

# 科技部補助專題研究計畫成果報告

## 期末報告

### 基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇與大腦認知負荷之研究(第3年)

計畫類別：個別型計畫  
計畫編號：NSC 99-2511-S-004-001-MY3  
執行期間：101年08月01日至103年07月31日  
執行單位：國立政治大學心理學系

計畫主持人：顏乃欣  
共同主持人：郭文瑞  
計畫參與人員：碩士級-專任助理人員：吳佳芸  
碩士級-專任助理人員：李宛霖  
碩士級-專任助理人員：林家源  
碩士級-專任助理人員：李佩芳  
碩士級-專任助理人員：楊宗翰  
碩士班研究生-兼任助理人員：張元怡  
碩士班研究生-兼任助理人員：高常豪  
碩士班研究生-兼任助理人員：林軒宇  
碩士班研究生-兼任助理人員：謝瑋婷  
碩士班研究生-兼任助理人員：張李竹  
碩士班研究生-兼任助理人員：何華府  
博士班研究生-兼任助理人員：王智賢

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：

1. 公開資訊：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢
2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否
3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考：否

中 華 民 國 103 年 11 月 03 日

中文摘要：本計畫之研究目的在於探究運算能力高低不同者在乘法運算時的策略選擇與大腦認知負荷情形。根據研究目的本計畫分別進行了多個行為實驗探究乘法能力與工作記憶及數感的關係，並設計 fMRI 實驗探討數學運算上題型變化上的所造成的認知負荷與大腦活動之關係。第一年進行刺激材料收集與測試，並探究了大學生乘法表現與工作記憶及數感之間的關係，同時也探討了乘法表現高低不同能力者在不同題型與難度上策略之差異，以及他們彼此在工作記憶能力與數感的差異。本研究將第一年度所篩選出來的刺激材料設計成眼動實驗，利用對認知負荷敏感的眼動指標—瞳孔變化，作為乘法刺激材料的認知負荷穩定度檢查，以作為後續 fMRI 實驗中的刺激材料。乘法心算中不同題型之認知負荷從 fMRI 實驗中發現，在較高負荷的題型中相對於較低負荷的題型中，主要活化差異表現在左右腦之 medial frontal gyrus、superior parietal lobule 以及 inferior parietal lobule 區域，以及左腦之 cingulate gyrus 區域以及 left parietal lobe 的 precuneus 區域，參與者表現出在這些區域的活化程度較高。此結果支持 fronto-parietal cortical network 在數學計算中扮演重要角色。

中文關鍵詞：認知負荷、乘法表現、策略、瞳孔變化、功能性磁共振影

英文摘要：The goal of this project is to examine the effect of cognitive loading and its brain activity when subjects with different computational ability work on complex multiplicative problems in order to understand the relationship between computational ability and mathematical performance. We designed several behavior experiments to find out the appropriate stimuli used for further fMRI studies, and tested some debates about the relationship between the essential capacities and multiplication in the first year. Because the pupil dilation is sensitive for the mental loading, in the second year, we tested the stimuli with pupil diameter to make sure those stimuli used in fMRI studies were stable. We then designed a fMRI experiment to examine the effect of loading and its brain activation. It was found that bilateral medial frontal gyrus, superior parietal lobule, inferior parietal lobule, and left cingulate gyrus, left precuneus were more activated in high mental loading problems. These findings

showed that fronto-parietal cortical network plays an important role in mathematical cognition.

