據的檢驗以資料一為例，圖 8 可以看到此資料中兩個神經元的檢驗結果，依序標記 20 個取樣計算出的相對差異值。從圖形中可以清楚的看到，平均數與變異數的相對差異幾乎在標準的 20% 以下。第一個神經元只有一個取樣時

間超出標準，並沒有大於全體取樣數量的 1%。我們判斷這二個神經元的動作電位點過程，是符合卜瓦松分配的。以相同的檢驗測試每一筆神經訊號，將檢驗後高於此標準的取樣個數列於表 6。

表 6: (實際訊號) 相對差異不符合標準的數量列表

資料 編號	相對差異 > 20% 的個數						
	unit-1	unit-2	unit-3	unit-4	unit-5	unit-6	unit-7
一	1	0	-	-	-	-	-
二	0	0	-	-	-	-	-
三	0	0	1	3	1	-	-
四	2	1	3	2	1	0	-
五	5	0	0	3	3	0	2
六	2	4	1	4	-	-	-

$$\text{平均數 } M \text{ 與變異數 } V \text{ 的相對差異} = \frac{|M-V|}{M}$$

在表 6 中列出的數量，是來自 20 個隨機選取且長度為 1 秒的取樣時間，其平均數與變異數的相對差異高於 20% 的數量。總共觀察 26 個神經元的訊號，相對差異超過 20% 的取樣數量在 2 個以下的神經元有 19 個。也就是所有的測試檢驗中，有 73% 的神經元符合測試的標準。其餘的神經元，發生不符合的取樣個數也在 5 次之內。我們考慮實際訊號來自生物的感覺區域，雖然實驗已經盡可能降低生物受到的其他影響因素，但仍可能在取樣時間中受到干擾，或是神經元本身的特例情況。結論是，神經元的訊號點過程，大部份但不一定是服從卜瓦松分配的機率模型。

3.3.2 訊號的穩定性檢驗

前面的檢驗證實，神經訊號在任意短時間內，的確符合卜瓦松分配。接著要驗證這些卜瓦松點過程是否穩定。根據 3.2 小節的模擬檢驗，對神經元常態下的訊號全長，以不同的範圍長度 T_k ，計算 $\bar{\lambda}$ 值是否趨於一個常數。也就是要確認 $\bar{\lambda}(T_k)$ 值是否穩定。因為每一個資料中，第一次刺激前紀錄到的常態時間並不相同，所以選取的範圍大小以百分比來訂定，見表 7。

表 7: (實際訊號) 時間範圍 T_k 對照表

	k=1	k=2	k=3	k=4
T_k	$[\alpha, \beta]$	$[\alpha, \beta - 0.1T]$	$[\alpha, \beta - 0.2T]$	$[\alpha, \beta - 0.3T]$
	k=5	k=6	k=7	
T_k	$[\alpha, \beta - 0.4T]$	$[\alpha, \beta - 0.5T]$	$[\alpha, \beta - 0.6T]$	

α ：為該神經紀錄的起始時間。

β ：為該神經紀錄第一次刺激的前一秒。

T ：為常態下的訊號全長 ($T = \beta - \alpha$)。

對六個資料中的每個神經元訊號，以表 7 的 T_k 範圍大小，單位時間 $\Delta t = 0.1$ 秒，計算 $\bar{\lambda}$ 值。圖 9 ~ 圖 14 分別為資料一到資料六中，每個神經元的 $\bar{\lambda}(T_k)$ 值結果作圖。表 8 則列出每一個神經元 $\bar{\lambda}$ 的統計數據。

根據模擬訊號的檢驗數據表 4 (頁 16) 與表 5 (頁 19)，須符合全距在 2 以下且變異係數小於 10% 的標準，才能判定 $\bar{\lambda}(T_k)$ 值穩定且 $\bar{\lambda}$ 的平均值即為此訊號的平均發生次數。表 8 的統計數據中，只有八個神經元符合上述標準，也就是大約三分之一的神經元訊號點過程符合了穩定的條件。但是 26 個神經元中有一半的神經元，不僅全距超過 2 且變異係數也大於 10%，表示 $\bar{\lambda}$ 的變動的確很大。所以我們的神經訊號，大部份並不會是穩定的卜瓦松點過程。

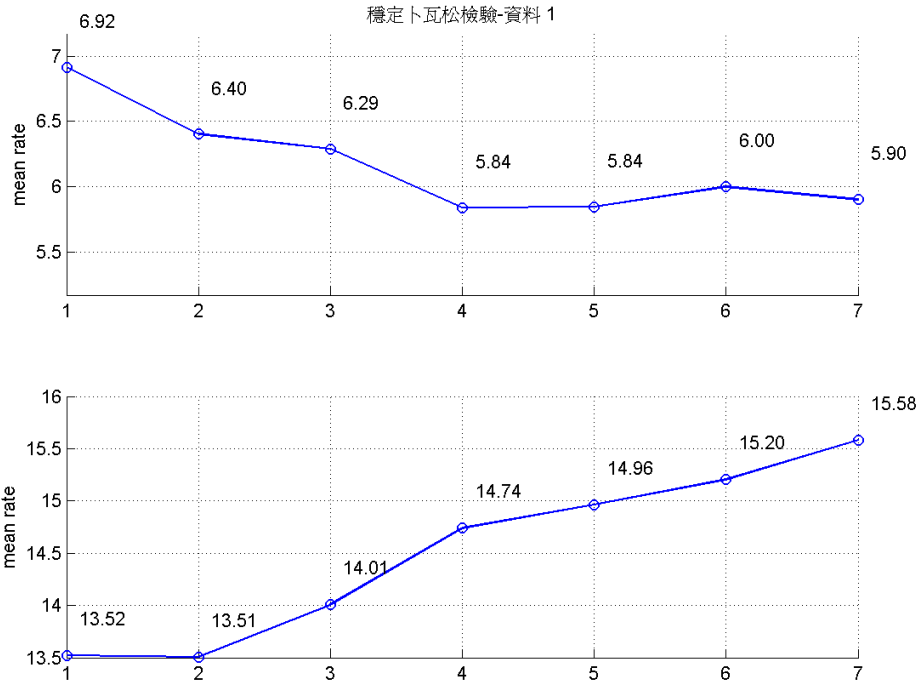


圖 9: (資料一) 穩定卜瓦松檢驗證

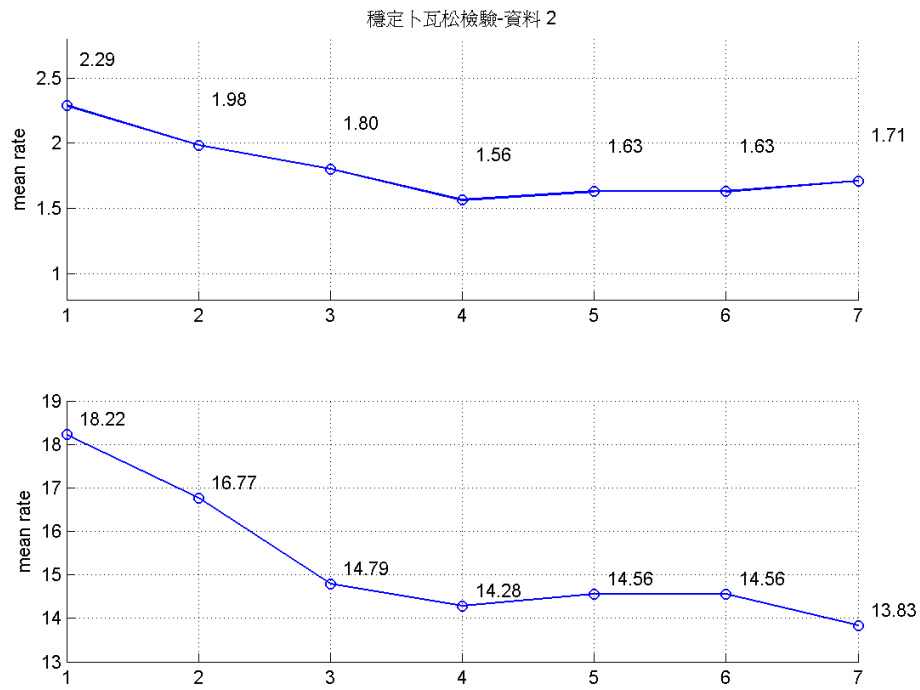


圖 10: (資料二) 穩定卜瓦松檢驗證

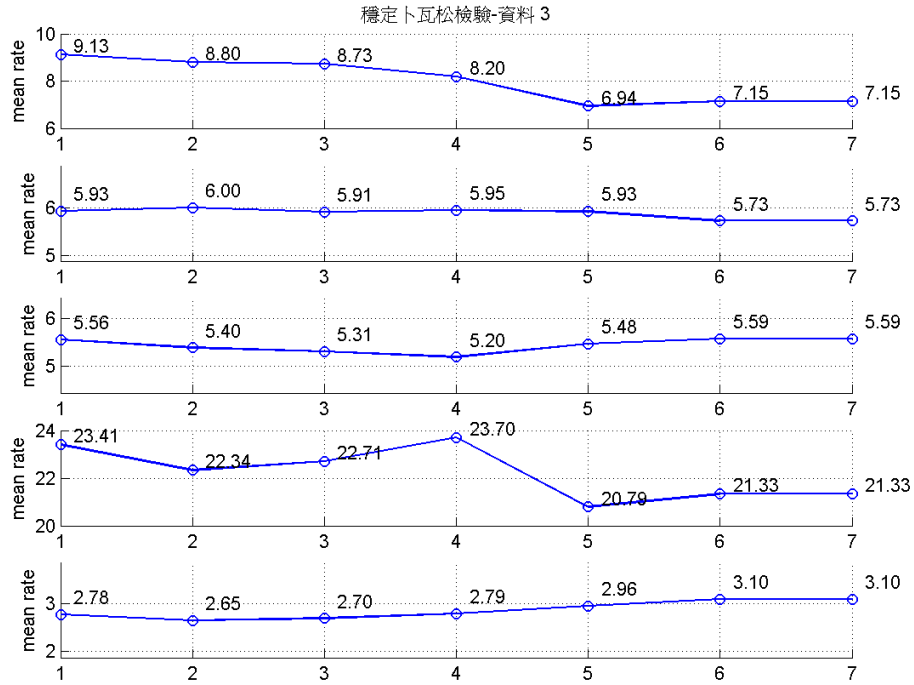


圖 11: (資料三) 穩定卜瓦松檢驗證

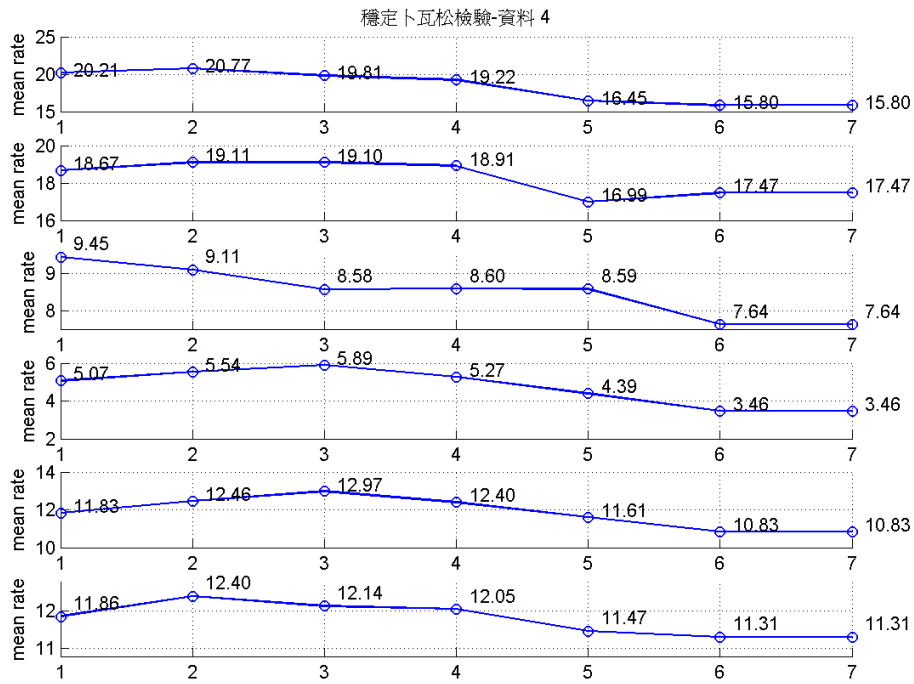


圖 12: (資料四) 穩定卜瓦松檢驗證

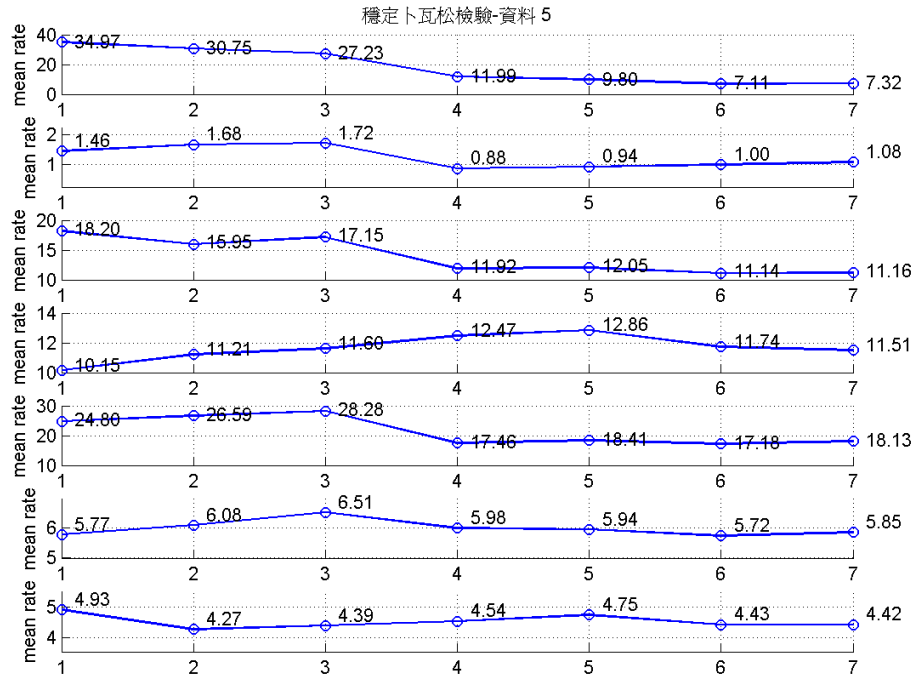


圖 13: (資料五) 穩定卜瓦松檢驗證

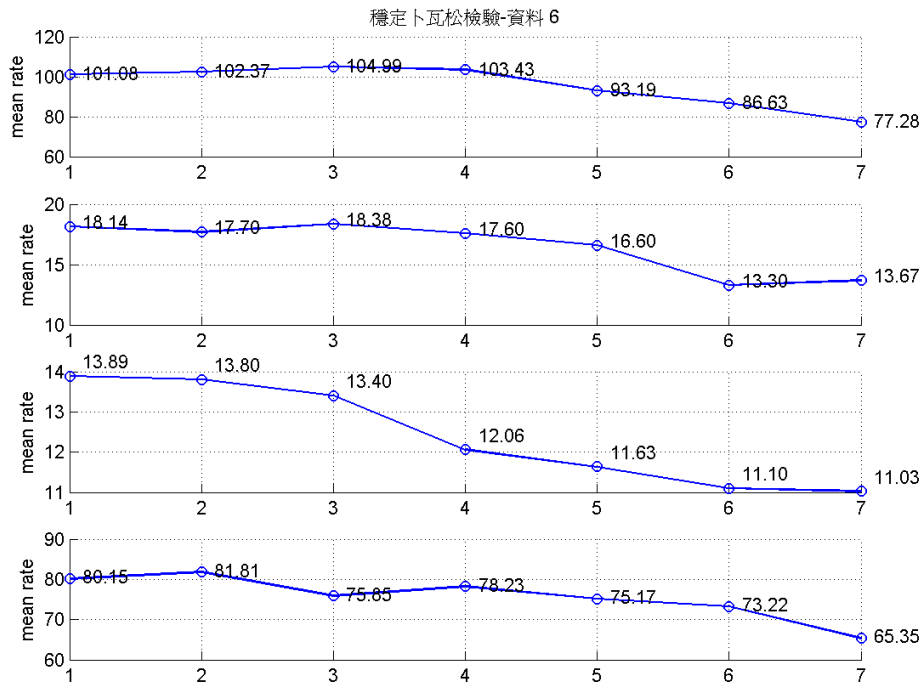


圖 14: (資料六) 穩定卜瓦松檢驗證

表 8: (實際訊號) 穩定卜瓦松檢驗的統計數據

資料 編號	$\bar{\lambda}$ 的 統計資料	神經元的數據						
		unit-1	unit-2	unit-3	unit-4	unit-5	unit-6	unit-7
一	平均數	6.17	14.50	-	-	-	-	-
	全距	1.08	2.07	-	-	-	-	-
	變異係數	6%	6%	-	-	-	-	-
二	平均數	1.80	15.29	-	-	-	-	-
	全距	0.73	4.39	-	-	-	-	-
	變異係數	14%	10%	-	-	-	-	-
三	平均數	8.01	5.89	5.45	22.23	2.87	-	-
	全距	2.19	0.28	0.39	2.92	0.45	-	-
	變異係數	11%	2%	3%	5%	6%	-	-
四	平均數	18.29	18.25	8.52	4.73	11.85	11.79	-
	全距	4.97	2.11	1.80	2.43	2.14	1.08	-
	變異係數	12%	5%	8%	21%	7%	4%	-
五	平均數	18.45	1.25	13.94	11.65	21.55	5.98	4.53
	全距	27.86	0.85	7.06	2.70	11.10	0.79	0.66
	變異係數	65%	29%	22%	8%	22%	4%	5%
六	平均數	95.57	16.48	12.42	75.68	-	-	-
	全距	27.70	5.07	2.86	16.45	-	-	-
	變異係數	11%	13%	10%	7%	-	-	-

我們特別觀察這八個判斷為穩定的神經元，分別是資料一的第一個神經元，資料三的第二、第三和第五個神經元，資料四的第三個和第六個神經元，以及資料五的第六和第七個神經元。由於檢驗結果 $\bar{\lambda}$ 為穩定的，所以其平均值就近似於訊號的平均發生次數 λ 。這八個神經元的 λ 值分別為 6.17、5.89、5.45、2.87、8.52、11.79、5.98、4.53，發現其平均發生次數普遍都偏低。這似乎可以解釋為平均發生率偏低，動作電位發生較不活躍的神經元，不容易受到外在影響而造成平均發生率的變化。

本章節由模擬訊號到實際資料的驗證與統計方法，歸納以下結論：

1. 神經元的動作電位發生，大部份是卜瓦松分配的點過程，但多數並非為穩定的卜瓦松點過程。
2. 若神經元本身的電性活動偏低，也就是動作電位的平均發生次數較少，其訊號就有可能符合穩定的卜瓦松分配。從檢驗的結果來說，這類型的神經元佔少數。
3. 從實驗的角度來看，雖然已經盡量避免老鼠被其他的外界刺激干擾，但是因為接收的神經元來自尾巴的感覺區域，不可避免老鼠的尾巴受到環境的影響。所以可以想像，老鼠的尾巴在實驗的過程中並非處於靜止，訊號也就隨著感覺而變動，這就可能是造成訊號並非穩定卜瓦松點過程的因素。
4. 因為訊號並不穩定， $\bar{\lambda}$ 的平均值就不能代表該訊號的平均發生次數。但這個數值應該會介於此訊號過程中，所有可能發生的 λ 之中。從表 8 中觀察 $\bar{\lambda}$ 的平均值，發現同一個資料中的不同神經元，其發生次數平均值差異很大。也就是說，同一個實驗對象中紀錄到的不同神經元，動作電位的活動頻率差異很大。

第 4 章 刺激前後動作電位特徵

從本章開始，針對神經訊號的發生與反應型態的關聯，進行分析與討論；這也是本論文的核心研究。在第三章我們判斷，常態下的神經訊號大部份是非穩定的卜瓦松點過程。也就是說，訊號點過程的平均發生次數是隨時間而改變的。於是我們以特定單位，探討訊號點過程的發生次數，藉此觀察神經動作電位發生的形式。由第二章背景知識的介紹，了解神經元是由外部刺激造成膜電位微量的變化，引發離子通道的開啓而造成去極化與再極化，也就是動作電位的發生。因此討論生物由刺激產生的訊號與反應動作的關聯，通常就著重於刺激後動作電位發生的樣式。但本研究除了分析刺激後的樣式 (*pattern*)，還討論了刺激前的訊號樣式。因為我們假設生物在相同的刺激強度下，會有不同反應大小的區別，可能與神經元在刺激前動作電位的狀態有關係。所以本章節的討論方法裡皆分成三個部份，一為單獨討論刺激前的，二為包含刺激前後的區間，三為單獨討論刺激後；希望從這三部份的討論中，找到刺激後不同反應行為的相對特徵型式。

在第一節我們統計刺激前後單位時間內的動作電位發生數量，對反應行為的關聯做初步的觀察與討論。以單位時間內動作電位的發生數量變化做分析，比較三種甩尾反應的樣式差異。第二節延續第一節的討論，判斷並分析不利於分析的資料點與神經元。最後一節紀錄神經訊號刺激前後的分佈情形，企圖以視覺的方法說明不同類型的分佈情形。由於，只有三隻老鼠 (資料一、資料四、資料六) 在刺激後是三種反應型態都有，所以部份的數據會依據這三隻作討論，以下統稱 3

L 資料數據。

4.1 刺激前後動作電位發生數量

一開始討論刺激前的訊號與反應動作的關聯，因為我們並不清楚神經動作電位發生的特性，只能概略知道，老鼠的神經元對於刺激的訊號傳遞在 1 秒內就會結束，並且神經訊號在刺激後，大約要 1 ~ 5 秒後才會恢復常態，所以我們在 4.1.1 小節先針對刺激前後以一秒為單位作討論。第二小節藉由 4.1.1 的資料，作動作電位發生次數的前後差異，進一步討論其中的變化。

但是，因為神經訊號反應的時間非常短，動作電位之間的最小間隔時間也只有 10 ms。當單位時間定為一秒，這一秒內不論動作電位發生的型式為何，我們都只能以一個統計數字簡單的描述訊號在這一秒的發生次數，而無法對訊號點過程樣式的細節做說明。譬如：若單位時間內動作電位的點過程為 (1, 0, 1, 0, 1, 0)，另一筆發生為 (0, 0, 0, 1, 1, 1)，其中 1 代表發生動作電位，0 代表沒有發生動作電位。在這段時間內的發生次數皆為 3 次，動作電位的發生樣式卻是明顯不同，這就是因為單位過大，所以導致無法看出差異。第三小節就將單位降到 0.1 秒再做相同的討論，目的是為了縮小訊號反應樣式被「模糊化」的程度。如上面的例子，若將單位降至原本的二分之一，第一筆資料得到 (2, 1)，第二筆資料為 (0, 3)，就比原本的統計更能區分出兩者的差異。

4.1.1 刺激前後 1 秒的討論

我們以六筆資料中，每一個神經元的每一次刺激為一個資料點，統計資料點刺激前一秒動作電位發生的次數，也就是刺激前一秒的發生次數。圖 15 分別依

照已知的反應類型作直方統計圖，可以看到刺激前一秒，動作電位數量出現的次數百分比。爲了方便觀察三種類型的資料，將三筆數據合併作折線圖 (圖 17)。另外因爲所有資料裡，刺激後反應是不甩尾的只有發生 13 次，遠少於有甩尾反應的發生數量：大甩尾 96 次、小甩尾 33 次，加上神經數量的加成後更是將資料點的數量差距拉大。所以各類型的統計在百分比化之前，單看數量的統計差異是很大的。爲了不被資料點的數量影響而清楚比較三個類型間的差異，我們將 3 L 資料數據做相同的統計，圖 19 爲其直方統計圖，圖 21 爲折線圖。