英文關鍵詞： Mental Loading , Multiplication Performance, Strategies, Pupil Dilation, fMRI

# 基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇 與大腦認知負荷之研究

## The study of multiplication strategy and the cognitive loading for participants with different level of arithmetical ability

( NSC-99-2511-S-004-001-MY3 )

### 中文摘要

本計畫之研究目的在於探究運算能力高低不同者在乘法運算時的策略選擇與大腦認知負荷情形。根據研究目的本計畫分別進行了多個行為實驗探究乘法能力與工作記憶及數感的關係，並設計 fMRI 實驗探討數學運算上題型變化上的所造成的認知負荷與大腦活動之關係。第一年進行刺激材料收集與測試，並探究了大學生乘法表現與工作記憶及數感之間的關係，同時也探討了乘法表現高低不同能力者在不同題型與難度上策略之差異，以及他們彼此在工作記憶能力與數感的差異。本研究將第一年度所篩選出來的刺激材料設計成眼動實驗，利用對認知負荷敏感的眼動指標—瞳孔變化，作為乘法刺激材料的認知負荷穩定度檢查，以作為後續 fMRI 實驗中的刺激材料。乘法心算中不同題型之認知負荷從 fMRI 實驗中發現，在較高負荷的題型中相對於較低負荷的題型中，主要活化差異表現在左右腦之 medial frontal gyrus、superior parietal lobule 以及 inferior parietal lobule 區域，以及左腦之 cingulate gyrus 區域以及 left parietal lobe 的 precuneus 區域，參與者表現出在這些區域的活化程度較高。此結果支持 fronto-parietal cortical network 在數學計算中扮演重要角色。

中文關鍵字：認知負荷、乘法表現、策略、瞳孔變化、功能性磁振造影

## Abstract

The goal of this project is to examine the effect of cognitive loading and its brain activity when subjects with different computational ability work on complex multiplicative problems in order to understand the relationship between computational ability and mathematical performance. We designed several behavior experiments to find out the appropriate stimuli used for further fMRI studies, and tested some debates about the relationship between the essential capacities and multiplication in the first year. Because the pupil dilation is sensitive for the mental loading, in the second year, we tested the stimuli with pupil diameter to make sure those stimuli used in fMRI studies were stable. We then designed a fMRI experiment to examine the effect of loading and its brain activation. It was found that bilateral medial frontal gyrus, superior parietal lobule, inferior parietal lobule, and left cingulate gyrus, left precuneus were more activated in high mental loading problems. These findings showed that fronto-parietal cortical network plays an important role in mathematical cognition.

Keywords: Mental Loading , Multiplication Performance, Strategies, Pupil Dilation, fMRI

## 目錄

中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、前言與研究目的 .....	7
貳、文獻探討.....	8
工作記憶容量與數學成就的關係.....	8
數學領域相關的認知能力.....	9
數感與概數系統 .....	9
概數系統與數學學習的關係 .....	10
乘法心算之策略.....	10
數學運算之神經機制.....	11
數學運算與工作記憶成分的關係與其神經機制.....	15
認知負荷之生理指標.....	16
參、研究方法.....	16
乘法心算能力、策略選擇與工作記憶及數感關係之行為實驗.....	17
乘法心算作業 .....	17
概數判斷作業 ( Numerical Discrimination Task ) .....	19
工作記憶作業 .....	20
記憶更新作業.....	21
運作廣度作業.....	21
句子廣度作業.....	22
空間短期記憶作業.....	22
乘法眼動實驗.....	23
受試者 .....	23
刺激材料 .....	23
實驗設計 .....	24
乘法題型與數字負荷的 fMRI 實驗 .....	24
受試者 .....	25
實驗設計與程序 .....	25
作業與材料 .....	25
實驗程序 .....	25
fMRI 影像蒐集 .....	26
肆、研究結果.....	26
乘法心算能力、策略選擇與工作記憶及數感關係之行為實驗.....	26

各項作業的正確率與反應時間 .....	27
乘法心算作業.....	27
概數判斷作業.....	29
工作記憶作業.....	31
乘法心算表現與工作記憶能力、概數感能力之間的相關性.....	32
乘法心算的策略種類 .....	33
在乘法作業中不同題目之策略使用情形分佈狀況 .....	33
在乘法表現高低者的使用策略之差異 .....	34
高乘法表現者在不同難度題目中使用不同策略時所需解題時間不同.....	35
記憶更新能力高低不同受者之乘法心算策略分布情形.....	36
乘法心算表現群及記憶更新能力群之策略分布比較與反應時間差異.....	37
含 5 題目之特殊效應 .....	39
乘法眼動實驗.....	41
正確率與反應時間 .....	41
各項眼動指標 .....	43
瞳孔時序變化分析 .....	47
小結 .....	48
fMRI 實驗 .....	48
正確率與反應時間 .....	49
fMRI 分析結果 .....	50
在高負荷減低負荷題的對比.....	52
四乘一題型下高負荷減低負荷的對比.....	53
線性高低數字負荷的對比 (load-linear model) .....	54
<b>伍、討論 .....</b>	<b>55</b>
數學運算需要的基本能力 .....	55
乘法心算表現、記憶更新能力與題型和策略使用的關係.....	56
乘法心算中認知負荷與大腦活化之關係 .....	56
<b>參考文獻 .....</b>	<b>57</b>



## 圖次

圖 1 乘法心算常見的兩種策略 .....	11
圖 2 乘法心算的心智負荷 .....	18
圖 3 乘法心算作業之實驗程序 .....	19
圖 4 概數判斷作業刺激材料範例 .....	20
圖 5 概數判斷作業的實驗程序 .....	20
圖 6 記憶更新作業的實驗程序 .....	21
圖 7 運作廣度作業的實驗程序 .....	22
圖 8 句子廣度作業的實驗程序 .....	22
圖 9 空間短期記憶作業的實驗程序 .....	23
圖 10 乘法眼動實驗程序 .....	24
圖 11 乘法題型與數字負荷之 fMRI 實驗程序.....	26
圖 12 乘法心算作業中數字負荷難易度與正確率之關係圖 .....	28
圖 13 乘法心算作業中數字負荷難易度與反應時間之關係圖 .....	28
圖 14 概數判斷作業中之正確率圖 .....	30
圖 15 概數判斷作業中之反應時間圖 .....	31
圖 16 乘法心算表現與工作記憶作業、概數判斷作業表現之相關性 ..	32
圖 17 高乘法表現者在不同題型下的各策略之平均反應時間 .....	36
圖 18 不同分類之高低群反應時間差異比較 .....	39
圖 19 含 5 與不含 5 題目之各題型之反應時間 .....	40
圖 20 含 5 與不含 5 題目之各題型之反應時間 .....	40
圖 21 乘法眼動實驗之正確率 .....	42
圖 22 乘法眼動實驗之反應時間 .....	42
圖 23 乘法眼動實驗之平均凝視時間 .....	43
圖 24 乘法眼動實驗之凝視次數 .....	44
圖 25 乘法眼動實驗之第一凝視點平均停留時間 .....	44
圖 26 乘法眼動實驗之第二凝視點平均停留時間 .....	45
圖 27 乘法眼動實驗之瞳孔 X 軸平均大小 .....	46
圖 28 乘法眼動實驗之瞳孔隨時間變化 .....	47
圖 29 乘法眼動實驗 normalize 後之瞳孔隨時間平均變化(切 50 個 bins) .....	48
圖 30 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率.....	49
圖 31 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率.....	50
圖 32 fMRI 實驗之高負荷對比低負荷之大腦活化圖.....	52
圖 33 fMRI 實驗中四乘一題型下高負荷對比低負荷之大腦活化圖....	53
圖 34 fMRI 實驗線性負荷對比大腦活化圖.....	54