由圖 15 和圖 17 的前一秒資料發現，小甩尾及不用尾兩種反應類型發生次數的數據高峰值較相近，大甩尾的反應反而發生次數爲零的偏多。而圖 19 和圖 21 中，3 L 資料仍不能有明確的特徵來說明刺激前動作電位發生次數與動作的關聯。

然後，接著同樣對刺激後一秒的時間，統計動作電位發生數量的直方圖，全部資料作圖 16、圖 18，3 L 資料作圖 20 及圖 22。

在刺激後的統計圖中，不論是圖 16 或是圖 20 似乎可以看來小甩尾的統計量分成兩區，不用尾的分布情形較平均。對照圖 21 爲 3 L 資料刺激前一秒與圖 22 刺激後一秒的差異，明顯平均值的分布提高，符合刺激後動作電位發生次數增加的概念。但是這樣單純的統計資料並無法區分三類型的差異。於是產生兩個想法，將在下面的小節進行討論：一是刺激後與刺激前動作電位數量的差異變化，

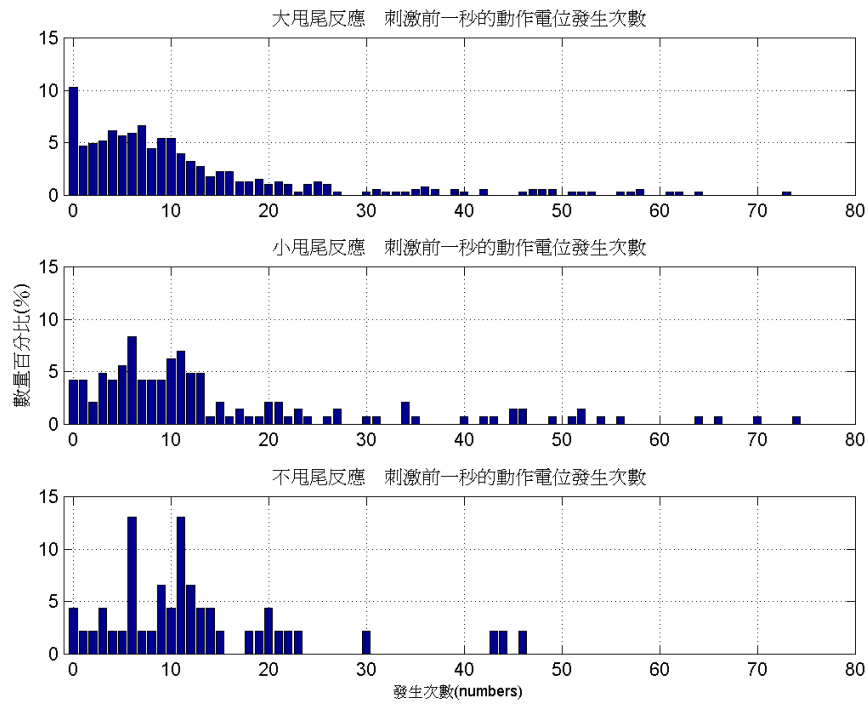


圖 15: (全部資料)刺激前一秒發生次數直方統計圖

大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不用甩尾樣本數 46 個。

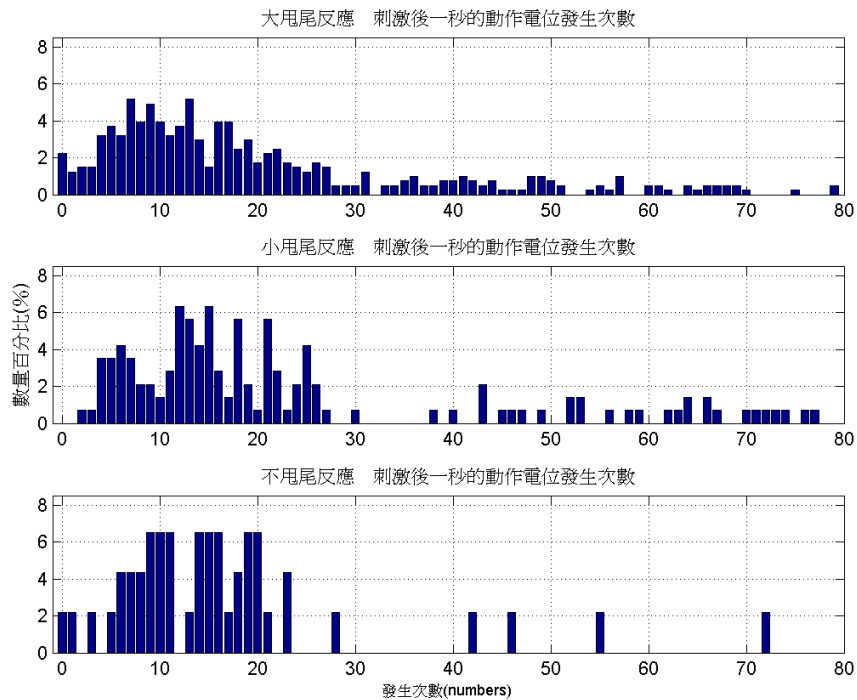


圖 16: (全部資料)刺激後一秒發生次數直方統計圖

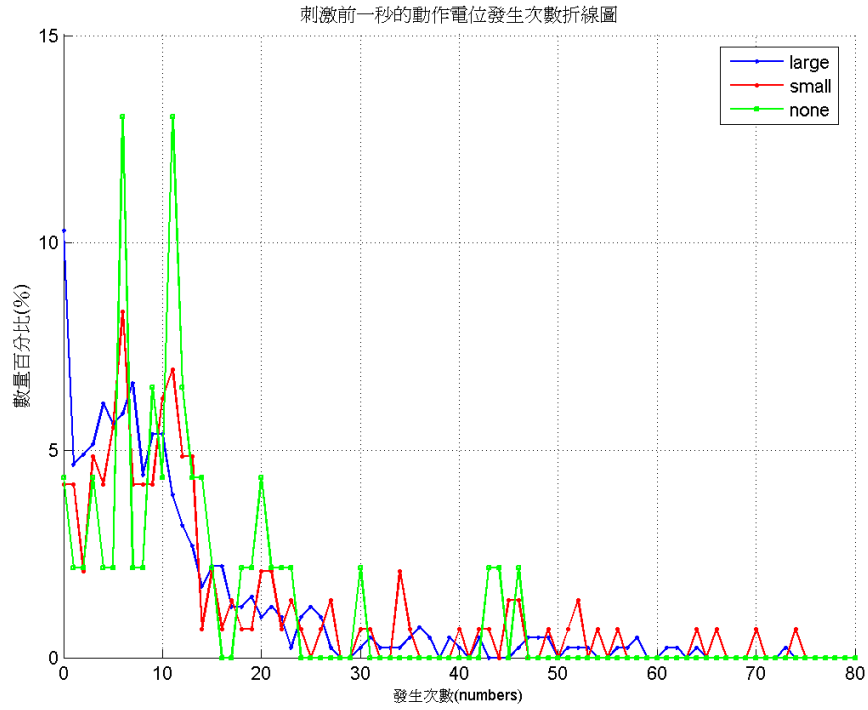


圖 17: (全部資料)刺激前一秒發生次數折線圖

大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。

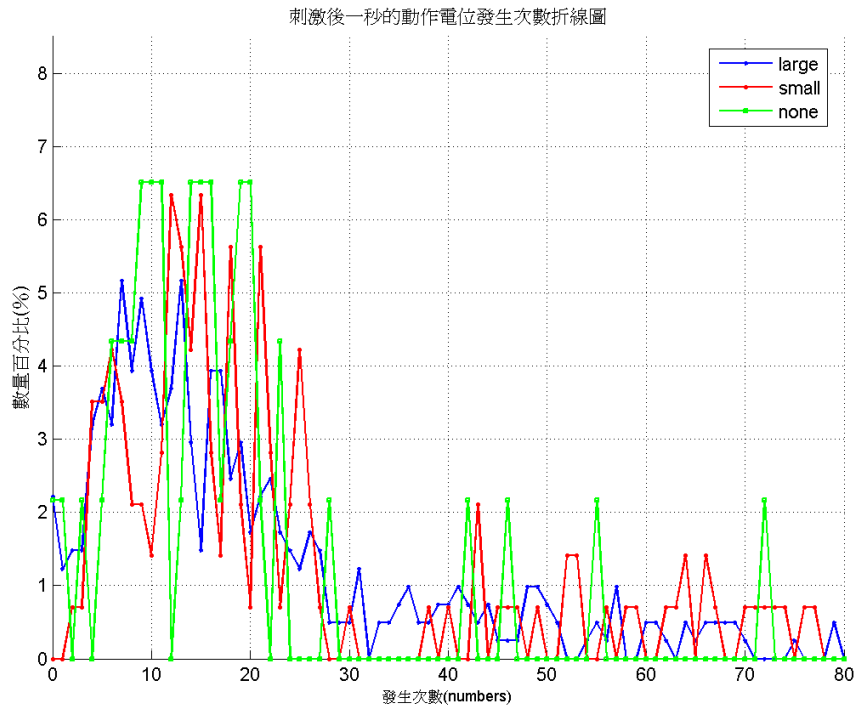


圖 18: (全部資料)刺激後一秒發生次數折線圖

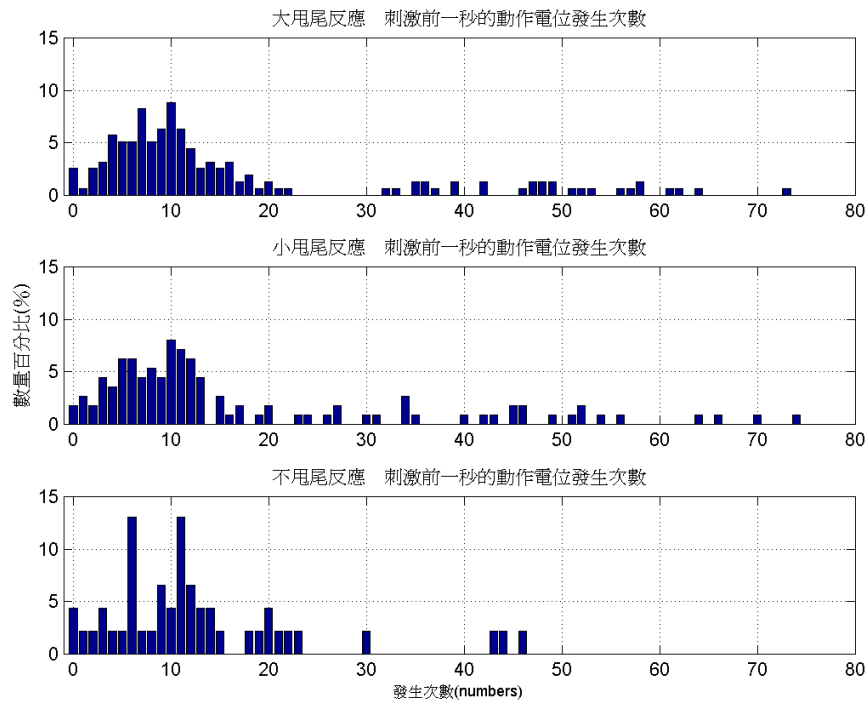


圖 19: (3 L 資料)刺激前一秒發生次數直方統計圖

大甩尾樣本數 158 個，小甩尾樣本數 112 個，不用甩尾樣本數 32 個。

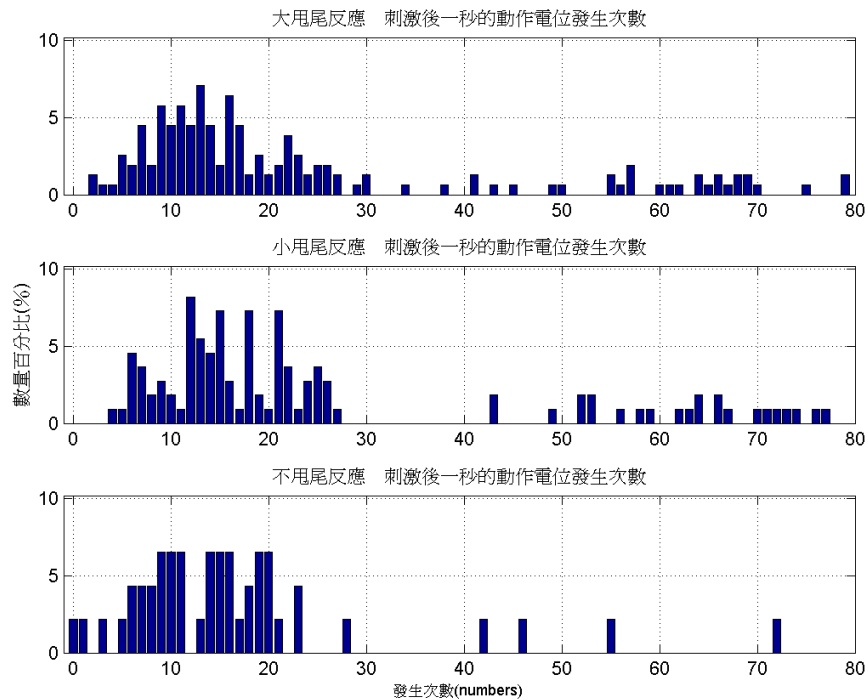


圖 20: (3 L 資料)刺激後一秒發生次數直方統計圖

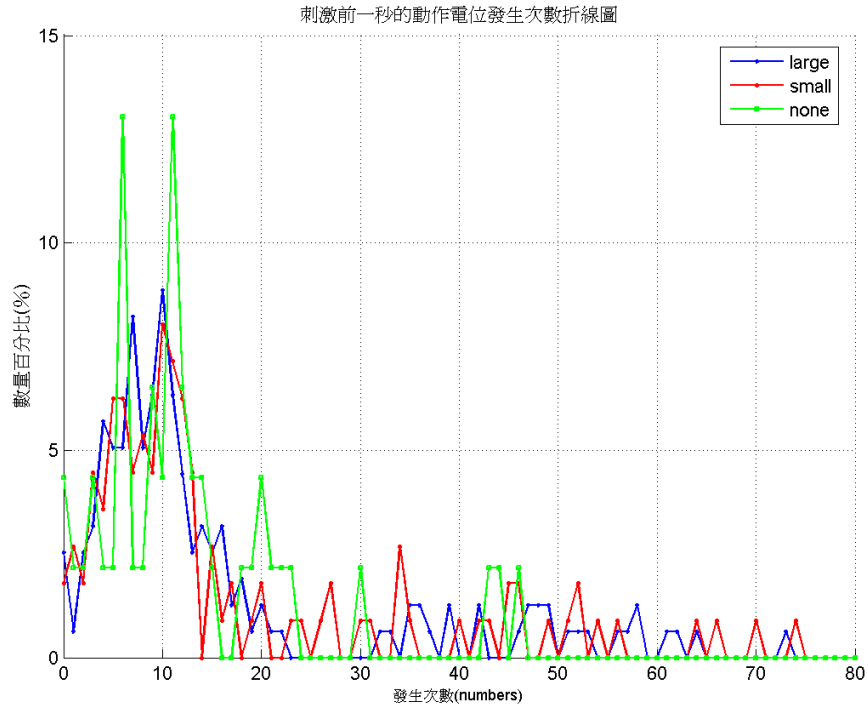


圖 21: (3 L 資料)刺激前一秒發生次數折線圖

大甩尾樣本數 158 個，小甩尾樣本數 112 個，不甩尾樣本數 32 個。

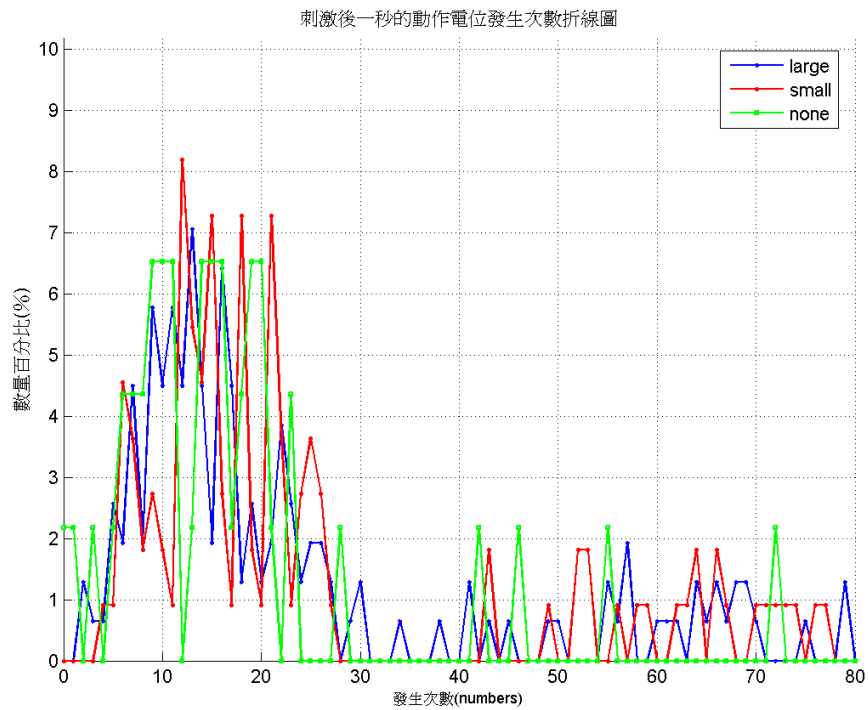


圖 22: (3 L 資料)刺激後一秒發生次數折線圖

二是考慮降低單位時間的長度，減少動作電位的發生型式被「模糊化」的程度。

4.1.2 刺激前後固定時間的動作電位差

上一小節我們單獨觀察刺激前後 1 秒動作電位的發生次數，除了能明顯看出動作電位在刺激後的發生數量增加以外，並不能清楚的看出不同反應行為的訊號差異。於是我們想要針對刺激後發生次數增加這部分，以刺激前後訊號發生數的差量統計進行討論。

我們從第二章知道，動作電位是因為神經元受到外界刺激而引發的。所以神經元受到刺激後，應該會產生大量且次數頻繁的動作電位。但其實神經訊號的傳遞過程中，有某些傳遞物質會抑制去極化的產生，就可能使得刺激後的訊號數量不如刺激前來的多。不過從上一小節的結論，我們可以假設此實驗所紀錄到的神經元，在接受刺激後的動作電位發生狀態應該是增加的。也就是說，刺激後的動作電位與刺激前的數量差，應該是一正數。讓我們用資料檢測是否支持這個假設。

令刺激後 t_i 時間內動作電位發生的數量為 $S(t_i)$ ，刺激前 1 秒內動作電位發生的數量記為 S_a 。計算 t_i 的每秒平均發生次數 S_b ，

$$S_b(t_i) = \frac{S(t_i)}{t_i}$$

計算每一個資料點的後前差值為 $D(t_i)$ ，

$$D(t_i) = S_b(t_i) - S_a$$

就是計算刺激前一秒的電位發生數，與刺激後不同時間 t_i 的平均一秒動作電位發生次數，這兩個數值的差。因為已經假設神經元在刺激後的興奮時間不會超過 1

秒，所以這裡我們討論的 t_i 值為 0.1, 0.2, \dots , 1 秒。為方便觀察與比較，對不同的 t_i 時間，將每個資料點的差值 $D(t_i)$ 作直方統計圖：圖 23，並標記上 $D(t_i)$ 值為負數所佔的百分比。另外，圖 24 的左圖是每個 t_i 時間中，差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖。

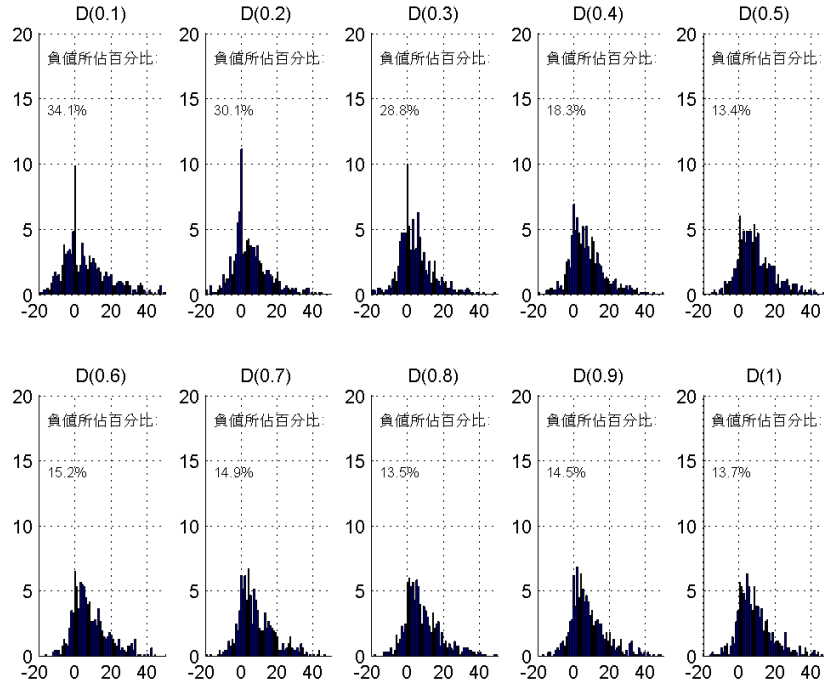


圖 23: (所有資料) 資料點的後前差值 $D(t_i)$ 直方統計圖

為了顯示刺激後的 $D(t_i)$ 卻有不同，我們選取一組對照樣本點作相同統計，代表神經在沒有刺激的一般狀況。樣本點的選取是從神經的實驗紀錄中，扣除可能被刺激影響的時間：刺激前 1 秒與刺激後 5 秒，剩下的時間區段內隨機取出的時間點。每個神經元中取出的對照點，與其資料點的數量相同。同樣地，將每個對照點的差值 $D(t_i)$ 作直方統計圖：圖 25，而差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖在圖 24 的右圖。