## 表次

表 1 不同題型中數字負荷程度 .....	23
表 2 乘法眼動實驗之不同題型範例 .....	24
表 3 乘法心算作業之正確率與反應時間表 .....	27
表 4 概述判斷作業之正確率與反應時間 (Dot-Size vs.Area controlled) .....	29
表 5 概述判斷作業之正確率與反應時間 (total dot number) .....	30
表 6 四種工作記憶作業之正確率 .....	32
表 7 乘法心算作業中受試者的策略分佈 .....	34
表 8 乘法心算高低能力在不同題型正確率之策略分佈 .....	35
表 9 高低乘法表現群在不同類型題目下使用不同策略之平均反應時間 .....	36
表 10 記憶更新表現高低群在乘法心算之策略分佈 .....	37
表 11 以不同方式區分高低群之策略分佈情形 .....	38
表 12 乘法眼動實驗正確率與反應時間之平均值與標準差 (30 人) .	41
表 13 第一凝視點與第二凝視點之平均位置 .....	46
表 14 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率與反應時間平均值與標 準誤.....	49
表 15 乘法題型與數字負荷的 fMRI 實驗之對比分析參照表.....	51
表 16 fMRI 實驗之高負荷對比低負荷之腦區位置表 (k=412) .....	52
表 17 fMRI 實驗中四乘一題型下高負荷對比低負荷之腦區位置表 (k=369) .....	53
表 18 fMRI 實驗線性負荷對比腦區位置表 ((k=227) .....	54

## 壹、前言與研究目的

著名的數學家高斯曾說過「數學為科學之母」，基本的數學運算和相關知識除了是生活必備的技能外，從古至今不管是哲學、藝術或者是各種科學研究，數學一直都是許多學門的核心基礎。因此無論國內外，探討數學成就的研究一直都是熱門議題，像是 Krutetskii (1976,1993) 的數學資優兒童個案研究，探討影響數學成就的因素，其利用因素分析法發現運算能力即是影響數學成就的其中一個重要因素。此外美國國家研究院的研究報告也認為培養良好的運算能力方能成就良好的數學能力 (National Research Council, 2001)。而過去探討數學解題歷程的研究也提出運算能力在解題歷程的重要性 (Krulik & Rudnick, 1989; Mayer,1992)，有些研究亦認為缺乏基礎的運算能力，將無法達到對數學概念真正的理解 (劉柏宏, 2004)。另外在探討數學學習障礙的研究也顯示，運算能力低落和數學學習障礙有關連性 (秦麗花, 1995)，Lerner (2003) 的研究更認為教導學生具有基本的先備運算能力是相關教育原則之一。綜上所述，顯示基本的運算能力和數學成就間是有其必然的關係，如果在教育階段為培養良好的基本運算能力，可能會影響之後複雜的數學解題能力以及相關的知識理解。有鑒於數學能力不僅和我們日常生活息息相關，因此本計畫意欲利用腦造影技術探討不同數學能力成就的受試者，其基本運算能力和認知負荷的相關腦區上是否有所差異。

過去研究顯示運算能力是影響數學成就的重要因素之一，且數學專家在解決題目時優異的表現不只是有比較好的計算結果，還包括能彈性地依據問題使用不同的策略 (Staszewski, 1988)。但國內外研究較少在探討基本運算能力與策略選擇的關係，也無研究顯示不同的策略選擇對大腦認知負荷的影響。有關專家與生手的研究顯示，專家型的問題解決者不僅可熟練地將問題解決動作自動化，且有較多的餘力監控整個過程的進行及可能發生的錯誤，比較能察覺到問題狀態及限制因素，能適時的修正問題空間的規模及品質。生手則比較無法感知到問題狀態中的限制因素，對整個過程的掌握能力不如專家來得好 (Gentner, 1988; Glaser, & Chi, 1988)。因此本研究假設，數學運算能力高低不同者有不同的運算策略選擇，而這些不同策略的運算選擇會影響大腦的認知負荷，進而造成表現上的差異；同時，運算能力高者較能依題目難易彈性地選擇運算策略。

過去的研究顯示人們學習運算需要一些基本能力支援。許多研究正努力地瞭解有哪些基本能力是在進行數學運算時所必須的。部分研究認為像是工作記憶以及執行功能的一般認知能力是必要的；有些研究則認為領域特殊能力也很重要，像是大數目的概數感、群數 (numerosity of a set) 以及執行運算時的數字表徵。然而，哪些能力扮演重要的角色仍持續在爭議中 (Butterworth, 2010)。

因此本計畫之研究目的在於探究運算能力高低不同者在乘法運算時的策略選擇與大腦認知負荷情形。第一年度計畫的研究目的在於找出未來 fMRI 研究中適合的刺激材料，也就是從不同難易度以及不同數字記憶負荷量的題型中，篩選

出能達成研究目的的乘法題目。第二年度計畫研究目的仔細篩選第一年度測試的題目，並設計出適合在 fMRI 研究的題型以及實驗程序，為了確保刺激材料在數字記憶負荷程度上的穩定度，選擇使用對於認知負荷敏感之眼動指標—瞳孔變化，作為篩選刺激材料的測試。第三年依序執行 fMRI 實驗並依據前階段的實驗結果調整後續的實驗程序。

## 貳、文獻探討

本計畫為了探究基本運算能力高低者在執行較複雜的乘法運算時的大腦認知活動負荷情形，參考前人關於數學基礎運算以及工作記憶認知負荷之相關神經基礎研究。以下將依序介紹工作記憶能力與數學成就之關係、數學學習相關之認知能力以及數學基本運算的神經機制。

### 工作記憶容量與數學成就的關係

工作記憶即同時處理資訊與儲存資訊的能力，因此在測驗其容量時，會使用雙作業廣度測驗 (dual-task span test)，也就是需要同時運用處理與儲存兩種能力的測驗。一般而言，工作記憶被公認是有容量限制的，並因此造成個體差異。以 Conway 等人的理論來說，容量即表現在有多少在注意力範圍中的資訊被成功的記憶下來。也就是能由記憶中活化資訊，並保持對資訊的注意力，以及忽略與主題焦點無關的干擾訊息。目前被廣為接受的一般容量假說 (Tunmer & Engle, 1986) 修正了以前的作業特定性假說 (Daneman & Carpenter, 1983, 1980)，其差異在後者假設當工作記憶與要處理的內容是同一個類型時，工作記憶容量跟表現出來的結果才會有關連。一般容量假說指的是工作記憶對於任何類型的工作，都與其有某種程度的關聯。工作記憶容量大指的也不是儲存的空間較大，而是指因為注意力能集中在焦點資訊上，並加以處理，而能有較好的認知結果。從這裡可以得知，如果受試者必須自行調控認知與注意力的集中位置與程度，則受試者的工作記憶容量不同就會造成不同的結果。如果認知與注意力的集中位置與程度不需要被受試者自行操控，則不會造成影響。換句話說，也就是不受工作記憶的影響。

為何工作記憶能力在數學成就上如此重要？其實不只是數學，工作記憶對不同的認知功能來說都非常重要，如閱讀、計算、決策和學習新事物等。中央控制系統被證實與學習新的字彙有關 (Henry, 2001)，與理解語言有關 (Swanson & Ashbaker, 2000)，也與數學計算能力有關 (Bull & Scerif, 2001)。工作記憶因此對學業成就有密切的關係，也是預測學業成就的一個指標 (Hitch, Towse, & Hutton, 2001)。也有研究指出，工作記憶與英國小一學生的國家課程測驗成績有一致的結果 (Gathercole & Pickering, 2000)。國內亦有研究探工作記憶和數學障礙間的關