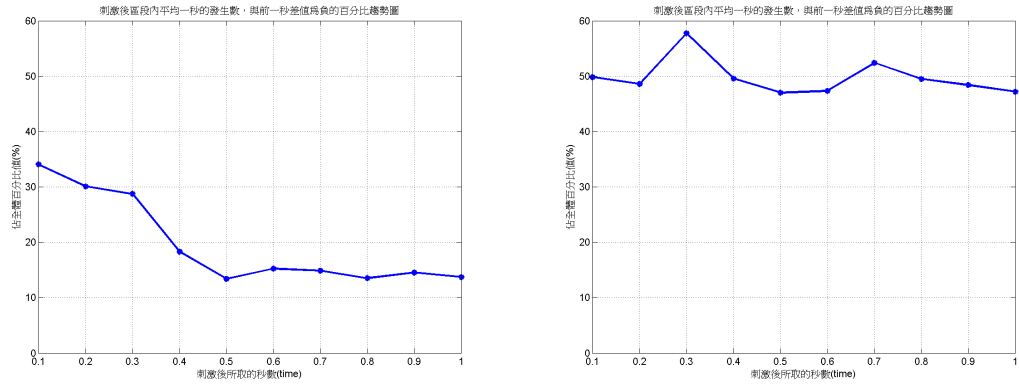


圖 24: (左：刺激點，右：對照點) 後前差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖

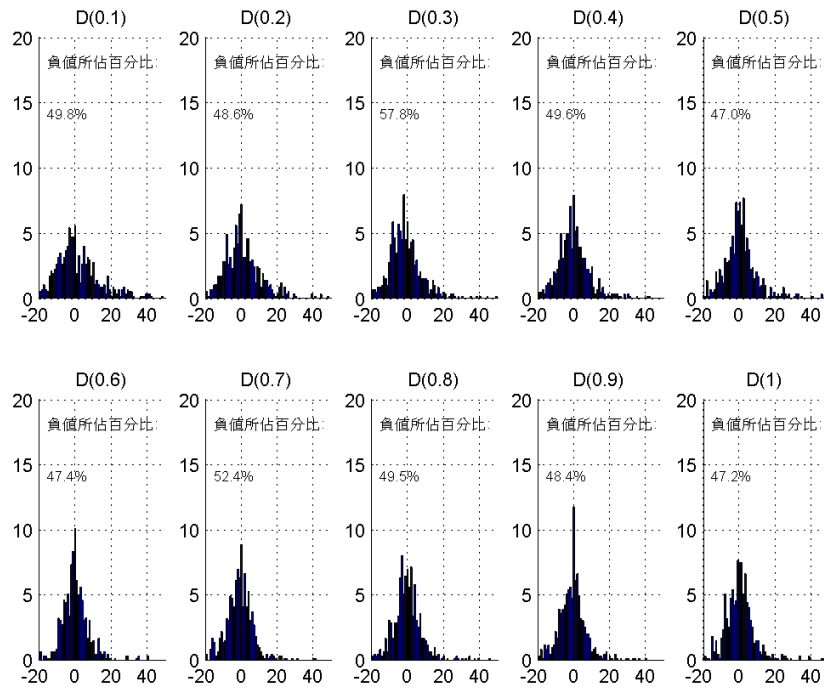


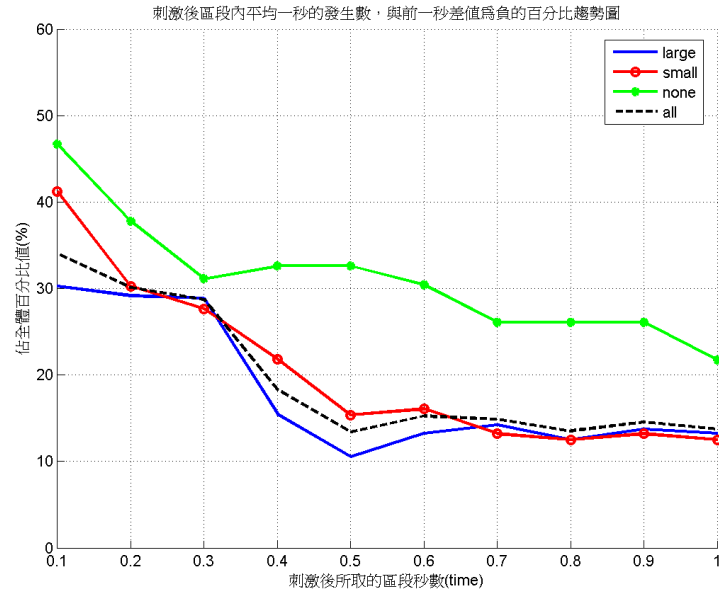
圖 25: 對照點的後前差值 $D(t_i)$ 直方統計圖

比較圖 24 資料點與對照點的 $D(t_i)$ 負值數量趨勢圖，明顯的可以看到，因為對照點前後皆屬於神經元的常態活動，所以 $D(t_i)$ 的正負並沒有特定趨向，當時間 t_i 越大 $D(t_i)$ 為負值的情況就越接近 50%。相較於有刺激的資料點，其數據反而在時間 t_i 越大時， $D(t_i)$ 為負的數量百分比越趨穩定且偏低。從不同反應類型

來比較，將圖 23 的資料根據反應類型分開統計，得到三類型的 $D(t_i)$ 負值分布圖。其中圖 26 是針對所有資料的分布圖，而圖 27 是 3 L 資料的分布圖。圖中黑色虛線為全部資料不分類的統計數據，也就是圖 24 之左圖的趨勢線。

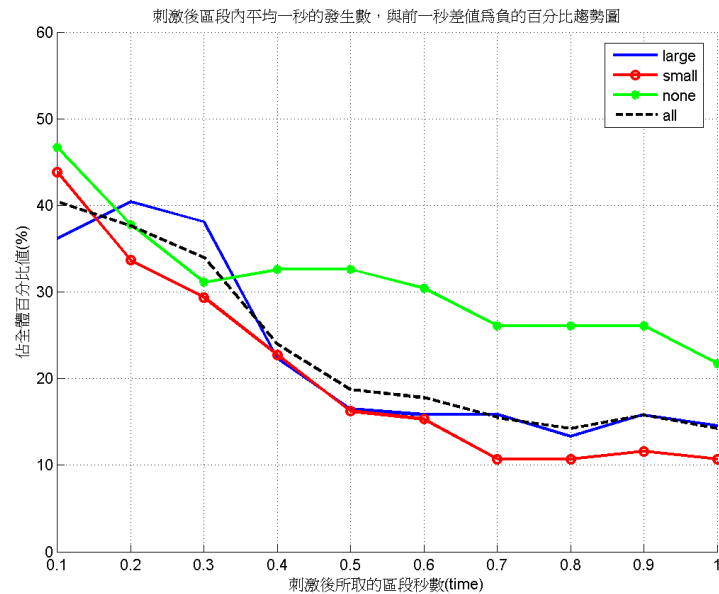
本小節得到以下結論：

1. 圖 24 中，比起樣本點將進 50% 的比例，資料點的 $D(t_i)$ 負值數量百分比最大也只有 25%。所以我們可以說，本實驗的刺激作用於老鼠，若產生抑制動作電位的情形並非常態。也可說，有 75% 的資料點在刺激後提升了動作電位的發生數量，確定了此刺激造成的訊號傳遞是來自動作電位的增加。
2. 從圖 24 之左圖的觀察，資料點差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比，在時間 $t_i = 0.3$ 秒到 $t_i = 0.5$ 秒，其值從 29% 降到 13%。也就是在 $D(0.3)$ 為負的這些資料中，有 1/2 以上的資料在 $D(0.5)$ 時其值轉為正：刺激後的反應數大於刺激前。這說明動作電位的發生數量在 0.3 ~ 0.5 秒期間有一個高蜂值。並且由趨勢圖中看到 0.5 秒以後， $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨於穩定。我們判斷神經在 0.5 秒以後的動作電位發生次數，與刺激前常態的發生次數接近。也就是說，神經元因為刺激所造成的興奮已經完成，並且呈現逐漸恢復的狀態。
3. 觀察圖 26，大甩尾與小甩尾的 $D(t_i)$ 負值數量百分比趨勢與全體的資料趨勢類似，可見由此資料無法區分大小甩尾的差異。而不甩尾的趨勢較不規則，在 0.7 秒以前都沒有穩定的現象。若以結論 2 的想法推論不甩尾反應的訊號，其刺激後動作電位的發生數量，與刺激前並沒有很大的改變。
4. 圖 27 為 3 L 資料，也就是實驗對象在刺激後是三種反應皆有，統計出來趨勢與圖 26 的類似，但百分比偏高。大小甩尾的數據仍然沒有太大差異，而



大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。

圖 26: (所有資料) 依類型分開統計 差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖



大甩尾樣本數 158 個，小甩尾樣本數 112 個，不甩尾樣本數 32 個。

圖 27: (3 L 資料) 依類型分開統計 差值 $D(t_i)$ 為負的數量百分比趨勢圖

不甩尾的趨勢線在 $t_i = 0.3$ 以後才與另兩類型的趨勢線有較明顯的區別。此

圖的討論結果與結論 3 相同。

4.1.3 刺激前後每 0.1 秒的討論

依據第一小節最後的結論，我們將刺激前後的動作電位發生數量的統計時間改為十分之一秒（0.1 秒），以減少訊號樣式的模糊化。將資料點以刺激後反應行為分為三個類型：大甩尾、小甩尾、不用尾各別統計，比較不同反應類型與動作電位發生數量的關聯。我們在第二小節的統計方法中，透過刺激前後一秒的平均次數差異，發現神經元在刺激後的 0.3 ~ 0.5 秒間會產生大量動作電位，並且神經受刺激產生的興奮性應該在一秒內即完成。於是延續此想法與假設，以刺激的時間點為原點，統計每單位時間 0.1 秒中的動作電位發生次數分布情形。觀察資料點中 $[-1, 1]$ 時間範圍，計算出每單位時間中不同反應類型的發生次數期望值，觀察以刺激點為基準前後相對的時間中，不同反應類型其動作電位發生數量的改變特徵。

圖 28 為刺激前一秒範圍 $[-1, 0]$ 內每 0.1 秒的次數分布圖，圖 29 為刺激後一秒的。圖中第 (1) 小圖的數據，是來自隨機樣本對照點後 0.1 秒的動作電位發生次數。也就是說，第 (1) 小圖代表的是神經常態下 0.1 秒內的動作電位發生次數分布圖。此對照點的發生次數期望值 1.83，可以說是常態下神經 0.1 秒的平均發生數。第 (2) 到第 (11) 小圖即為資料點每單位時間的次數直方圖，並且將該直方圖個別類型的期望值記於圖中。從圖 28 與圖 29 的資料中，我們可以觀察到 $[-1, 1]$ 範圍內，每個單位時間的發生次數期望值。圖 30 以刺激前後時間為 X 軸表示出期望值的趨勢圖。其中左圖數據來自所有資料點，右圖來自 3 L 資料。額外對 3 L 資料作分布圖的討論，是為了避免三種反應類型資料點的數量差異造成

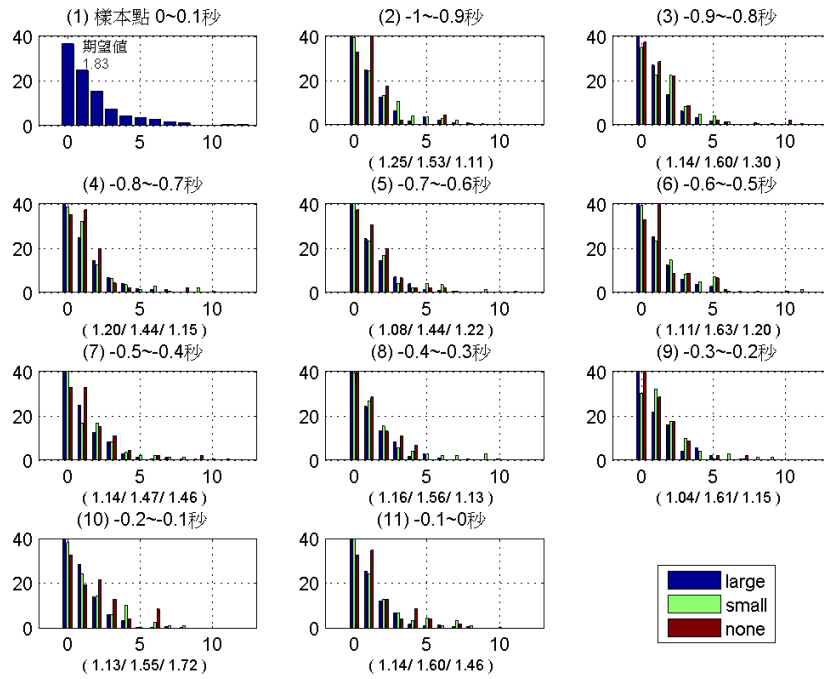


圖 28: (所有資料) 刺激前每 0.1 秒的動作電位發生次數統計圖

大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。

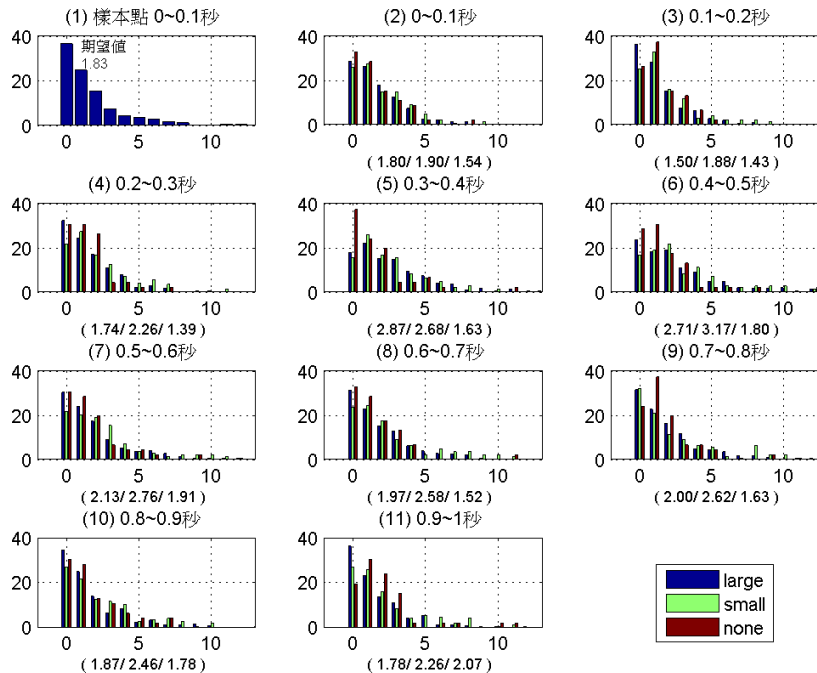
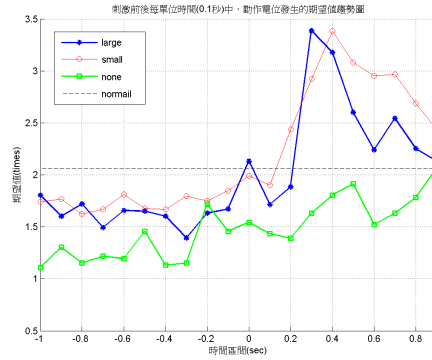
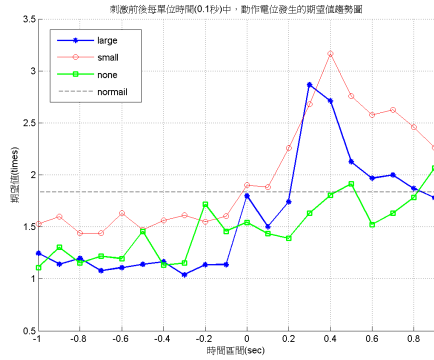


圖 29: (所有資料) 刺激後每 0.1 秒的動作電位發生次數統計圖



所有資料：大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不用尾樣本數 46 個。
 3 L 資料：大甩尾樣本數 158 個，小甩尾樣本數 112 個，不用尾樣本數 32 個。

圖 30: (左：所有資料，右：3 L 資料) 刺激前後一秒內，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖

分析上的影響，用來與所有資料作比較討論。

圖 30 中的黑色虛線為上述樣本點的發生次數期望值，X 軸對應的資料是該時刻後 0.1 秒的時間區間。例如：若 $X = 0.1$ 時 $Y = 2$ ，代表的數據是指刺激後 0.1 ~ 0.2 秒的區間中，動作電位的發生次數期望值為 2 次。因為原點的值代表刺激後 0 ~ 0.1 的期望值，所以原點就區分了刺激前與刺激後的數據。從圖30 看到期望值的變化，再次印證了上一小節中結論 2 的概念：刺激在特定的時間發生次數劇增。這裡又更仔細的觀察出以下幾點訊號的特徵：

1. 原點以前的數據，也就是刺激前的期望值，只有不用尾反應在 $-0.2 \sim -0.1$ 秒的時間有突然增加的現象。而且其上升的趨勢，與大甩尾在刺激後 0.1 秒所產生的期望值上升趨勢類似。此現象引發我們對生物訊號的假設：是否在刺激前有產生如此較大量的訊號，就容易導致刺激後生物的反應訊號受到干擾而影響反應的發生。
2. 大甩尾與小甩尾在原點之後，明顯地與不用尾的期望值有很大的差異。於是我們判斷不用尾反應的動作電位，在刺激後發生次數的變化較另外兩類

緩和許多。

3. 觀察原點前後，發現大甩尾的期望值明顯急劇增加，這跟預期中的想法是吻合的：刺激後神經元的訊號傳遞造成動作電位發生次數頻繁。其次是小甩尾，變化最不明顯的是不用尾的類型。所以我們認為，甩尾反應的程度與刺激後的訊號量有正比的關係。
4. 比較圖 30 中，全體資料點與 3 L 資料的期望值分布圖。左圖中 3 L 資料的大甩尾和小甩尾期望值明顯比不用尾的期望值大，且大部份的時間皆保持一定的差距。表示對於這些有發生不用尾的老鼠神經來說，其刺激後不用尾的訊號發生次數，不論是在刺激前或後，的確都低於大小甩尾的發生次數。比較右圖的全部資料期望值趨勢圖，以左右兩圖中不用尾數據為基準，就可以發現左圖中全部資料統計的大小甩尾趨勢線，整體而言比右圖下降了許多。甚至在原點前除了 $X = -0.2$ 此點的資料以外，大甩尾與不用尾的期望值趨勢線很接近。我們解釋此現象，是對於相同老鼠的神經訊號，能從刺激前與刺激後的訊號比較，觀察出有無甩尾的樣式特徵。但如果我們要針對不同老鼠的神經訊號，討論其與反應類型的關聯，就只能從刺激後的訊號特徵來觀察。
5. 對於大甩尾與小甩尾，我們觀察圖 30 中 $X = 0.1$ 與 $X = 0.2$ 的數值趨向，發現小甩尾的上升趨勢比大甩尾明顯許多。判斷小甩尾反應在 0.2 ~ 0.3 秒的時間內開始較頻繁的產生動作電位，持續到 0.3 ~ 0.4 秒的時間達到最大期望值。而大甩尾反應從 0.3 ~ 0.4 才開始產生大量的動作電位，似乎比小甩尾晚了 0.1 秒。而且在這 0.1 秒就達到最大的發生次數期望值。所以判斷小甩尾反應，在刺激後的反應比大甩尾早且持續較久，動作電位恢復常態

的時間也比大甩尾來的晚。

6. 對於結論 5 最後提到，關於刺激後神經訊號的狀態恢復時間，我們從圖 31 觀察刺激後三秒內的發生次數來討論。以圖中的黑色虛線，也就是對照點單位時間內的發生次數期望值 1.83，為訊號常態的判斷標準。觀察大甩尾類型在刺激後 1 秒內，其發生次數就降回了黑色虛線以下。而小甩尾類型卻到刺激後 1.5 秒左右，訊號發生數的期望值才降至較接近黑色虛線附近。所以我們說，小甩尾反應的神經受到刺激後，恢復到常態所需的時間比大甩尾來的長。

表 9: (實際訊號) 期望值趨勢線 T 檢定

反應型態	<i>p-value</i>		
	大甩尾	小甩尾	不用尾
大甩尾	×	$1.5074 \cdot 10^{-12}$	$4.2478 \cdot 10^{-5}$
小甩尾	$1.5074 \cdot 10^{-12}$	×	$1.3571 \cdot 10^{-13}$
不用尾	$4.2478 \cdot 10^{-5}$	$1.3571 \cdot 10^{-13}$	×

在顯著水準為 0.05 之下，三類型的期望值趨勢彼此皆有顯著差異。

7. 表 9 為圖 31 中三類型趨勢線的 T 檢定的 *p-value* 值。得到的結果皆比顯著水準小很多，表示三條趨勢線之間有顯著的差異，三類型在刺激後的訊號數量變化有其獨特性。圖 32 的統計方法與圖 31 相同，再另外加上資料的誤差範圍。觀察圖中三種反應類型，我們得到結論：除了小甩尾在刺激後三秒鐘皆保持訊號量較高的狀態，三類型在刺激後一秒的時間內其訊號發生次數的趨勢差異較明顯，較能看出反應類型的特徵。

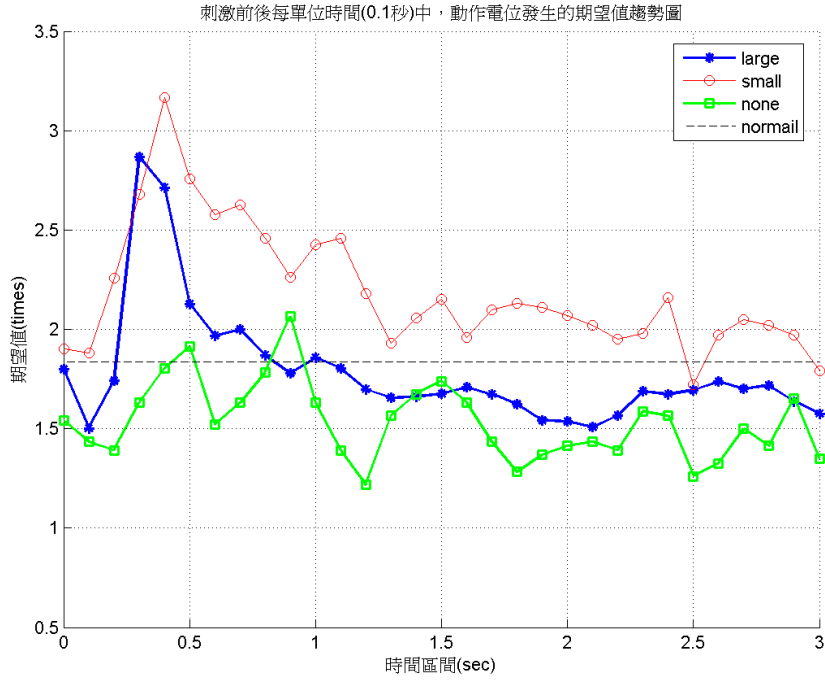
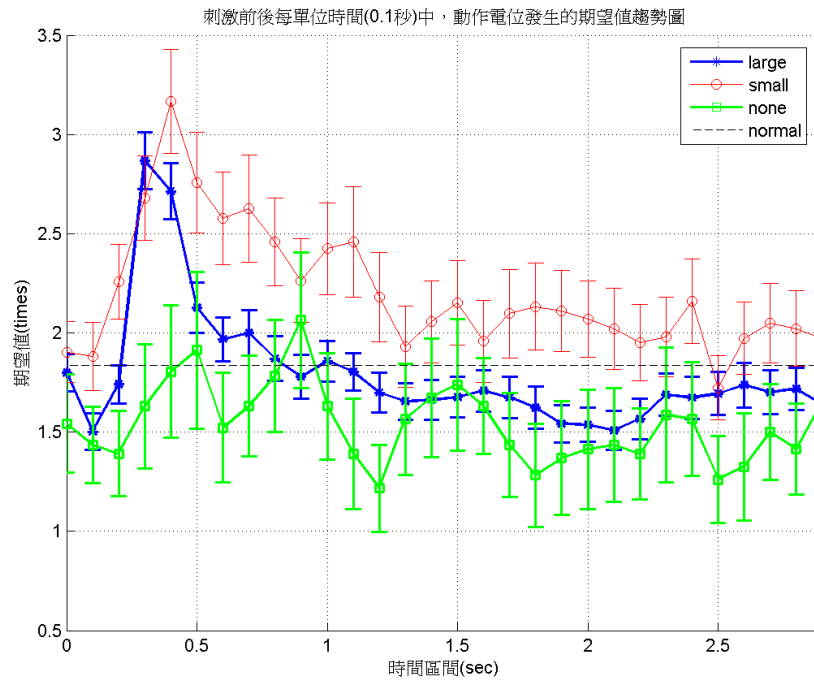