聯性（蔣大偉，2001）。

近代對於工作記憶的看法，Oberauer 等人認為，工作記憶至少有三種功能：儲存與轉換、監督與協調（Oberauer, Lange, & Engle, 2004; Oberauer, Schulze, Wilhelm, & Süß, 2005; Süß, Oberauer, Wittmann, Wilhelm, & Schulze, 2002）。其中儲存與轉換是在保持相關聯的長期記憶隨時可被提取，並同時進行認知作業。監督則是指中央執行系統，最重要的功能在於過濾與忽略不相關的訊息，並使個體能集中注意力處理正在進行的作業。協調指的是協調來自不同部分的資訊，如語音迴路及視覺空間模板，並安排處理程序，使得複雜的新訊息能彼此結合成一個相關的整體結構。這樣的協調系統是容量有限的，並且可以決定要分割或保留收到的訊息。在這些功能中，監督與協調的功能在整個工作記憶系統中是屬於記憶力調控的部分，而非記憶的功能，也就是適當的在受到干擾的狀況下，選擇將注意力調配在目標訊息上，進而使個體的處理效率提高。換句話說，工作記憶也就代表了一個個體能夠集中注意力在新資訊上的能力，然後進而處理與儲存。

Oberauer 等人將工作記憶大致分為口語、數字和空間圖形幾個方向，因為個體在處理外來資訊時，也是將其區分成口語、數字和空間圖形。而個體處理外在資訊時應用的個人智力，即與工作記憶有密切關係。因此將這樣的分類對應到工作記憶有其合理性。而 Oberauer 等人又進一步的將這些類型的作業細分，分成三種功能（儲存與轉換、監督、協調）與三種資料類型（口語、數字、空間與圖形）排列組合而成。這樣詳細的將作業分類有助於後來的研究者依不同的功能、內容及研究需要選取不同的作業加以組合，並研究其關聯。目前尚待突破的則是如何區辨個體是否只使用分類中的單一認知功能來進行作業；較可能的是每項認知功能都在某個面向上協助作業，而使作業測量出來的結果有功能的重疊現象。

Iuculano、Moro 和 Butterworth（2011）整理出工作記憶的幾個成分與數學運算之間的關係。像是語音迴路（Phonological Loop, PL）被認為與解決單一數字的加法有關（Hecht, 2002; Seyler, Kirk, & Ashcraft, 2003）。視覺空間模板

（Visuo-spatial sketchpad, VSSP）則與視覺呈現的問題有關（Logie et al., 1994）。中央處理系統（Central Executive, CE system）則被認為在計算上扮演重要的角色，藉由更新像是進位退位等運算，負責及時儲存與處理最後的結果（Baddeley, 2003）。

## 數學領域相關的認知能力

### 數感與概數系統

數感（number sense）被認為是基本的對於數（量）的直觀，是一個不需要口語計數的，對於視覺或語音等項目之近似數量的估計能力。目前有越來越多的研究發現，人類具有內在的數感，可以處理近似值的運算。這種對於數的近似值

估計能力不只在成人上發現，在嬰兒、小孩上，甚至非人類的動物上（哺乳類及禽類）也發現具有這樣的能力，這些能力包括數的近似值、抽象表徵。因此許多研究假設，生物存在一個內建的概數系統（*approximate numerosity system, ANS*），用來提供生物感知數（量）的近似值（*Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohe, 2003*），認為此一假設的生理基礎，支援數（*numerosities*）的比較與操作（*Barth, Kanwisher, & Spelke, 2003; Barth, Mont, Lipton, Dehaene, Kanwisher, & Spelke, 2006; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004*）。此外有研究發現，當成人與孩童比較或相加符號數字時，他們的近似值表徵似乎會活化（*Gilmore, McCarthy, & Spelke 2007*）。