圖 31: 刺激後三秒，每0.1秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖

大甩尾樣本數 408 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。



$error\ bar$ 為 $\pm \frac{std}{\sqrt{n}}$ ， n 為樣本個數。

圖 32: 刺激後三秒，每0.1秒的動作電位發生次數期望值 $error\ bar$ 圖

4.2 神經元的篩選

從 4.1.2 小節得到的結論 1，我們判斷本實驗的刺激作用於老鼠，神經元產生抑制的動作電位並非常態的情形。在同樣 4.1.2 小節的結論 2 和圖 26 (第 40 頁)，發現神經元由刺激所造成的興奮，會在刺激後 0.5 秒內完成。若以 $D(t_i)$ 值的變化來解釋，可以說因為 $D(t_i)$ 值在 $0.3 \leq t_i \leq 0.5$ 的範圍內大幅度下降，且 $t_i > 0.5$ 以後的值趨於穩定，所以刺激前後 0.5 秒的動作電位差，應該最能代表神經元的興奮狀態。也就是說每個資料點的 $D(0.5)$ 值越小，神經元受到刺激產生的興奮狀態越不明顯。當 $D(0.5)$ 值為負的，則此資料點的訊號與反應行為的關聯極不明顯。對於上述所討論的這些 $D(0.5)$ 值為負的資料點，對於我們的分析是不利的。於是我們想要知道，這些不利於分析的資料點，是否集中在少數神經元？或是均勻發生在每一個神經元？

為了回答以上問題，我們將每筆資料的每個神經元，計算其刺激前後 0.5 秒的 $D(0.5)$ 值，結果列於表 10。特別說明，因為從表 8 (第 27 頁) 中發現，資料六的第一神經元與第四神經元在常態下的訊號平均發生數，相較於其他的神經元來說非常的大，這兩個神經元本身的狀態就很不同，所以對於我們以下的討論暫不列入，以免影響結果的判斷。

表 10 的數據顯示， $D(0.5)$ 負值發生的情形並非均勻出現在每一個神經元中。在這樣的情形下我們假設，如果神經元發生 $D(0.5)$ 負值的情形較高，則此神經元對於刺激所產生的興奮性較不顯著。從圖 25 (第 38 頁) 中我們知道，所有資料的 $D(0.5)$ 負值所佔的比例為 13.4%。以此為門檻標準，表 10 中 $D(0.5)$ 值為負的比例大於此標準的神經元有七個：資料一的所有神經元、資料二的第一個神經元、資料三的第三與第五個神經元，以及資料六的第二和第三個神經元。這七個

神經元不利於分析的資料點數量皆超出標準，稱為「不利神經元」。我們想要知道，是否這些不利神經元的所有資料點，對刺激的興奮性都比較不明顯？

表 10: (實際訊號) 個別神經元 $D(0.5)$ 值列表

資料 編號	刺激 數量	統計 資料	$D(0.5) < 0$						
			unit-1	unit-2	unit-3	unit-4	unit-5	unit-6	unit-7
一	29	個數	14	12	-	-	-	-	-
		百分比	48%	41%	-	-	-	-	-
二	21	個數	3	1	-	-	-	-	-
		百分比	14%	5%	-	-	-	-	-
三	20	個數	0	1	8	1	4	-	-
		百分比	0%	5%	40%	5%	20%	-	-
四	23	個數	0	2	1	2	2	3	-
		百分比	0%	9%	4%	9%	9%	13%	-
五	20	個數	0	0	0	1	0	2	0
		百分比	0%	0%	0%	5%	0%	10%	0%
六	30	個數	×	7	6	×	-	-	-
		百分比	×	23%	20%	×	-	-	-

我們將不利神經元的所有資料點，用 4.1.3 小節的統計方法，計算刺激前後一秒內每 0.1 秒的動作電位次數期望值，作圖 33 觀察其趨勢。圖 33 的原點前後的發生期望值，也就是刺激前後動作電位的發生次數期望值並沒有很明顯的變化。圖 34 為不利神經元以外的所有資料點統計圖。對照這兩張圖的原點前後，更可以看出：刪除了不利神經元之後，刺激後所產生的訊號數量很顯著的增加，而不利神經元中的資料點，對於刺激的反應皆沒有明顯的動作電位數量增加趨勢，其興奮性較不顯著。這樣的結果符合我們的假設：若神經元發生 $D(0.5)$ 負值的情形高於標準，則此神經元對於刺激所產生的興奮性較不顯著，不利於討論刺激與反應行為的關聯性。

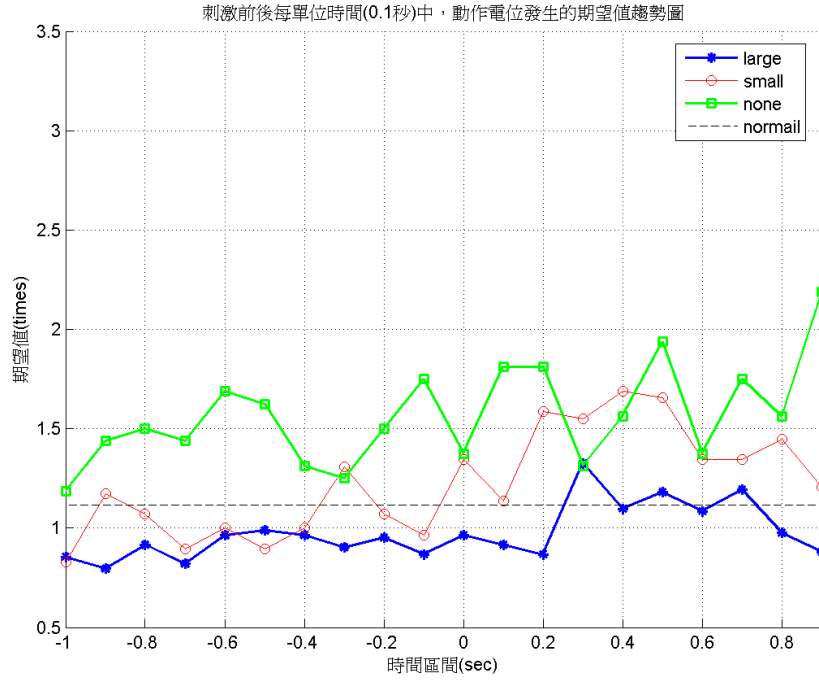


圖 33: (不利神經元) 刺激前後每0.1秒的訊號發生次數期望值趨勢圖

不利神經元：大甩尾樣本數 130 個，小甩尾樣本數 59 個，不用尾樣本數 20 個。
 篩後神經元：大甩尾樣本數 278 個，小甩尾樣本數 85 個，不用尾樣本數 26 個。

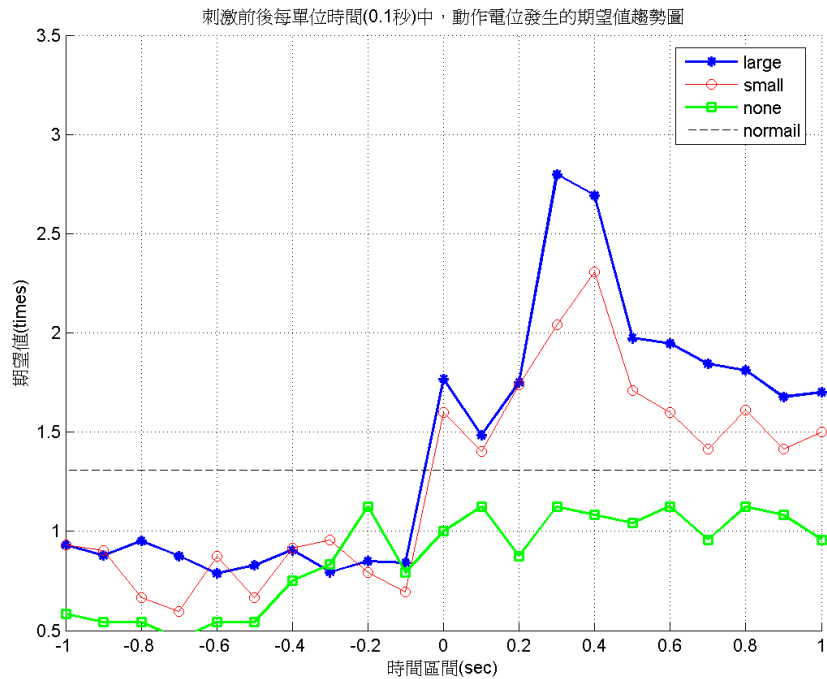


圖 34: (篩除後的神經元) 刺激前後每0.1秒的訊號發生次數期望值趨勢圖

我們將此節的發現，歸納於以下幾點：

1. $D(0.5)$ 值為負的資料點並非均勻出現在每一個神經元中，也就是說這種情形並非偶然，而是在某些神經元中較常出現。
2. 我們以全體資料 $D(0.5)$ 負值佔的百分比 13.4% 作為標準，計算每個神經元的 $D(0.5)$ 負值百分比，大於標準的即為不利神經元，將予以篩除。從圖 33 和圖 34 中刺激後數量期望值的差異比較，明顯地看出，這些篩除神經元在刺激後的動作電位發生量的確沒有明顯上升。
3. 資料一中兩個神經元皆被列為不利神經元，從表 10 中可以看到此二神經元產生 $D(0.5)$ 為負的數量較多，且資料一是六個資料中發生最多不用尾反應的老鼠（7 次）。雖然圖 33 中三種反應類別的趨勢線確實較相近，但能否表示資料中包含的不利神經元愈多，愈容易產生不用尾反應？因為只有一筆資料具備此現象，我們並不能確定。因此對於這些不利神經元，我們只能說其神經元訊號對刺激的興奮性並不够明顯，所以決定暫時不列入討論。
4. 對照圖 24 (第 38 頁) 中所有資料的 $D(t_i)$ 負值直方圖，將篩選後神經元的資料點作相同統計，在圖 35 中即可比較兩者的差異。我們發現篩選後的資料 $D(t_i)$ 其負值比例整體降低了，但其趨勢並沒有改變。也就是說篩選後的神經元資料，並沒有影響我們在 4.1.2 小節結論中，對於神經訊號與反應動作的特徵判斷。

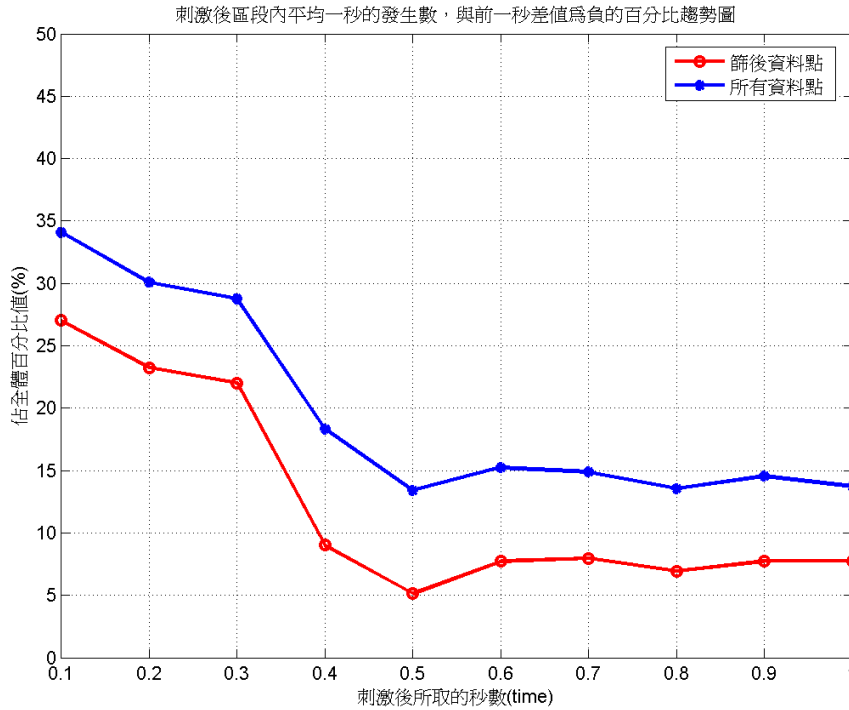


圖 35: (篩選前後神經元) 資料點 $D(t_i)$ 的負值比例趨勢圖

不利神經元：大甩尾樣本數 130 個，小甩尾樣本數 59 個，不用尾樣本數 20 個。
 篩後神經元：大甩尾樣本數 278 個，小甩尾樣本數 85 個，不用尾樣本數 26 個。

4.3 固定時間的訊號數量分布

先前所作的統計，都是神經訊號的累積量或是前後的差異，還沒有機會觀察其分布情形，我們曾想用視覺或分群演算法 (包括 *kmeans* 分類和 *PCA* 主成分分析法)，作分布類型的分類，企圖找到與行為反應的關聯。但是，這方面的嘗試都未有成功的結論。此節敘述製作分佈圖的方法，作為研究過程的一項紀錄。而由分佈圖所能獲致的結論，仍與前兩節相同。

我們回到最初的數據，將固定時間的尺度拉到 1 秒與 0.5 秒做整體的觀察。之所以用 0.5 秒與 1 秒來觀察，是因為我們在前幾節已經得到了結論，知道刺

激後神經元的興奮性在 0.5 秒左右結束。而且不同反應類型，其神經訊號產生大量和回復的時間並不相同。所以我們想要觀察動作電位的數量，在刺激前、刺激後和刺激後一段時間的整體分布差異，是否對於不同的反應類型會有明顯的差異。

我們對實際刺激的資料點，統一用刺激前的固定時間當 X 軸數據，分別對刺激前第二個固定時間，與刺激後第一個和第二個固定時間的資料作圖觀察。同樣地，為了對照資料點的分布，我們選取一組與資料點同數量，在神經常態下隨機選取的對照樣本點，以對照點的前後固定時間發生次數為 X Y 軸作圖。例如：固定時間為 0.5 秒，對照分布圖以對照點的前 0.5 秒為 X 軸，後 0.5 秒為 Y 軸作圖。資料分布圖以刺激前 $-0.5 \sim 0$ 秒的動作電位發生數量當作 X 軸，第二個小圖以刺激前 $-1 \sim -0.5$ 為 Y 軸，此圖形分布應該會接近對照分布圖，因為資料來自刺激前的常態神經訊號。第三個小圖以刺激後 $0 \sim 0.5$ 秒為 Y 軸，第四個小圖以刺激後 $0.5 \sim 1$ 秒為 Y 軸作圖。這裡我們的統計方法分別對全部的資料，以及 4.2 節中討論的篩選後神經元的資料點作圖形分析。不同的反應類型作不同的標記，並以反應類型為組別，作線性回歸線方便觀察差異，其方程式係數列於表 11 和表 12。

從圖 36 ~ 39 的資料分布以及表 11、表 12 的數據，我們歸納出以下的結論：

1. 從圖 36、37 的資料點分布，很難看出三種反應類型的差異，表示三類反應的訊號發生數量差異並不大。
2. 圖 36 和圖 37 用固定時間 0.5 秒來看，小圖 (2) 與小圖 (1) 的分布並對照表 11 的回歸線方程，的確如同先前的假設：其次數分布是相似的。且數據的

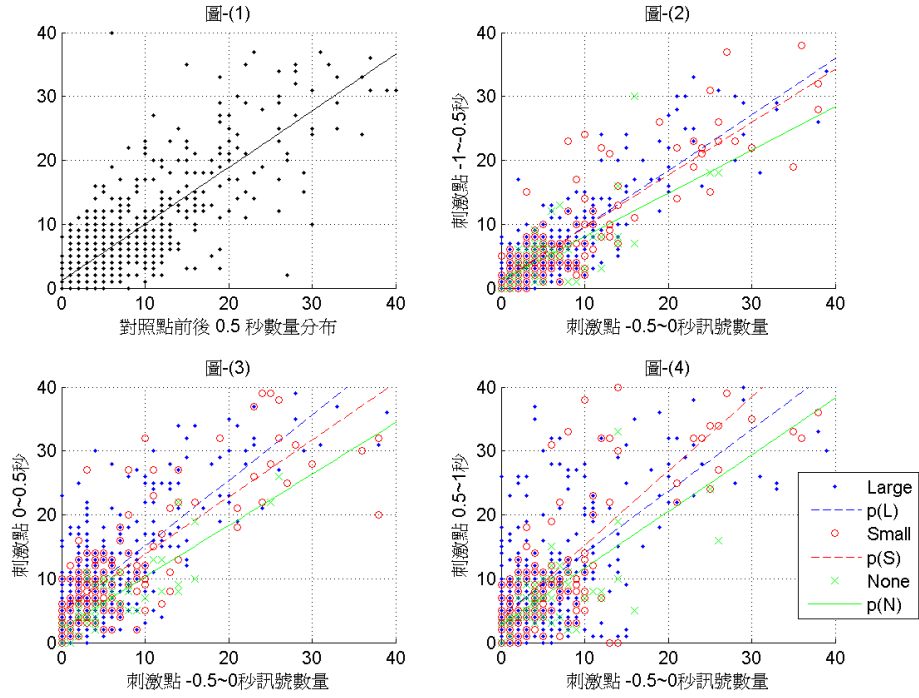


圖 36: (所有資料) 每 0.5 秒前後動作電位發生數量分布圖

所有資料：大甩尾樣本數 480 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。
 篩後資料：大甩尾樣本數 278 個，小甩尾樣本數 85 個，不甩尾樣本數 26 個。

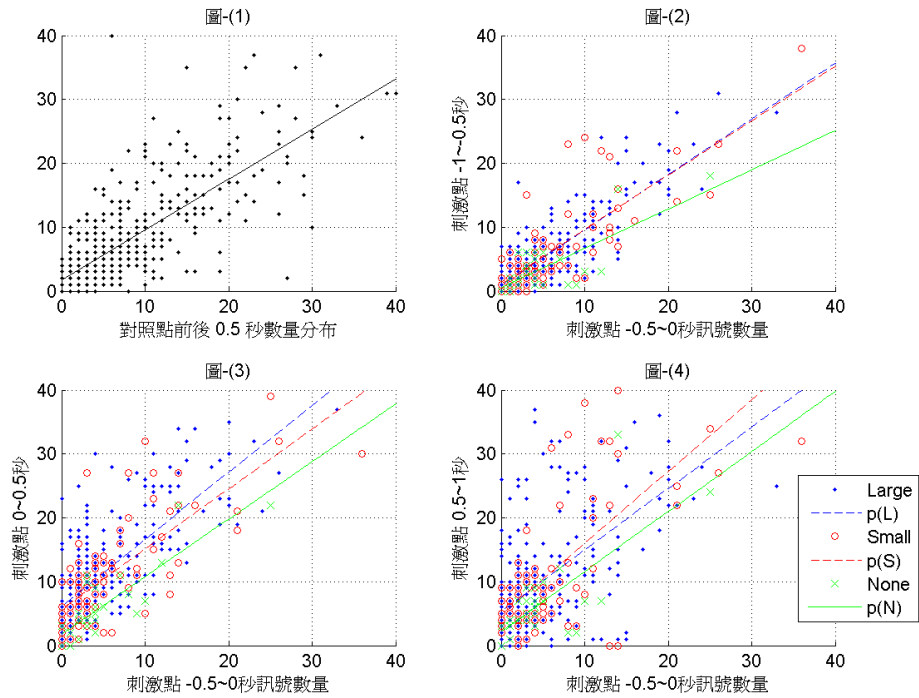


圖 37: (篩後資料) 每 0.5 秒前後動作電位發生數量分布圖

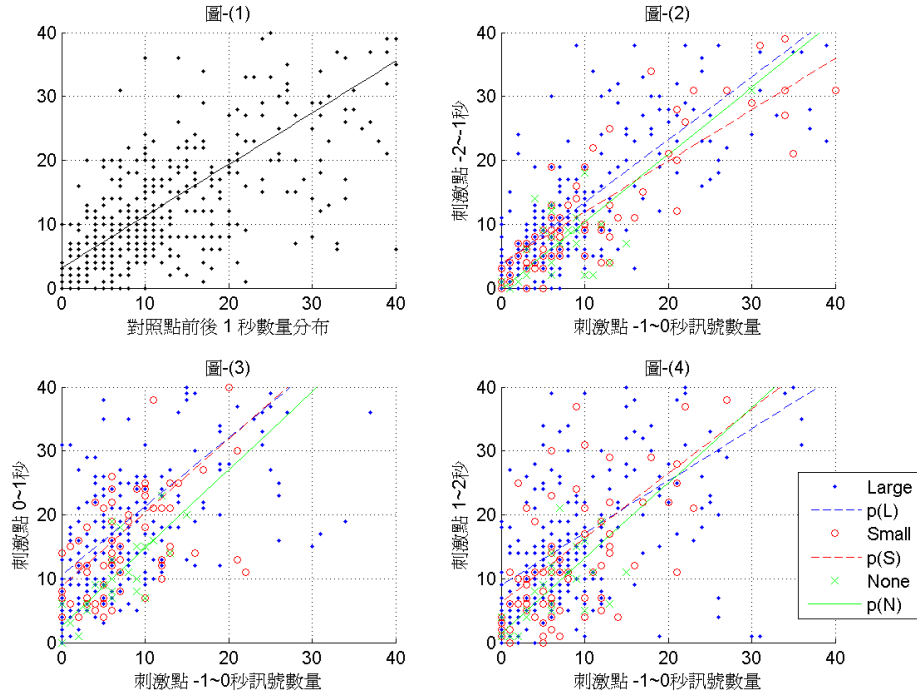


圖 38: (所有資料) 每 1 秒前後動作電位發生數量分布圖

所有資料：大甩尾樣本數 480 個，小甩尾樣本數 144 個，不甩尾樣本數 46 個。
 篩後資料：大甩尾樣本數 278 個，小甩尾樣本數 85 個，不甩尾樣本數 26 個。

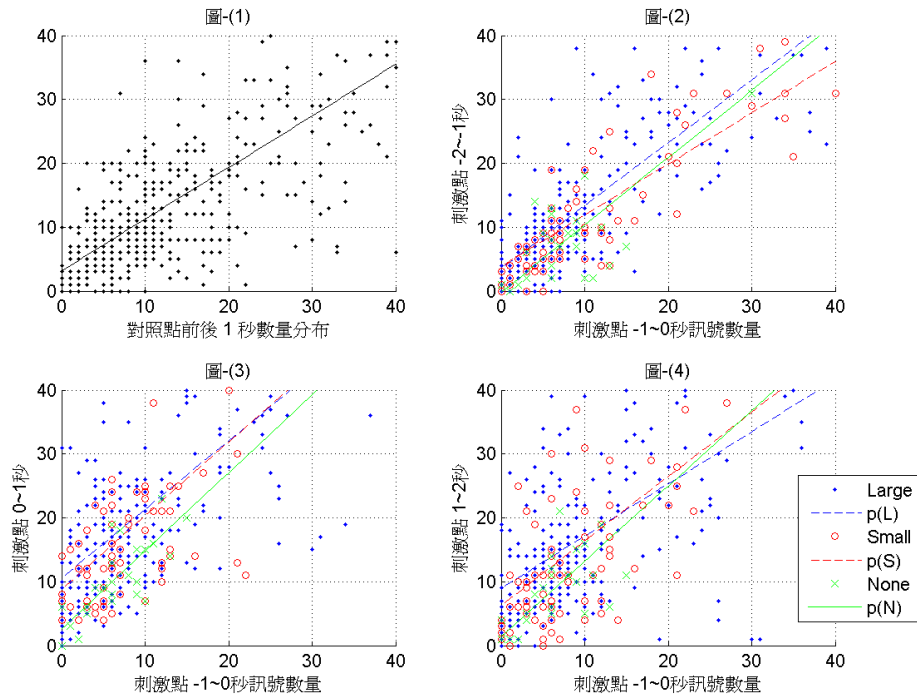


圖 39: (篩後資料) 每 1 秒前後動作電位發生數量分布圖

表 11: 資料固定時間 0.5 秒的訊號數量分布回歸線係數

圖形 編號	X 軸 資料	Y 軸 資料	(p_1, p_2)			
			Large	Small	None	
全部 資料	圖 36- (1)	$[-0.5, 0)$	$[0, 0.5)$	對照點回歸線係數 (0.89, 1.17)		
	圖 36- (2)	$[-0.5, 0)$	$[-1, -0.5)$	(0.88, 0.85)	(0.83, 1.19)	(0.68, 1.30)
	圖 36- (3)	$[-0.5, 0)$	$[0, 0.5)$	(1.03, 4.86)	(0.89, 4.92)	(0.80, 2.24)
	圖 36- (4)	$[-0.5, 0)$	$[0.5, 1)$	(0.97, 4.30)	(1.16, 3.62)	(0.89, 2.79)
篩後 資料	圖 37- (1)	$[-0.5, 0)$	$[0, 0.5)$	對照點回歸線係數 (0.79, 1.75)		
	圖 37- (2)	$[-0.5, 0)$	$[-1, -0.5)$	(0.87, 0.90)	(0.85, 1.13)	(0.61, 0.56)
	圖 37- (3)	$[-0.5, 0)$	$[0, 0.5)$	(1.05, 6.18)	(0.94, 5.75)	(0.90, 1.79)
	圖 37- (4)	$[-0.5, 0)$	$[0.5, 1)$	(0.96, 5.38)	(1.12, 4.82)	(0.94, 2.20)

線性回歸線 $p(x) = p_1x + p_2$

表 12: 資料固定時間 1 秒的訊號數量分布回歸線係數

圖形 編號	X 軸 資料	Y 軸 資料	(p_1, p_2)			
			Large	Small	None	
全部 資料	圖 38- (1)	$[-1, 0)$	$[0, 1)$	對照點回歸線係數 (0.90, 1.99)		
	圖 38- (2)	$[-1, 0)$	$[-2, -1)$	(1.01, 2.47)	(0.82, 3.74)	(1.00, 0.65)
	圖 38- (3)	$[-1, 0)$	$[0, 1)$	(1.08, 8.11)	(1.14, 7.00)	(1.09, 2.61)
	圖 38- (4)	$[-1, 0)$	$[1, 2)$	(0.92, 6.47)	(1.12, 4.24)	(1.22, -0.76)
篩後 資料	圖 39- (1)	$[-1, 0)$	$[0, 1)$	對照點回歸線係數 (0.81, 3.20)		
	圖 39- (2)	$[-1, 0)$	$[-2, -1)$	(0.98, 3.57)	(0.80, 3.90)	(1.05, -0.16)
	圖 39- (3)	$[-1, 0)$	$[0, 1)$	(1.07, 10.63)	(1.15, 8.81)	(1.22, 2.62)
	圖 39- (4)	$[-1, 0)$	$[1, 2)$	(0.82, 8.99)	(1.01, 6.31)	(1.18, 1.43)

線性回歸線 $p(x) = p_1x + p_2$

分布接近對角線，符合常態狀況下每單位時間動作電位發生的次數相近。

在小圖 (2) 裡，大甩尾和小甩尾的線性回歸也幾乎一致，但甩尾的回歸線偏低，表示多數資料點在 $-0.5 \sim 0$ 秒的訊號發生數量比 $-1 \sim -0.5$ 秒略多。

3. 在圖 36、37 之中，小圖 (3) 的回歸線相較於小圖 (2) 有往上平移的現象，印証刺激後動作電位發生數量比刺激前大。圖 38、39 為固定時間 1 秒的次數分布，因為刺激後一秒內包含了刺激產生的訊號興奮，以及訊號恢復的期間，所以看此情形更明顯。
4. 對本章第一節所觀察出的現象，大小甩尾在 0.3 ~ 0.5 秒會產生大量的動作電位，而在 0.5 秒後訊號量開始降低。所以在圖 36 和圖 37 之中，比對小圖 (3) 和小圖 (4) 的回歸直線也獲得相同的結論：判斷大甩尾在刺激後 0.5 秒所累積的動作電位數較多，但狀態恢復的情形也較快。
5. 圖 36 ~ 39 中的資料分布情形並不清楚，所以雖然我們在圖 38 和圖 39 中篩除了部份不利於分析的神經元，仍然無法從中辨別出三種反應類型的差異。

第 5 章 動作電位數量與刺激的關聯

我們在第四章討論刺激前後動作電位的特徵，對於刺激後的動作電位與反應行為的關聯有以下兩個判斷：

1. 感覺神經在刺激後的 0.3 ~ 0.5 秒之間的訊號發生期望值突然大量增加，也就是說，在這段時間產生了大量的訊號。大小甩尾之行為反應在開始發生大量訊號的時間，以及回復到常態的時間略有差別。不用尾反應的訊號在刺激後的最大發生數量期望值，也明顯比另兩種反應類型少許多。
2. 不用尾類型的訊號在刺激前，似乎有一個較大的訊號量發生。

於是由這兩點的觀察，對刺激前後訊號的發生數量及時間點，不同的反應類型應有其獨特性。我們希望藉由這個獨特性，設計由感覺神經訊號判斷反應行為的演算法。

我們在第一節說明此判斷演算法的模型與概念。第二與第三節透過第一節的模型而設計判斷的方法，對真實訊號的資料點進行判斷，並計算此演算法的判斷效能。因為在第二、三節的討論中，只將資料點分為有甩尾與不用尾的兩類進行判別，所以第四節我們延續第三節的演算過程，但排除不用尾反應的類型，針對大小甩尾進行判斷，與第三節的結論做比較。

5.1 機率分布模型

我們先用單位時間為 1 秒的資料說明演算法，從圖 17 (第 33 頁) 的直方圖中可以看到，每一個 *bin* 的發生數量在三種反應類型中都有其百分比。也就是說，

對於某一個訊號數量，在每一個反應類型資料裡都有其發生率。以訊號發生數量 0 為例，大甩尾中有 $a\%$ 、小甩尾中有 $b\%$ ，而不用尾中有 $c\%$ 其時間內訊號發生數量為 0。我們可以在這個數據下，對這三個數據再做相對百分比。以前例來說明，對於發生數量為 0 次的資料點，就能假設其屬於大甩尾的機率為 P_L ，屬於小甩尾的機率為 P_S ，屬於不用尾的機率為 P_N ，

$$P_L = \frac{a}{a+b+c}, \quad P_S = \frac{b}{a+b+c}, \quad P_N = \frac{c}{a+b+c}.$$

此方法中，有兩種情況比較特別：第一，若三筆資料皆沒有統計數據，則令三筆資料的機率皆為 $1/3$ 。也就是若 $a = b = c = 0$ ，則令 $P_L = P_S = P_N = 1/3$ ，表示屬於這三類的機率都一樣。第二，若三類型只有其中一或兩類沒有統計數據，則這個情形就依照原本比例計算，而沒有統計數據的類別設定其機率為 0.1% 。例如：若 $a = 10, b = 33, c = 0$ 則，

$$P_L = \frac{10}{10+33+0.1}, \quad P_S = \frac{33}{10+33+0.1}, \quad P_N = \frac{0.1}{10+33+0.1}.$$

這樣假設的目的，是爲了後面章節中多個機率的累積判斷，避免因爲其中一次判斷的類別機率爲零，而使得此資料點的累積判斷在此類型的機率從此爲零。依照此方法，我們統計所有資料的刺激前一秒動作電位發生次數，就可以概略的作出一個判斷標準，圖 40 爲此標準中三類型機率分布的累積直方圖。

對實際資料點的測試，我們計算每個資料點的刺激前一秒動作電位發生數，再依照上述標準來判斷此資料點屬於三類型的機率大小，機率最大的類別即爲該資料的判斷類型。由於現在的標準只有一組，就是前一秒的動作電位發生數量，所以圖 40 的比例就代表了實際判斷的結果。黑色和灰色部份即代表判斷爲甩尾的機率，白色的部份代表判斷爲不用尾的機率。若我們只觀察甩尾與不用尾的情

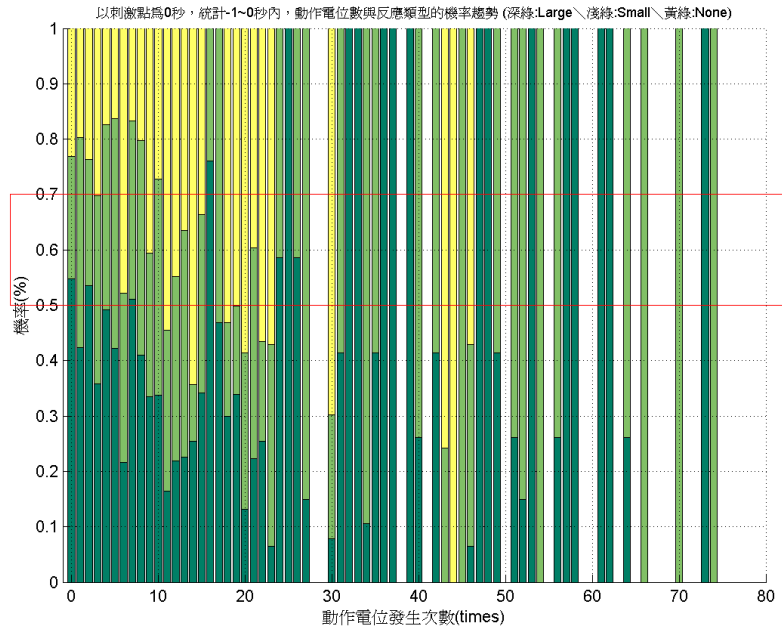


圖 40: 刺激前一秒動作電位平均發生率分類標準比例圖

所有資料：大甩尾樣本數 480 個，小甩尾樣本數 144 個，不用尾樣本數 46 個。

況，那麼根據我們訂定的判斷條件，白色部份若大於 0.5 則一定判斷為不用尾；白色若大於 0.33 並且大於另兩類的機率，也判斷是不甩尾。特別要注意的是，圖 40 空的部份 (例如：60 和 63)，即為先前說明中提到的，三類型皆無統計數據，不分機率大小的部份。

我們以表 13 為例，此列表只取資料一裡刺激後反應為大甩尾的資料點，經由機率分佈方法的判斷得到的結果。可以看到對同一個刺激，兩個神經元判斷出的反應類別並不一定相同。我們相信且假設多個神經傳遞訊息時，會以訊號量較明顯且趨於有反應的為主，所以令反應行為的決定是來自數個神經元判斷後的多數投票決。而且從前面的章節，可以發現相較於不用尾反應的訊號，甩尾反應的訊號是屬於興奮性較高的，且大甩尾又比小甩尾來的更明顯。所以若對同一個刺

激，數個神經元的判斷類型正好各佔一半，則最後的判定為反應較大的類型。例如表 13 中，L1 刺激在第一個神經元判斷為不用尾，在第二個神經元判斷為小甩尾，於是根據假設此刺激後的反應行為判斷是小甩尾。

表 13: 使用機率標準判斷類型

刺激編號	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13
unit- 1	3	3	3	3	1	3	2	3	1	3	3	1	3
unit- 2	2	3	2	2	2	1	1	3	3	1	1	1	3
反應類型	2	3	2	2	1	1	1	3	1	1	1	1	3

刺激編號	L14	L15	L16
unit- 1	3	1	3
unit- 2	3	3	1
反應類型	3	1	1

類型對照 — 類 1 :Large / 類 2 :Small / 類 3 :None

5.2 機率判斷法

使用前一節說明的機率分配模型及多數決的假設，我們設計一個演算法，根據刺激前或後神經訊號的樣式，進行對刺激後行為反應的判斷。對六筆資料中所有神經元的資料點進行機率分布判斷，表 13 (第 60 頁) 即為資料一中大甩尾資料點的判斷結果。根據上一小節的說明，最後的反應類型判斷來自多個神經元的投票決，以多數為判斷結果。當票數相同時，以較大的反應為主，例如：大甩尾與小甩尾同票數，則判定為大甩尾；小甩尾與不用尾同票數，則判定為小甩尾。因為實際資料中每個刺激的反應類型是已知的，所以依此方式判斷資料點的反應類型後，就能計算其判斷的效度和信度。

表 14 及表 15 即為六筆資料判斷後的數據統計，以及其信度與效度的列表。這裡的效度代表判斷正確的數量，佔該類型實際數量的比例，表示判斷正確的效率高。信度代表以演算法分出的反應類別中，判斷結果與實際行為吻合所佔的百分比，也就是判斷方法的可信程度。效度愈高，所作出的判斷愈接近真實的資料；信度越高，此方法在判斷上就越不容易出現錯誤。

表 14: 刺激前一秒為標準，機率累積判斷結果

有用尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	18	17	22	77%	94%
二	21	21	21	100%	100%
三	13	13	20	65%	100%
四	21	19	19	100%	90%
五	19	19	20	95%	100%
六	24	24	28	85%	100%
總合	116	113	130	87%	97%
不用尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	11	6	7	86%	55%
二	0	0	0	0%	0%
三	7	0	0	0%	0%
四	2	2	4	50%	100%
五	1	0	0	0%	0%
六	6	2	2	100%	33%
總合	27	10	13	77%	37%

效度：判斷正確/實際個數

信度：判斷正確/判斷個數

這裡我們只先區分出有用尾與不用尾，也就是說對於資料點的判斷，只要判定為大甩尾或小甩尾其中之一，就歸為有用尾的行為類別。表 14 是以刺激前一秒的神經訊號做機率判斷，其中有甩尾的判斷信度普遍很高，表示判斷的結果符

合實際行爲的比率很高，除了資料一、四以外甚至沒有誤判的行爲。但是效度就不如信度這麼好，不過效度最低的資料三中，20 個有甩尾的資料判斷出 13 個，效度也達到了 65%。整體來說，有甩尾的判斷信度與效度都不錯。不用尾的判斷結果中，因為資料二、三、五中並沒有不用尾的反應出現，但資料三與資料五分別判斷出 7 個與 1 個不用尾的反應，所以信度皆為 0%。至於有不用尾反應的資料一、四和資料六中，分別判斷出 11 個、2 個、6 個不用尾，其吻合實際反應的信度分別為 55%、100% 和 33%。從效度來看，資料一裡 7 個不用尾的反應中 6 個有判斷出來，效度為 86%。資料四的 4 個不用尾判斷出 2 個，效度 50%。資料六中的 2 個不用尾反應，皆判斷正確。整體來說，全部 13 個不用尾反應的資料點，判斷的效度高達 77%。而信度因為誤判較多，特別是資料三的誤判，使得整體的信度很低。所以從這樣的數據，可以說刺激前一秒的機率分類，對於實際上不用尾的反應，判斷的效度不低，但是信度不好。

同樣地，我們對刺激後 1 秒的神經訊號做機率判斷，結果如表 15。就個別資料的比較上變動最大的是資料四，有甩尾的信度從 100% 降低到 58%，不用尾雖然信度提高了但效度卻降到 33%，表示有甩尾的反應誤判為不用尾的變多了。其他資料的判斷數據則沒有太大的變動。在 4.1.3 小節的結論 4 中提到，同一個資料中三類型的差異應該來自刺激前與刺激後的特徵，並且因為資料四是屬於 3 L 資料，所以判斷其不用尾的資料差異可能是在刺激前較明顯。整體來看，對照刺激前 1 秒與刺激後 1 的結果，將總合的數據比較列於表 16。

比較表 16 裡刺激前 1 秒和後 1 秒的結果，判斷有甩尾的信度相同，但效度卻是刺激前 1 秒的標準較好；不用尾的效度都有 77%，信度也是刺激前 1 秒較高一些。表 16 中的數據，其判斷過程只根據一次的機率累積，就得到的判斷結

表 15: 刺激後一秒為標準，機率累積判斷結果

有甩尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	18	15	22	68%	83%
二	20	20	21	95%	100%
三	14	14	20	70%	100%
四	11	11	19	58%	100%
五	17	17	20	85%	100%
六	24	24	28	86%	100%
總合	104	101	130	78%	97%

不用尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	11	4	7	57%	36%
二	1	0	0	0%	0%
三	6	0	0	0%	0%
四	12	4	4	100%	33%
五	3	0	0	0%	0%
六	6	2	2	100%	33%
總合	39	10	13	77%	26%

效度：判斷正確/實際個數

信度：判斷正確/判斷個數

表 16: 刺激前後 1 秒，機率累積判斷結果比較

資料數據	有甩尾		不用尾	
	效度	信度	效度	信度
刺激前 1 秒	87%	97%	77%	37%
刺激後 1 秒	78%	97%	77%	26%

果。標準來自刺激前或刺激後，整整 1 秒的動作電位發生次數統計。針對此 1 秒的機率累積判斷，我們歸納以下幾點結論：

1. 根據我們訂定的標準與判斷方法，若三類型的訊號次數分布太過一致，其機率容易被均分，而使得判斷的效度不高。但以表 16 的數據資料來看，不

甩尾的判斷效度並不低，所以我們認為有甩尾與不用甩尾的訊號，其前後 1 秒的次數分布，以此方法來說是有差異的。

2. 表 14 與圖 40 的對照發現，目前資料的標準只有一次的機率判斷，所以不用甩尾的比例集中在發生次數為 11 ~ 23 左右，其資料數又較少，使得發生百分比相對提高，導致這部份的數據大部分被判定為不用甩尾，也是造成信度降低的原因。
3. 雖然標準較寬鬆，不過從表 16 的比較，發現刺激前的動作電位數量，對於有甩尾與不用甩尾的反應型態判斷較好。換句話說，感覺神經元在刺激前的活性，與刺激後的反應行為應該有關聯。

針對第二與第三這兩點，假設刺激前的動作電位發生次數，對刺激後的反應行為應有影響。但只用一次的機率判斷，是很概略的結果，我們希望有多次的機率累積來調整判斷的精確性。在下一節，全部判斷的時間長度仍為 1 秒，但我們將時間單位降至 0.1 秒，所以會有 10 次的機率分布可供判斷。除了減少訊號的模糊化，更希望經由多次機率數據的累積，達到較好的判斷結果。

5.3 機率累積判斷法

我們應用機率判斷的方法，改用 0.1 秒作為一個機率判斷的單位時間長度，累積多個連續單位時間的機率判斷，得到反應類型的判別結果。換句話說，在圖 28、29 (第 42 頁) 中每 0.1 秒的統計數據，都以 5.1 節的演算法建構出一個機率分布模型。所以上一節我們以刺激前 1 秒產生的一組機率判斷標準，在本節變成

以每 0.1 秒產生的連續 10 組標準。訊號需依時間先後，以相對的標準判斷出三類型的機率，並累積此機率結果。也就是說，我們依照時間順序，用每 0.1 秒的發生次數，獨立判斷出此資料點屬於三種反應類型的機率，再與前次單位時間的判斷結果累計。每次機率累計後都會經過標準化，讓三類的機率和皆保持為 1。於是刺激前的 1 秒鐘，在這一節分析裡會經過 10 次的機率判斷，隨著時間調整三種反應類型的機率大小，直到設定的判斷時間範圍結束，最後結果判定為機率最大的類型。對這樣的測試方法，我們同樣以判斷的效度與信度作為依據，評估判斷的優劣。在這樣的設定下有幾點說明：

1. 理想上來說，效度與信度都是評估的依據，效度越高那麼這樣的判斷演算法就越好，可以判斷出越多的正確行為。信度越高，判斷出錯的機率就越低，也就是誤判的情形會越少。但當兩者不能兼具時，例如效度很高但信度很低，這樣情形的發生可能是，演算法判斷出很多個資料點屬於此類型，雖然實際此類型中的資料有大部分都被正確的判斷出來，但錯誤的判斷結果也同樣很多。這樣只能相信判斷出的結果裡，的確包含大部份真實的情形。所以雖然在實際分析上，我們會先以效度為優先考量，畢竟能判斷出較多正確事件，是我們的首要目標，但同時也須考慮信度的優劣。若產生太差的信度，對我們的分析是不好的。
2. 產生機率標準的數據，與拿來做機率累積判斷的數據，是相同的六筆資料。如果這樣的判斷測試準確，我們只能假設，以相同實驗對象的神經訊號產生的模型，對其本身的判斷是準確的，且神經元的訊號的確對不同的反應行為有不同的特徵。但套用到其他實驗對象的神經元上，是否也能有相同的效度與信度，在這裡我們無法看出。

3. 取的單位時間長度為 0.1 秒，是配合前面章節分析所用的單位，希望可以看出同樣以 0.1 秒為單位進行的測試，是否符合我們先前對訊號特徵的假設，而達到較好的判斷結果。

表 17: 每 0.1 秒標準，刺激前 1 秒機率累積判斷結果

有用尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	18	16	22	73%	89%
二	21	21	21	100%	100%
三	18	18	20	90%	100%
四	19	17	19	89%	89%
五	19	19	20	95%	100%
六	28	28	28	100%	100%
總合	123	119	130	92%	97%
不用尾					
資料編號	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
一	11	5	7	71%	45%
二	0	0	0	0%	0%
三	2	0	0	0%	0%
四	4	2	4	50%	50%
五	1	0	0	0%	0%
六	2	2	2	100%	100%
總合	20	9	13	69%	45%

效度：判斷正確/實際個數，信度：判斷正確/判斷個數

表 17 即為刺激前 1 秒內，每 0.1 秒機率累積判斷的結果列表。與表 14 (第 61) 同樣為刺激前 1 秒，但只用 1 秒作機率分布判斷的結果比較，有用尾的效度提高了且信度不變，但不用尾的信度雖然提高，效度卻下降。這樣看來，用每 0.1 秒作累計機率的判斷，比起用 1 秒作為單位，對於有用尾的判斷的確提高了結果的準確性。對於不用尾類型的信度降低，觀察整體 13 個不用尾反應中，後者判斷出 10 個吻合實際的行為，雖然的確高於前者只判斷出 9 個，但因為不用

尾的資料數量較少，比起效度的提升幅度，信度的下降並沒有太大的差異。所以我們認為訊號以 0.1 秒做的機率累積判斷，比只用 1 秒做的判斷來的準確，可信程度也較高。

在確定了時間單位長度的大小，接著要討論的，是刺激前後哪一個時間範圍的訊號，與反應行為間的關聯有最明顯的特徵出現。換句話說，我們想要找到一個時間範圍，以此機率累積判斷法能夠做出最好的分類判斷結果。在表 18 中我們討論五種時間範圍，分別為 $[-1, 0]$, $[-0.5, 0]$, $[-0.5, 0.5]$, $[0, 0.5]$, $[0, 1]$ 。在這五種時間範圍，對全部資料點作機率累積判斷，列出整體的信度與效度。

表 18: 不同固定時間下，全體機率累積判斷結果比較

固定時間長度	判斷類型		時間 [-1, 0]	時間 [-0.5, 0]	時間 [-0.5, 0.5]	時間 [0, 0.5]	時間 [0, 1]
1 秒	有用尾	效度	87%	-	85%	-	78%
		信度	97%	-	96%	-	97%
	不用尾	效度	77%	-	62%	-	77%
		信度	37%	-	30%	-	26%
0.1 秒	有用尾	效度	92%	89%	88%	77%	76%
		信度	97%	96%	97%	96%	98%
	不用尾	效度	69%	62%	77%	69%	85%
		信度	45%	36%	40%	23%	26%

效度：判斷正確/實際個數，信度：判斷正確/判斷個數

從表 18 中整體信度與效度的比較，歸納出本節的幾點結論：

1. 標準縮小到每 0.1 秒所做的判斷明顯提升了信度和效度。可以確定，縮小單位的距離以及多次的機率累積，較能分辨出甩尾與不用尾的神經訊號反應。
2. 五種時間範圍分別為：刺激前 1 秒、刺激前 0.5 秒、刺激前 0.5 秒到刺激後 0.5 秒、刺激後 0.5 秒和刺激後 1 秒。從這五種時間範圍的判斷結果來看，

若單用刺激後的時間進行判斷，除了有甩尾的信度較高，其他的結果都沒那麼好。

3. 由於本節的討論著重於分辨出不用尾的反應，比較不用尾類型的判斷結果，雖然時間範圍 $[0, 1]$ 的效度最高，能夠判斷出最多的不用尾反應，但其效度太低，容易判斷錯誤。時間範圍 $[-0.5, 0.5]$ 的效度與信度都是第二高的，不論是判斷的效率或是判斷的正確度都不低，較符合我們的需求。所以我們認為，用刺激前後合併的時間範圍進行判斷，最能夠展現不用尾反應訊號的特徵。
4. 以 4.2 節的神經篩選條件，我們將篩後的神經元資料點，以上個結論的時間範圍 $[-0.5, 0.5]$ 做相同的機率累積判斷，得到表 19 的結果。因為資料一在篩選的過程中，其兩個神經元全部被列為不利神經元，所以此表反應類型的實際個數與原始數據並不相同。但我們仍可以透過信度與效度，比較篩後資料與全部資料的判斷差異。相較於全部資料的效度與信度，篩後資料中有甩尾的效度不變、信度提高到了 100%。而不用尾的效度提高到 100%、信度略降低為 32%。這樣的數據說明篩後神經元其訊號，對於反應行為的特徵更明顯，使得機率累積方法的判斷更準確。
5. 不論是用全部的數據、或是篩選後的數據，皆是用本身的數據作為標準來判斷自身的資料，得到的結果效度看來都很高。也就是說，正確地被判別出類型的事件，大都能達到全體數量的 66%。此方式的確能夠以本身作為標準，有效的判斷出訊號的甩尾反應類型。

表 19: 篩選後資料與全部資料的機率累積判斷結果比較

有甩尾					
資料來源	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
全部資料	118	115	130	88%	97%
篩後資料	95	95	108	88%	100%
不用尾					
資料來源	判斷個數	判斷正確	實際個數	效度	信度
全部資料	25	10	13	77%	40%
篩後資料	19	6	6	100%	32%

時間範圍 $[-0.5, 0.5]$ ；固定時間長度 0.1 秒

5.4 大小甩尾的機率累積判斷

我們在 5.1 與 5.2 節對訊號做的機率累積判斷，其判斷結果都只分為有甩尾與不用尾兩種反應行為。討論判斷的時間範圍選取，對於有甩尾與不用尾的訊號特徵，在包含刺激前與刺激後的時間範圍內做判斷最為明顯。本節對照上述的結果，想要觀察大甩尾與小甩尾在機率累積判斷的特徵。我們將反應行為是甩尾的刺激點暫時排除分析，對於剩下的有甩尾資料點，建構大甩尾與小甩尾的機率累積標準，再對有甩尾的刺激點做相同的機率累積判斷。表 20 是以不同的時間範圍，對有甩尾的資料點進行機率累積判斷，所得到的信度與效度數據列表。當中使用了兩種資料來源，分別是全部資料和篩選後資料，皆只取有甩尾的資料點作機率累積的判斷。

在兩個資料來源中，全部資料裡大甩尾反應的刺激數總共有 95 個，小甩尾有 35 個；篩選後資料裡大甩尾反應的刺激數總共有 79 個，小甩尾有 29 個。比較表 20 的效度和信度數據，做以下幾點討論：

表 20: 有用尾的全體資料與篩選後資料，大小甩尾的機率累積判斷結果比較

資料來源	判斷類型		時間	時間	時間	時間	時間
			[-1, 0]	[-0.5, 0]	[-0.5, 0.5]	[0, 0.5]	[0, 1]
全部資料	大甩尾	效度	94%	82%	95%	85%	96%
		信度	80%	80%	80%	84%	82%
	小甩尾	效度	37%	37%	34%	54%	43%
		信度	68%	62%	71%	58%	79%
篩後資料	大甩尾	效度	87%	72%	81%	78%	89%
		信度	90%	88%	91%	83%	90%
	小甩尾	效度	72%	72%	79%	55%	72%
		信度	68%	49%	61%	48%	70%

固定時間長度 0.1 秒

1. 討論全部資料的判斷結果，大甩尾的效度與信度皆很高，但小甩尾的效度在刺激前的時間範圍內都偏低，信度也不如大甩尾好。我們判斷小甩尾與大甩尾在刺激前的訊號差異，不足以分辨出兩種訊號。在時間範圍 [-0.5, 0.5] 判斷的結果，小甩尾的信度提高了，但效度卻是五種範圍中最低的，表示判斷為小甩尾的數量減少了，雖然降低了誤判的情形，但並沒有提升判斷的效率。用刺激後的時間範圍，反而使得判斷的效度提升。總觀全部資料的判斷數據，大甩尾與小甩尾的機率累積判斷，在 [0, 1] 的時間範圍內，其信度與效度都較好。這樣的結果，與 5.2 節對有用尾與不用尾反應的判斷最佳時間範圍並不相同。表示刺激前大小甩尾的訊號差異不大，而不用尾的訊號較不同；至於刺激後的訊號，三類型都有不同的特徵。
2. 對於篩選後資料的判斷結果，同樣是在刺激後 1 秒的時間範圍，做的判斷效度與信度都較好。比較兩種資料來源，我們發現篩選後資料與全部資料的小甩尾數據，其判斷的效度在篩選後資料中提升很多。這可以表示，篩選後資料的大小甩尾次數分布差異較大，以至於能夠判斷出較多正確的小

甩尾資料點。也再次說明了不利神經元的刺激訊號，

對於反應行爲的特徵性的確較不明顯。

3. 我們在第三章的結論知道，神經元的訊號在刺激後 0.3 ~ 0.5 秒，會產生較大量的動作電位，也就是興奮性達到最高的時候。並且我們也判斷，大小甩尾在此時段的訊號量並不相同。但從此機率累積的結果，發現若只觀察 [0,0.5] 這段時間範圍的訊號，其分類並沒有比時間範圍 [0,1] 的判斷好。表示大小甩尾刺激後 [0,0.5] 時間內的次數分布雖然已經有差異，但 [0.5,1] 時間內神經元訊號恢復的狀態差異，對大小甩尾的判別也很重要。所以用刺激後 [0,1] 的時間觀察，更能分辨出兩者訊號的特徵。此結論也可以從圖 31 (第 46 頁) 觀察中得到印証。但用 [0,1] 作為判斷的時間範圍，並不能對於實際訊號做出即時的判斷，因為刺激後 1 秒鐘反應行爲就已經結束了。也就是說，我們以此時間範圍所做的判斷，並不能在實際反應發生時，就由訊號及時做出行爲類型的判斷。用此時間範圍的判斷，只能用來驗證判斷與實際反應行爲的正確性。

第 6 章 結論與建議

本論文的研究目的是想要了解，腦部特定區域探測到的多個感覺神經元訊號，與刺激後反應行為間的關聯。經過前幾章的分析與討論，我們對於神經訊號與反應行為的關聯，有了進一步的了解。在此章節統整本研究的結論、研究過程中的發現，以及對未來相關研究的建議。

第一節我們特別說明本論文所使用的數據處理，針對其優缺點提供數據處理的建議與改善。第二節對於本論文的研究目標，列出結論和發現，並說明實際訊號分析上的困難和問題。最後一節提出一個在本研究中發現的特殊現象，因為不在本論文研究的範圍內，所以紀錄於此。

6.1 訊號處理的說明與建議

在本研究中，我們想要探討訊號原始的數據形式，所以訊號數據除了點過程的轉譯外，並沒有作額外的處理。在第三章點過程的討論中，我們對動作電位的發生點與樣式作分析，這部分的確就如同原始資料，並不能做額外的處理。但在第四章之後，我們將訊號以固定的單位時間分割，統計其單位區間內的發生次數，以此資料形式來分析訊號。在討論的過程中發現，即使對象為同一個生物，其每個神經元在常態下的平均訊號發生次數也並不一致，從 3.3.2 小節的表 8 (第 27 頁) 可以看到此現象。

因為我們假設，感覺神經在刺激前的訊號發生樣式，與刺激後的反應是有關聯的，所以希望能夠觀察原始資料的樣式，而沒有做額外的訊號數據處理。但在反應行為分類時，卻會因為資料點的基本發生量不同，而影響了分類的準確性。

所以我們建議，當以訊號以單位時間分割後的數據進入分類的程序，可以藉由 Z 轉換達到訊號的標準化。這樣的處理，能夠使得訊號改變的基準來自常態的平均值，以常態標準差的倍率表示變化。

但 Z 轉換的缺點，是訊號的樣式被改變，較無法看出原始數據的特徵。所以對於訊號在固定時間的發生次數數據，建議以扣除平均值但不除以標準差的方式，將數據以常態的平均值最為基準，但保留訊號原始的樣式。

6.2 研究結論與建議

對於神經動作電位與行為反應的關聯，在本研究透過對訊號點過程的討論、固定單位時間的離散資料統計，我們整理出以下幾點結論：

1. 神經元訊號大部份為非穩定的卜瓦松點過程，且基本的活性差異很大。
2. 對老鼠尾巴施以一固定熱刺激，造成感覺神經的訊號反應，在 0.3 ~ 0.5 秒間神經產生的興奮性最為明顯，發生密集的動作電位。此現象在有甩尾 (大甩尾、小甩尾) 的資料點很明顯，但在不用尾的資料點中卻不顯著。
3. 神經元對於刺激所產生訊號興奮性後，大甩尾資料點的訊號恢復常態的速度，比小甩尾來的快。小甩尾資料點在刺激後，維持密集動作電位的時間較長。不用尾反應的資料點，因為其興奮性就不如有甩尾來的明顯，所以其訊號回復到常態情形也較不明顯。
4. 刺激前的訊號差異，的確能夠分辨出有甩尾與不用尾的行為類型。而大小甩尾在刺激前的差異，就不那麼明顯。我們認為在相同強度的刺激下，會產生不同的行為反應，感覺神經訊號在刺激前的狀態的確是有影響的。

5. 神經訊號的研究，其基礎仍是建立在生物訊號紀錄以及神經元分類的優劣上。雖然在數據取得的實驗過程中，已經盡可能避免了其他外在因素的干擾，但感覺神經並非直接控制生物的行爲動作，所以在感覺神經與動作神經之間，仍可能有其他的訊號傳遞造成影響，這也就是此分析上的不確定性。

表 21: 機率模型不包含本身資料的機率累積判斷節果

判斷類型		資料四	資料五	資料六
有用尾	判斷個數	23	10	30
	正確個數	19	10	28
	實際個數	19	20	28
不用尾	判斷個數	0	10	0
	正確個數	0	0	0
	實際個數	4	0	2

固定時間長度 0.1 秒，判斷的時間範圍為 $[-0.5, 0.5]$ 。

在第五章所討論的機率累積判斷法，對真實數據的執行有以下幾點說明與建議：

1. 我們發現有用尾與不用尾的訊號，在刺激前的確有明顯的差異，所以選取判斷的時間範圍在 $[-0.5, 0.5]$ 的結果是最好的。但大小甩尾的差異在刺激前就不是這麼明顯，選取的判斷時間範圍以 $[0, 1]$ 為最佳的結果。所以我們認為，刺激前的訊號差異在於甩尾的發生有無，而刺激後的訊號興奮性則影響甩尾動作的大小。
2. 在第五章所使用的機率累積判斷模型，皆來自判斷資料本身的數據。我們比較表 21 中的判斷機率模型，是來自判斷資料以外的資料數據。也就是說，判斷資料四所使用的機率分布模型，是來自資料一、二、三、五、六的數據所建構。我們可以看到表 21 中，資料四及資料六都無法判斷出不用尾

的資料點，而資料五還誤判了 10 筆的不用尾反應，判斷結果非常不好。這即說明了，此機率模型宜包含判斷對象的自身統計。所以我們建議在下一階段，對於訊號與行為的判斷演算法，宜僅用本身的統計資料建構機率統計模型，並配合 *adaptive* 想法進行訊號的判斷分類。

3. 根據上一點的說明，也說明了每隻老鼠其神經元的基本活性並不相同，所以對於多隻老鼠所建構出用來判斷的機率模型，套用在任意新的訊號資料上，所得到的結果並不好。但若機率模型經過自身數據的參與或學習後，即能提升其判斷的正確性；所以演算法針對個別資料的學習，也就是此研究下一階段的重要目標。

6.3 特殊現象

最後在本節，特別說明我們在數據分析過程中發現的一個現象：

圖 41 是刺激前後三秒的發生次數趨勢圖，其分析的方式來自 4.1.3 小節。圖 42 是將圖 41 中三類的資料合併統計，並且標記誤差範圍繪製成的 *error bar* 圖。我們發現在原點 (刺激點) 前 $-2 \sim 0$ 區間的訊號量對照 $-3 \leq x \leq -2$ 的部份，有降低的趨勢。再者，由黑色虛線，也就是常態下 0.1 秒的發生次數期望值，比較刺激前後總共六秒的期望值趨勢，發現 $-2 \leq x \leq 0$ 間的三類趨勢線皆低於黑色虛線，除了不用尾的趨勢線較不明顯，另兩者的趨勢線明顯從 $x = -2$ 開始下降，到 $x = 0$ 開始劇烈上升，直到 $x = 1$ 之後才回復到接近 $x = -2$ 前的訊號量。

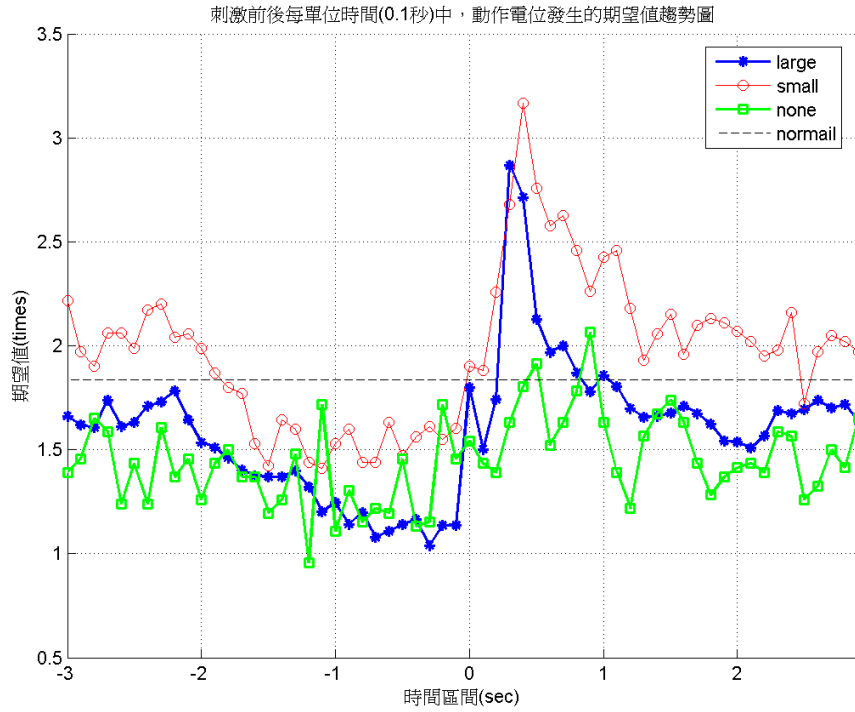
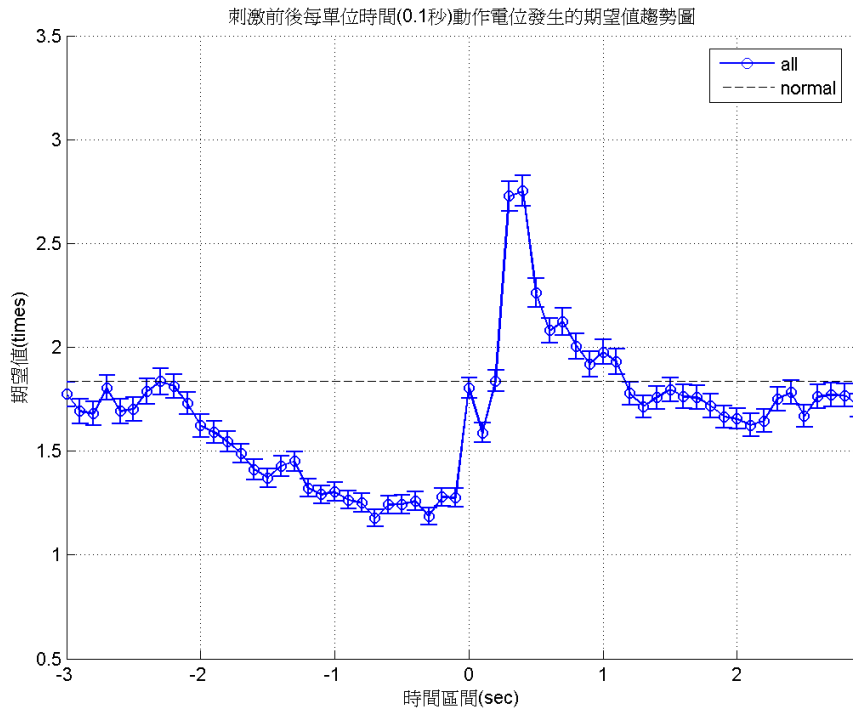


圖 41: 刺激前後三秒，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值趨勢圖



$error\ bar$ 為 $\pm \frac{std}{\sqrt{n}}$ ， $n = 598$ 為樣本個數。

圖 42: 刺激前後三秒，每 0.1 秒的動作電位發生次數期望值 $error\ bar$ 圖

若我們假設訊號的發生次數偏低時，老鼠的狀態是呈現較安靜或穩定的現象，那麼對於這個現象，是否表示我們在對老鼠施以刺激時，已經造成老鼠特殊的情緒？或是實驗人員在對老鼠施以刺激所挑選的狀態，皆是在此訊號狀態下，才會造成訊號有此統一的現象？我們在本論文並不能解釋說明。

參考文獻

- [1] Emery N Brown, Robert E Kass & Partha P Mitra. ” *Multiple neural spike train data analysis: state-of-the-art and future challenges.*”
NATURE NEUROSCIENCE v7. n.5, MAY 2004.
- [2] D.J. Daley, D.Vere-Jones. ” *An Introduction to the Theory of Point Processes, v.1. Elementary theory and method, 2nd ed.*”
Springer-Verlag, New York, 2003 .PP.19 ~ 34
- [3] 王錫崗等譯，”人體生理學”，新文京開發出版股份有限公司，2004。頁
130~191。
- [4] 吳忠武譯，”高等統計學”，台灣培生教育出版股份有限公司，2003。頁
181~225。
- [5] 吳惠稜，”神經元電位訊號雜訊之組成分析”，國立中央大學，碩士論文，
2008。

附錄

本研究的動作電位實驗數據，來自國立宜蘭大學生物機電學系蔡孟利教授提供。神經元個數與個別資料的刺激數量在本文第 2.3 節已列表說明 (表 1, 第 9 頁)，表 22 列出訊號資料的檔案來源，以及神經元在全部實驗紀錄中的動作電位發生數量。表 23 為本論文中的分析資料樣本數量，分別列出所有資料、3 L 資料和篩後資料中的樣本數量。

表 22: 訊號資料的檔案來源

資料編號	檔案來源	解析度	紀錄時間總長
資料一	L0317_cont_ch1-emg.nex	小數點下六位	454.65125
資料二	L0418_cont_ch2.3-emg.nex	小數點下六位	367.32565
資料三	L0809_cont_ch2-6-emg.nex	小數點下六位	346.51785
資料四	L0812_cont_ch2-6-emg.nex	小數點下六位	333.0337
資料五	L0908_cont_ch2-5-emg.nex	小數點下六位	318.02445
資料六	L1224_cont_ch3_4.6-emg.nex	小數點下六位	468.1296

神經元在全部實驗紀錄中的動作電位發生數量

資料編號	unit-1	unit-2	unit-3	unit-4	unit-5	unit-6	unit-7
資料一	5895	7028	-	-	-	-	-
資料二	1915	7957	-	-	-	-	-
資料三	4012	2738	2699	10130	1360	-	-
資料四	5071	4658	2817	1162	2895	3555	-
資料五	5894	342	4265	3473	9157	1854	1983
資料六	31276	6668	6338	24611	-	-	-

表 23: 不同資料來源的樣本個數

	資料樣本數			
	大甩尾	小甩尾	不用尾	總數
所有資料	408	144	46	598
3 L 資料	158	112	32	302
篩後資料	278	85	26	389

運用在 3.3 小節估計神經元平均發生次數的方法，以連續的 *moving window* 估計出平均發生次數的連續變化。每隔 0.1 秒估計一個平均發生次數，其估計以前後 0.5 秒鐘為範圍，在這 1 秒內以 0.01 秒為單位的平均發生次數 (λ 值)。另外標出刺激的時間位置，以不同的甩尾反應類型做標記：方形實心標記為大甩尾反應的刺激，圓形空心標記為小甩尾反應的刺激，圓形實心標記為不用尾反應的刺激。圖 43 ~ 55 為所以有的神經元的作圖，表現出神經元訊號概略的發生次數變化。因圖形上標記時間的位置有限，所以標記的刺激時間皆取小數下兩位。另外，圖 50 ~ 53 中的資料五，在時間 166.279 ~ 220.176 秒紀錄中斷，此段並沒有資料數據，圖形中以標記區隔出。

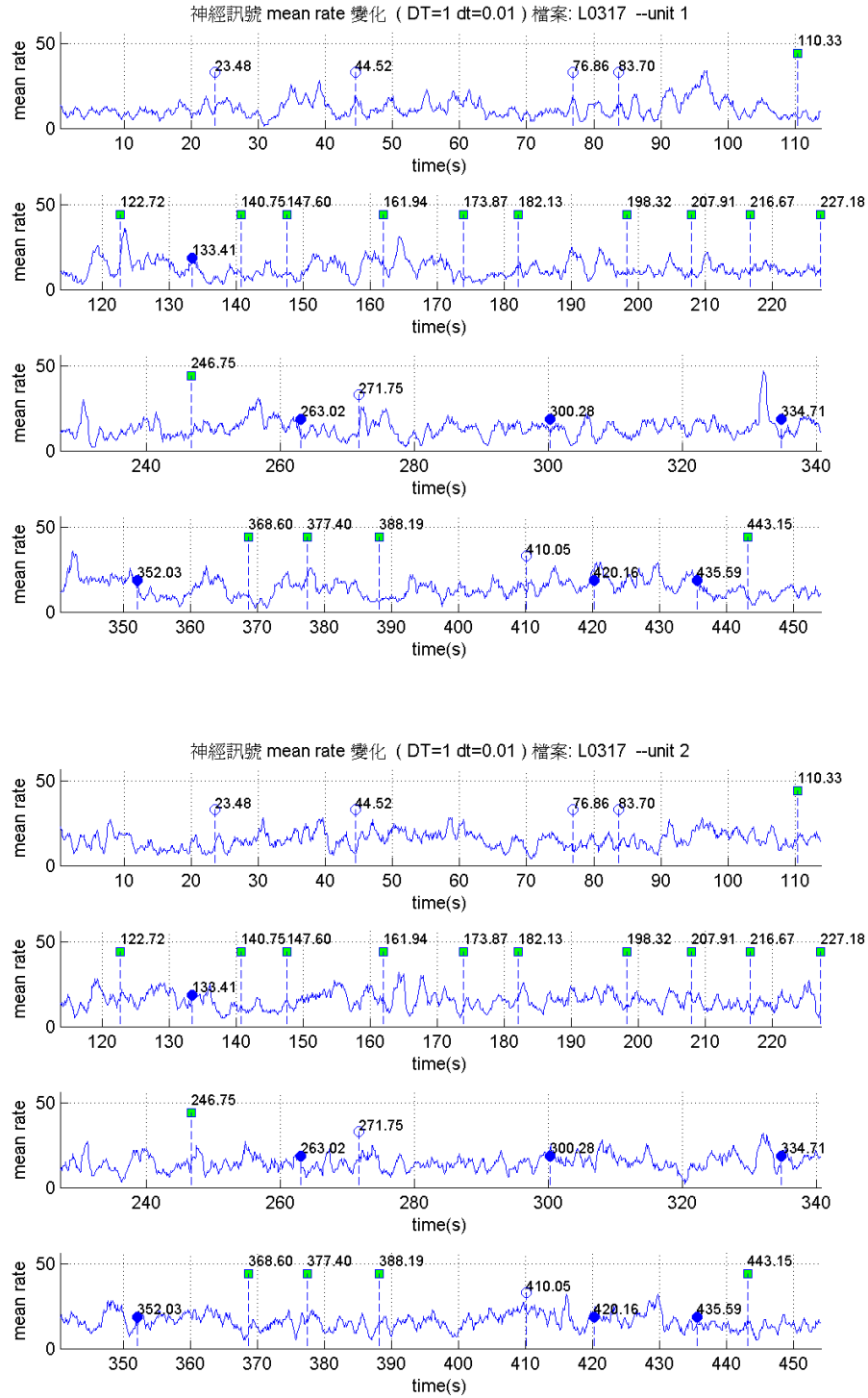


圖 43: 神經元訊號發生次數變化圖，資料一 (unit 1, unit 2)

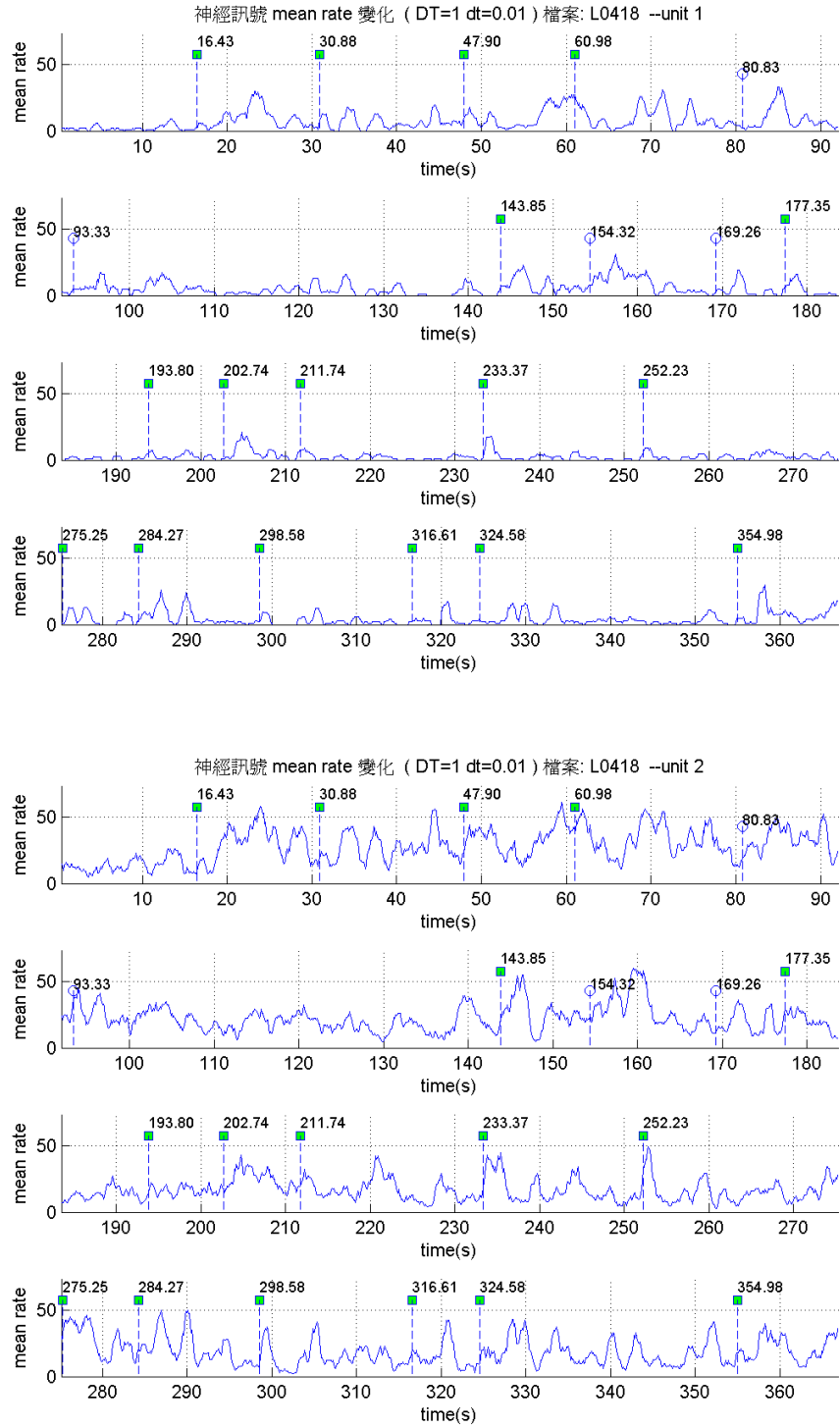


圖 44: 神經元訊號發生次數變化圖，資料二 (unit 1, unit 2)

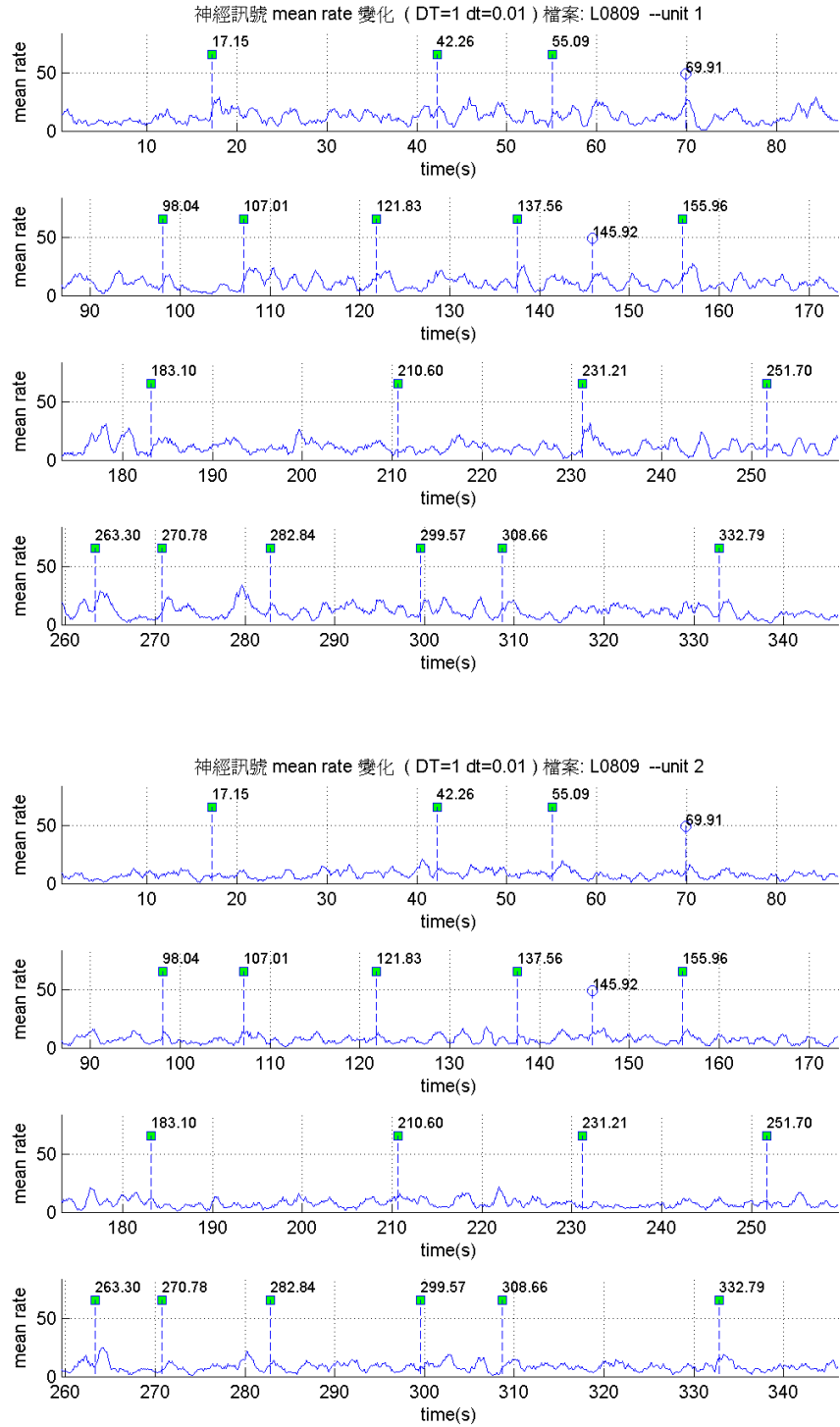


圖 45: 神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 1, unit 2)

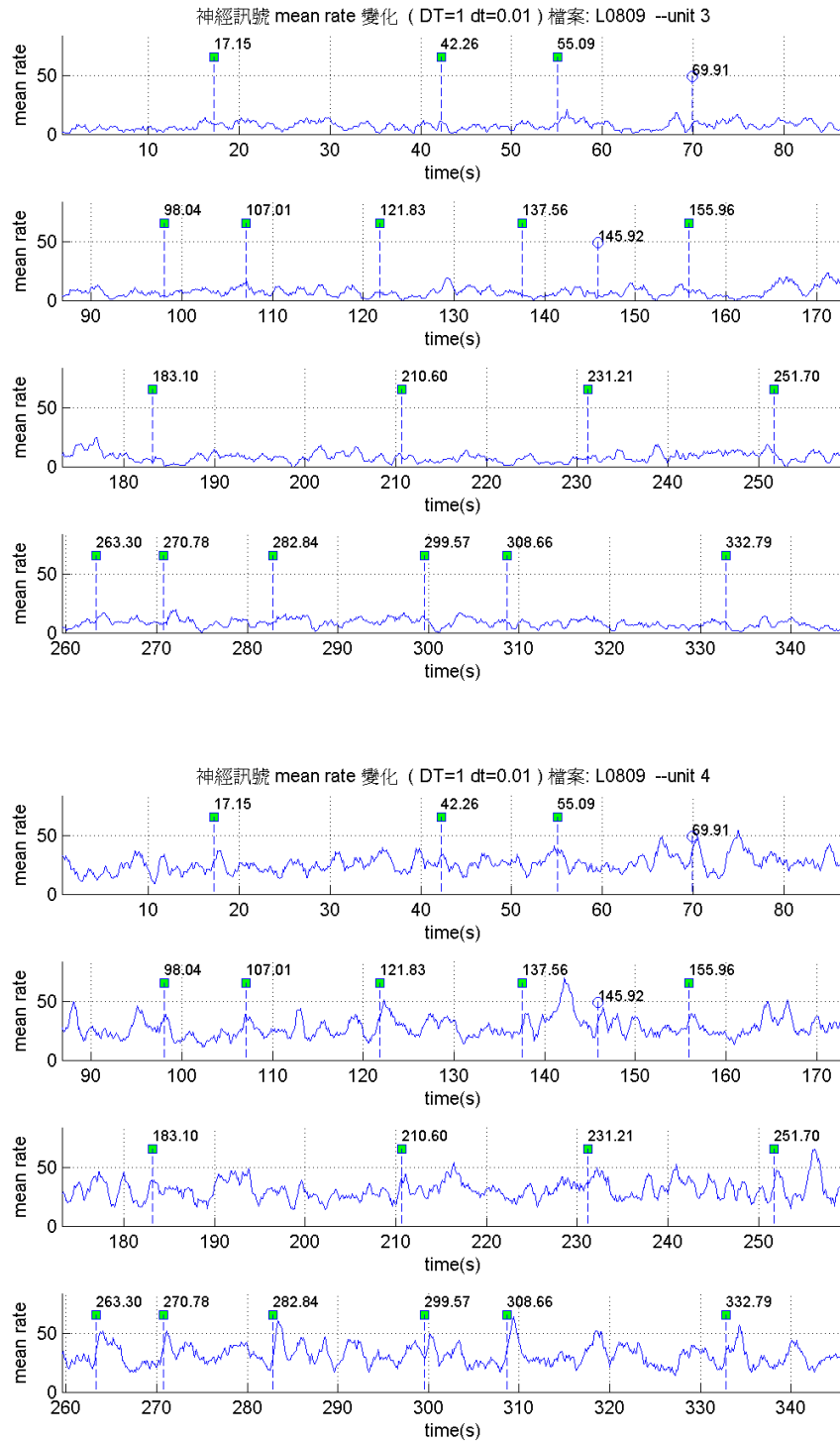


圖 46: 神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 3, unit 4)

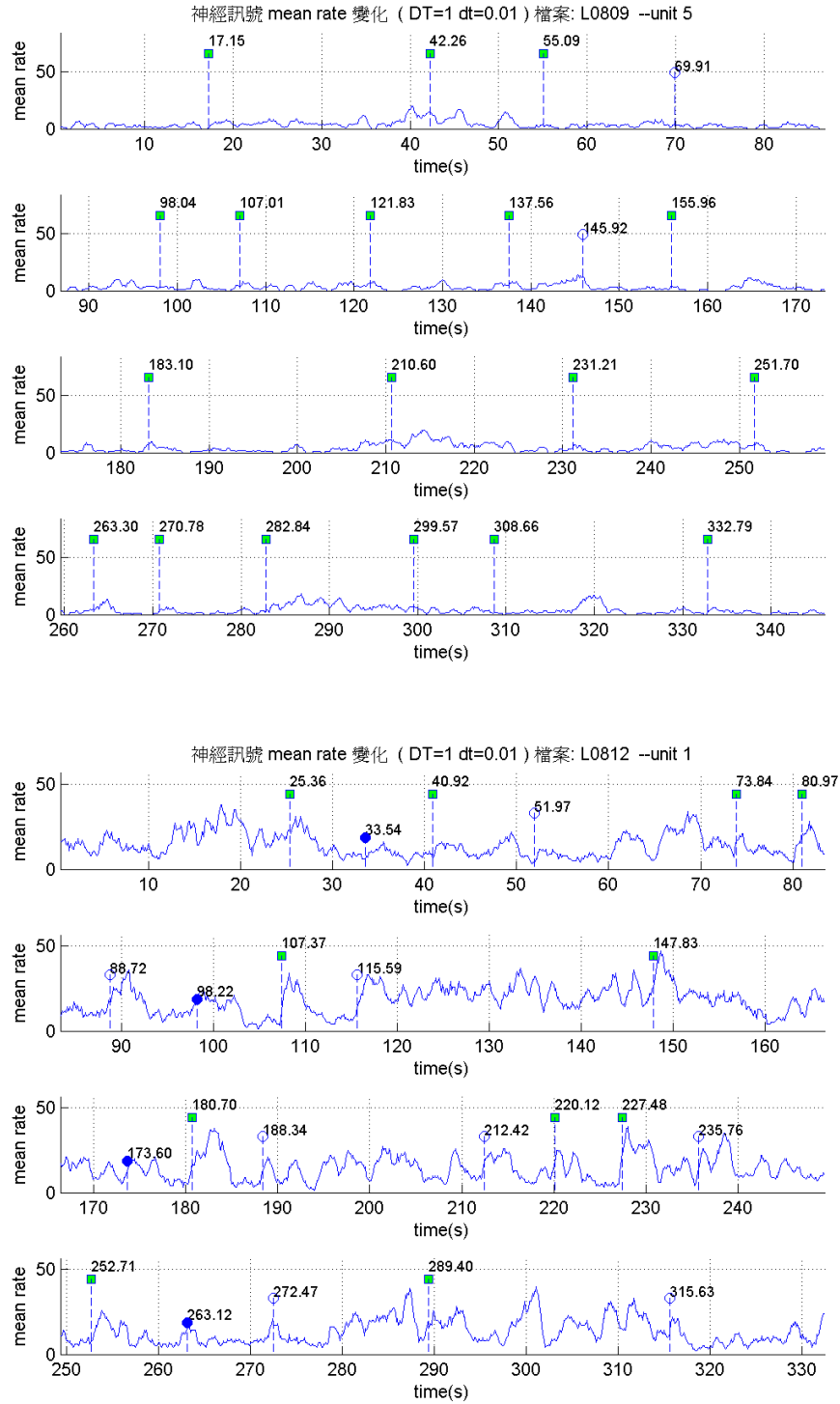


圖 47: 神經元訊號發生次數變化圖，資料三 (unit 5)、資料四 (unit 1)

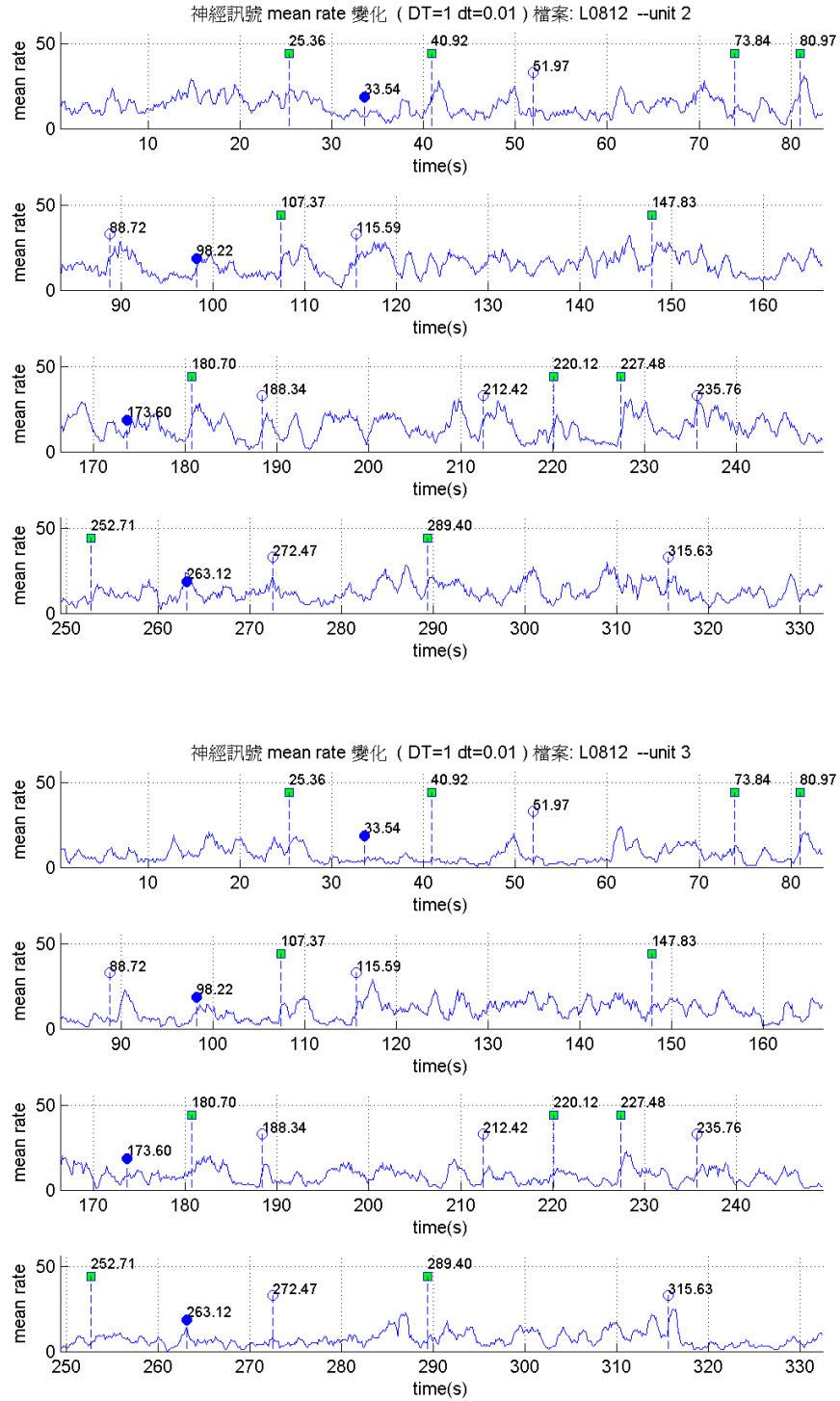


圖 48: 神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 2, unit 3)

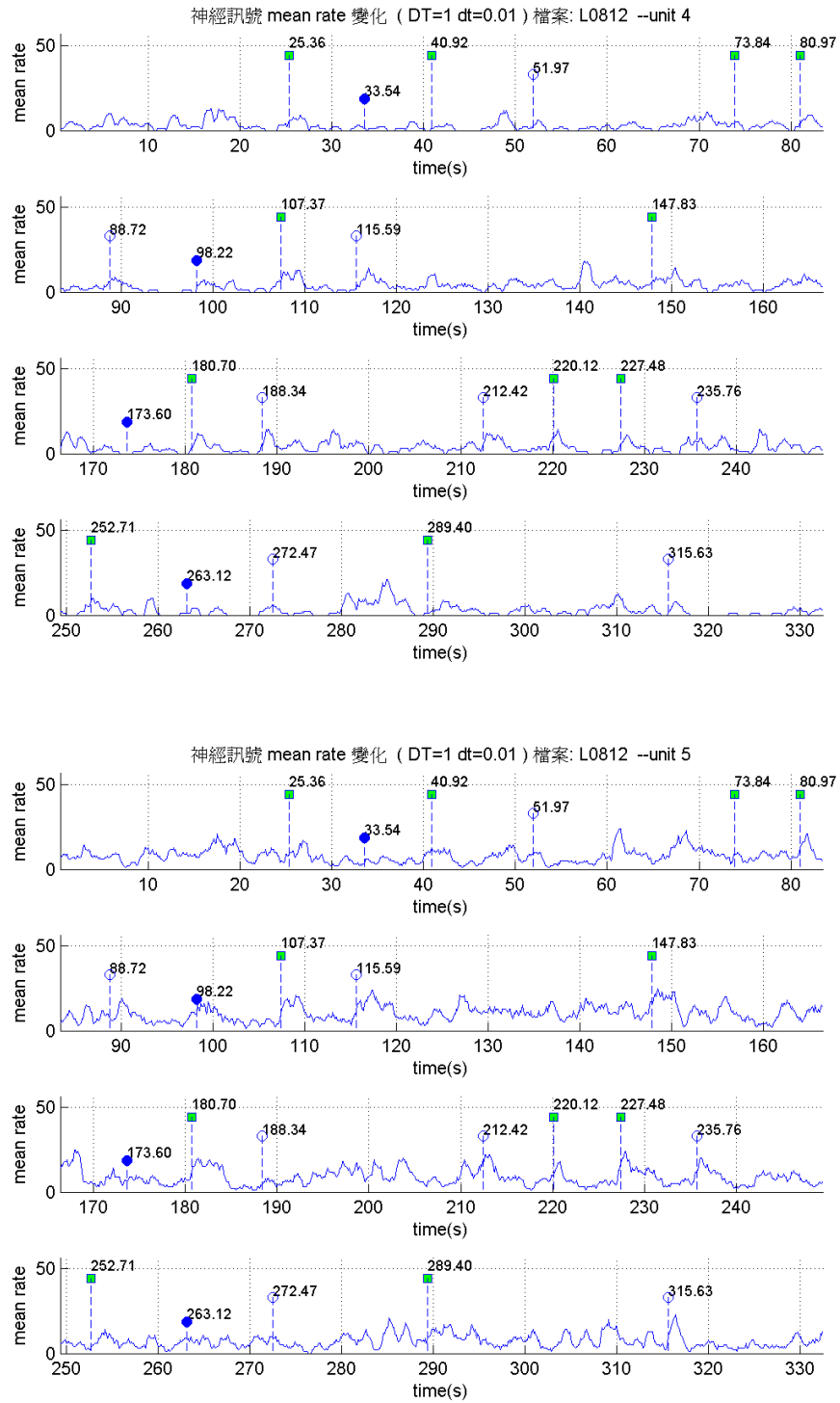


圖 49: 神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 4, unit 5)

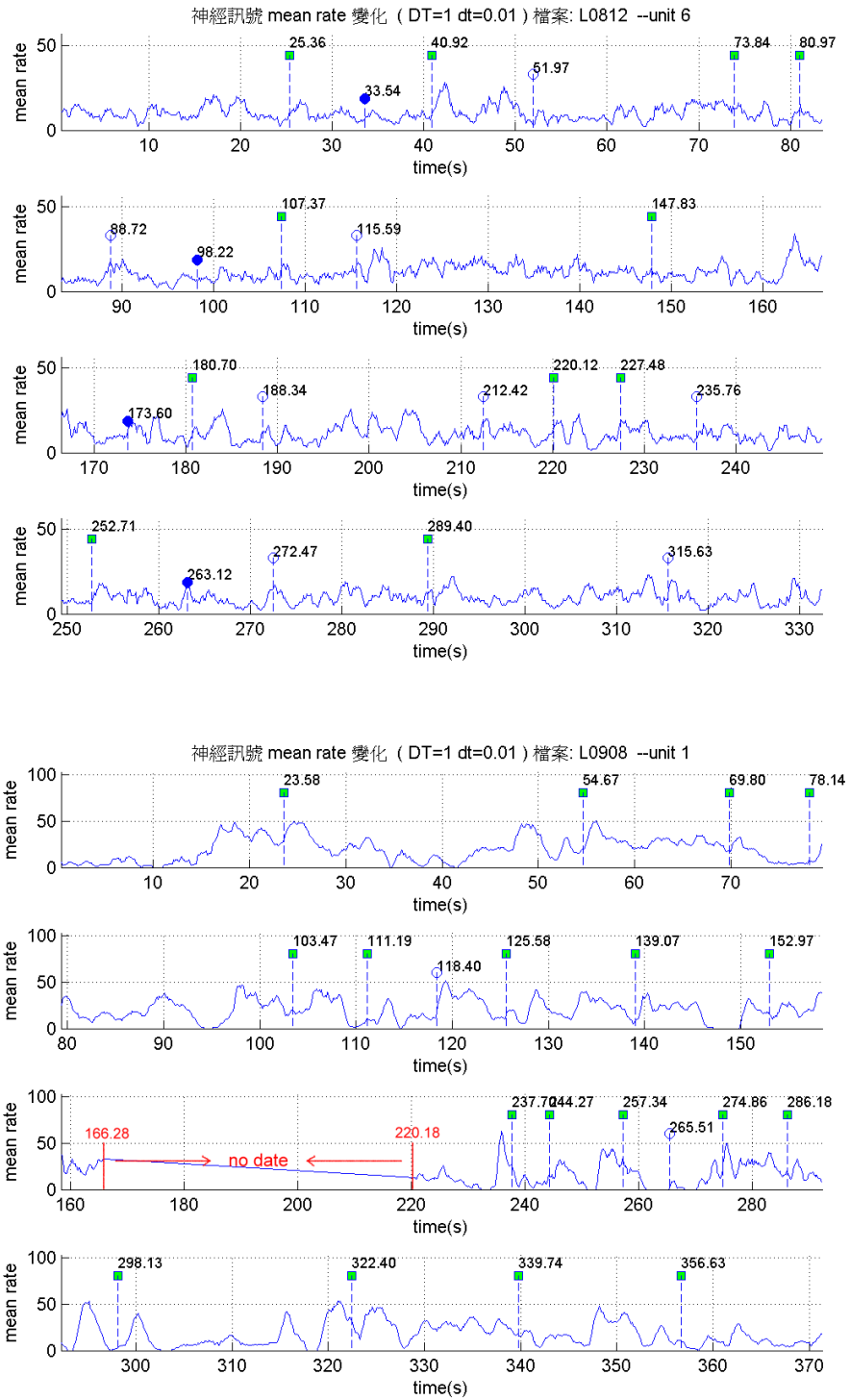


圖 50: 神經元訊號發生次數變化圖，資料四 (unit 6)、資料五 (unit 1)

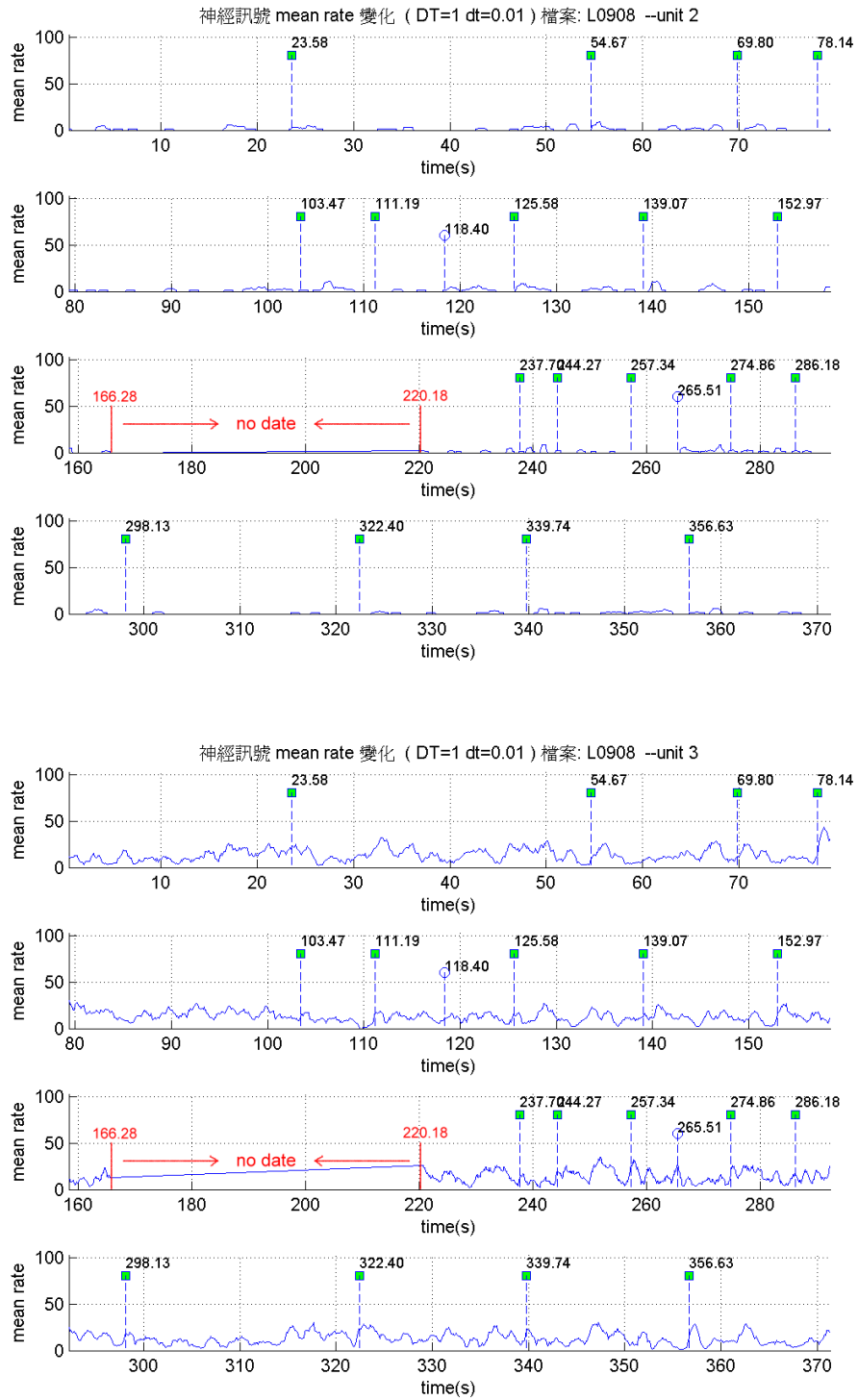


圖 51: 神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 2, unit 3)

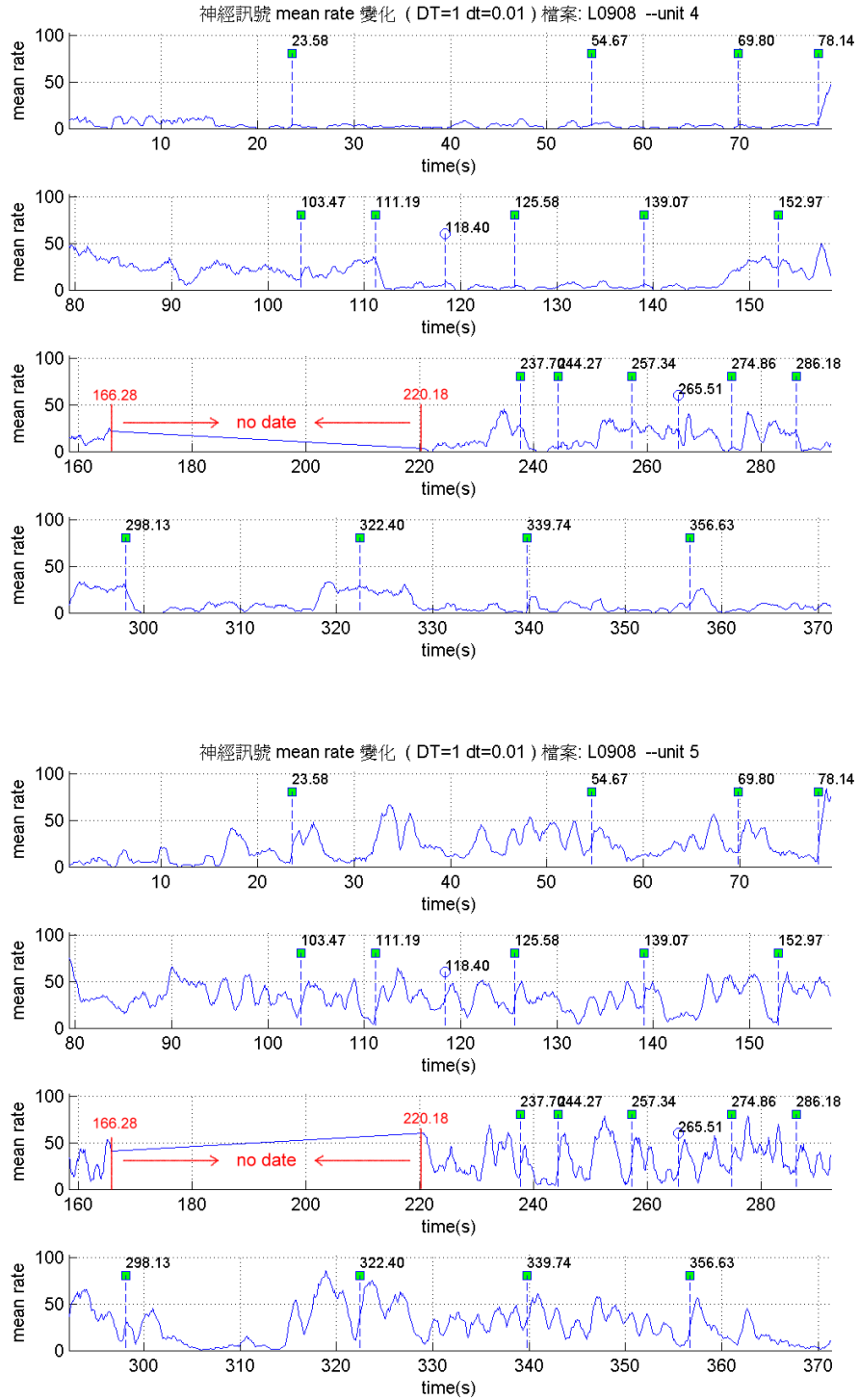


圖 52: 神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 4, unit 5)

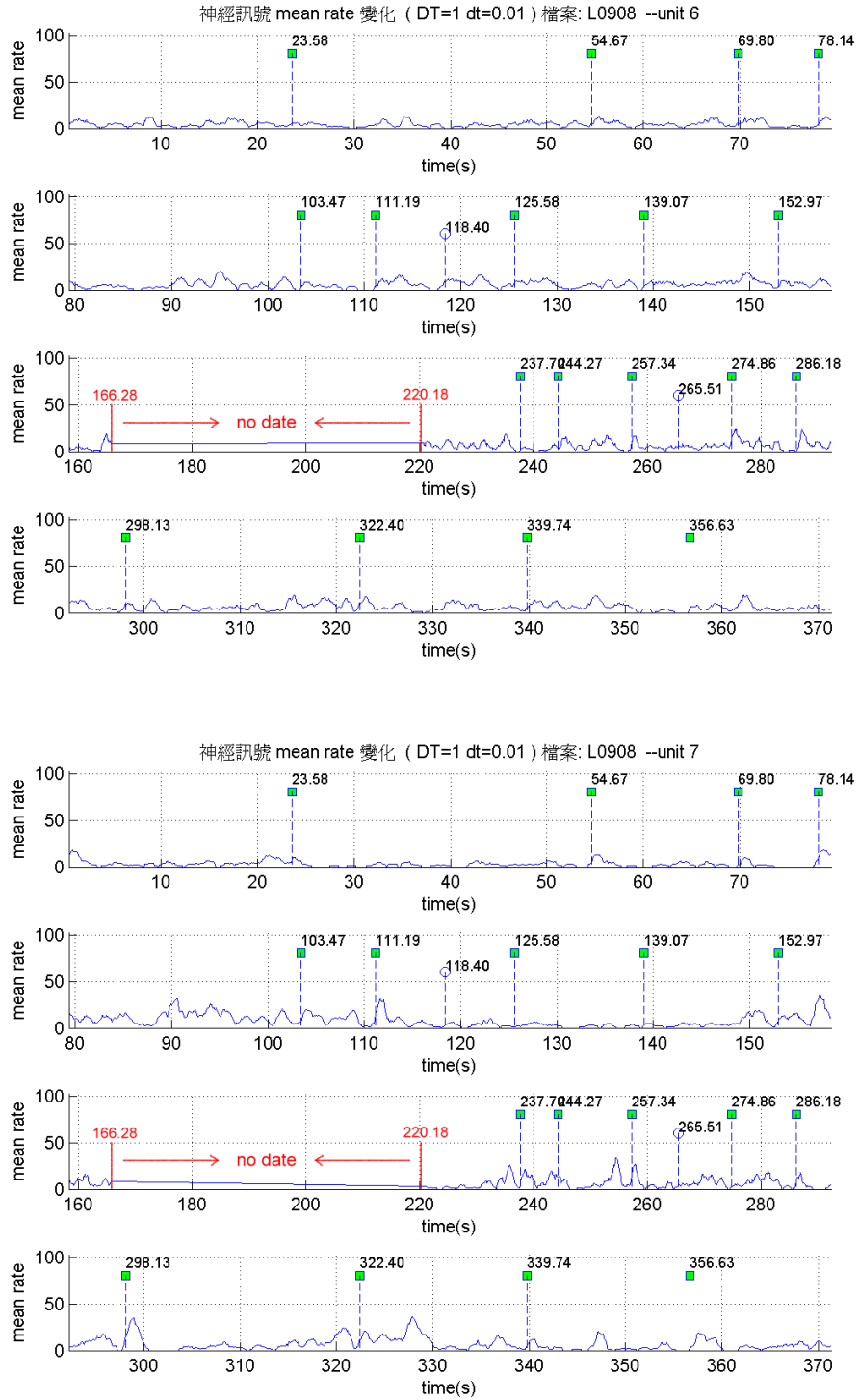


圖 53: 神經元訊號發生次數變化圖，資料五 (unit 6, unit 7)

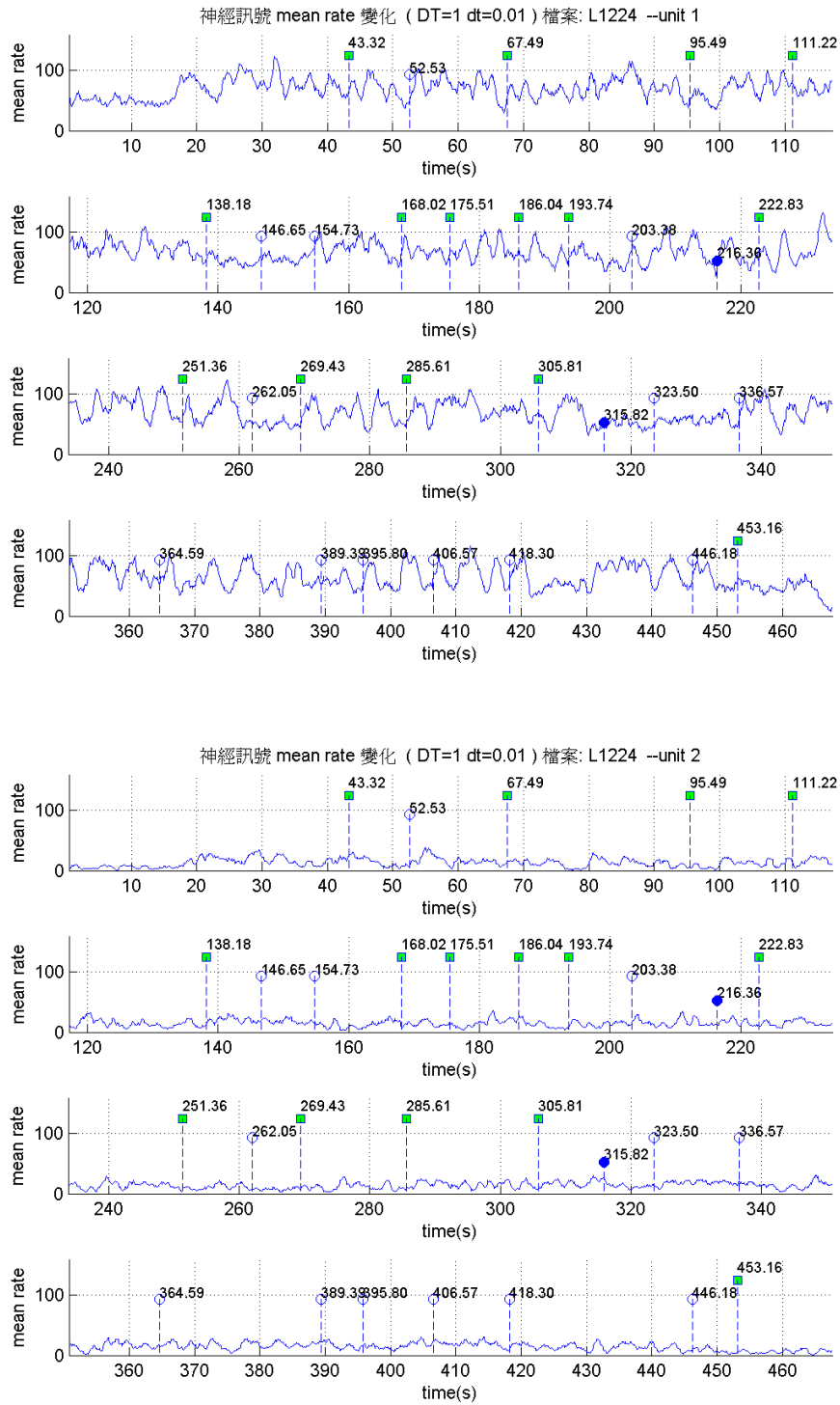


圖 54: 神經元訊號發生次數變化圖，資料六 (unit 1, unit 2)

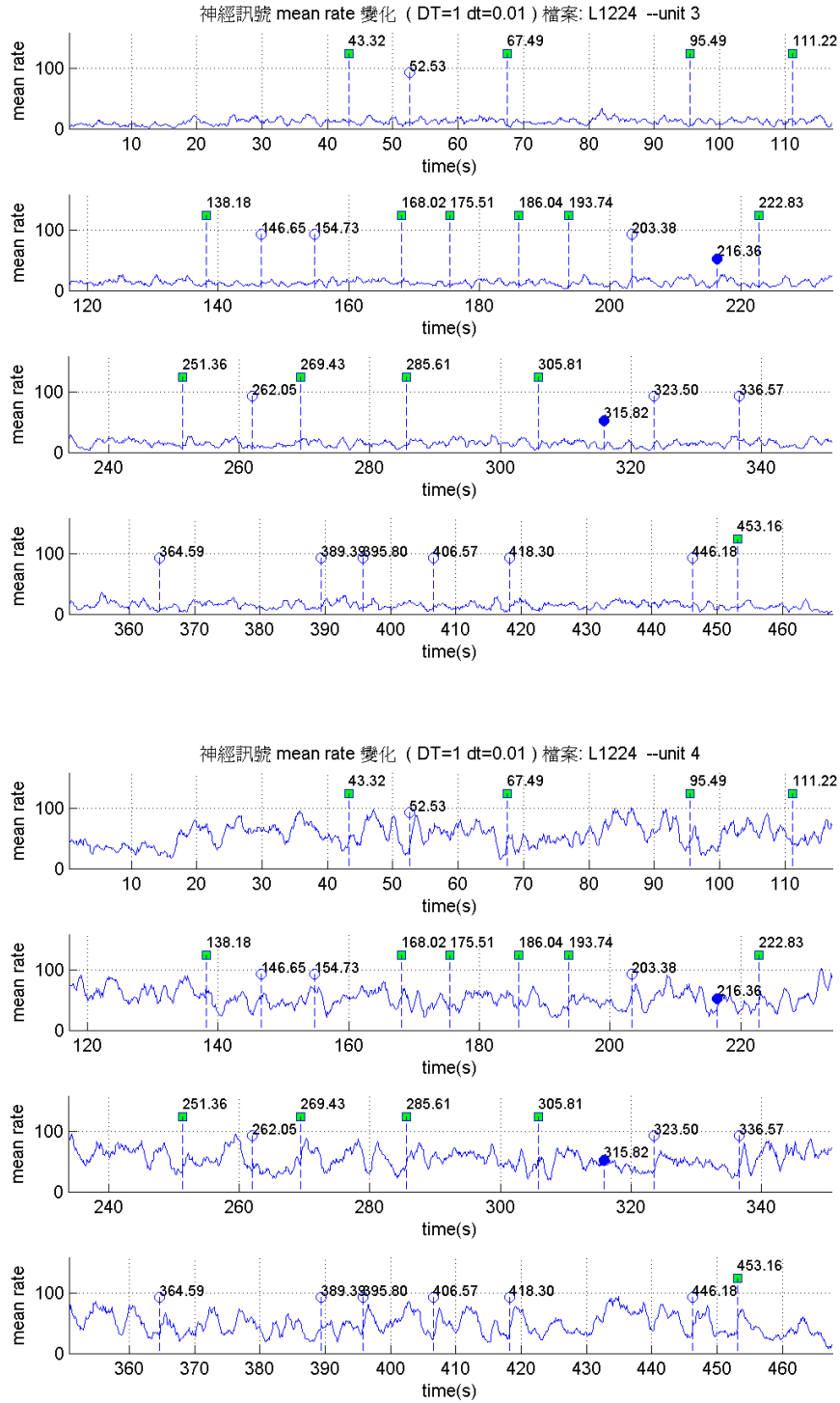


圖 55: 神經元訊號發生次數變化圖，資料六 (unit 3, unit 4)