## 概數系統與數學學習的關係

許多非人類的物種似乎也都具有處理近似值的能力，因此認為可能具有一個內建的直觀的生理機制，也就是概數系統，來處理日常生活需要不用細數也不很精確的估算（*Lemera et al., 2003*）。另有一些研究則發現孩童概數能力與數學成就有關，幼稚園時期的早期概數能力可以預測其未來的數學成就，而有運算功能缺失的孩童也常見概數能力的不足（*Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008*）。因此提出計算障礙是所謂「概數系統和正規的數學符號」之間不連結造成的，並認為概數系統與正式符號數學之間的不連結，是造成數學障礙或失算症的主因（*Attridgea, Gilmorea, & Inglis, 2009*）。但不是所有的研究都呈現這樣的結果，有些運算能力不足的孩童與控制組的孩童在相關的 ANS 作業上沒有什麼差異（*Iuculano, Moro, & Butterwoth, 2011*）。*Rouselle* 及 *Noël*（2007）則主張失算症是在概述系統中的概數表徵與使用在正式數學中的符號不連結的結果，因為他們發現被認為是失算症的孩童，能夠在非符號比較作業中表現良好（像是，「藍點或紅點誰比較多」的作業），但是卻無法成功處理使用符號的相同任務。

## 乘法心算之策略

乘法的運算涉及了許多重複的單一數字操作，並且有許多必須執行的複雜過程，像是提取一位數乘以一位數的資訊、將兩個數值相加、進位，記憶不同位數的數值。在乘法中，當被要求將一個長的被乘數乘以一個數字的乘數時，在沒有其他輔助情形時，我們會試著採取一些策略來處理相乘的順序。通常，在學校裡教學的是乘數從右至左乘被乘數每一個數值，但一些研究發現有些人，特別是在乘法心算表現特別好的人，常採取與學校教學相反的方向，將乘數從左至右乘被乘數（*Pesenti, 2005; Staszewski, 1988*）。

當使用鍵盤作為計算結果的輸出時，會發現使用學校策略的受試者的按鍵行為模式與使用專家策略者的按鍵模式不同（*Rosenberg-Lee, Lovett, & Anderson,*

2009)。使用學校策略的受試者在心算出答案後，迅速將答案的所有數字依序迅速按出，而使用專家策略的受試者的按鍵則會呈現「間歇性」的作答，在確定最大位數的值後，就先按出第一個數字，而後隨著陸續由右至左乘被乘數後，逐漸按出第二位、第三位，直到答案中所有的數值都輸出。兩者的按鍵反應模式可以見圖 1。這樣的按鍵模式不同可以讓研究者直接從行為反應立刻得知受試者採取的策略，因此適合做為判斷受試者策略選擇的研究方法。

Example Problem Solved by the Expert and School Strategies		
$34,826 \times 7$		
	Expert	School
	$7 \times 3 = 21$	$7 \times 6 = 42$
	$7 \times 4 = 28$	$7 \times 2 = 14$
	$21 \times 10 = 210$	$14 \times 10 = 140$
<p>“→” method: working through the multiplicand from left to right</p>	$210 + 28 = 238$	$140 + 42 = 182$
	<b>Press 2</b>	$7 \times 8 = 56$
	$7 \times 8 = 56$	$56 \times 100 = 5,600$
	$38 \times 10 = 380$	$5,600 + 182 = 5,782$
	$380 + 56 = 436$	$7 \times 4 = 28$
	<b>Press 4</b>	$28 \times 1,000 = 28,000$
	$7 \times 2 = 14$	$28,000 + 5,782 = 33,782$
	$36 \times 10 = 360$	$7 \times 3 = 21$
	$360 + 14 = 374$	$21 \times 10,000 = 210,000$
	<b>Press 3</b>	$210,000 + 33,782 = 243,782$
	$7 \times 6 = 42$	<b>Press 2</b>
	$74 \times 10 = 740$	<b>Press 4</b>
	$740 + 42 = 782$	<b>Press 3</b>
	<b>Press 7</b>	<b>Press 7</b>
	<b>Press 8</b>	<b>Press 8</b>
	<b>Press 2</b>	<b>Press 2</b>
	<b>Press ENTER</b>	<b>Press ENTER</b>

Note—Keypresses indicated in boldface.

圖 1 乘法心算常見的兩種策略

此外，這樣的按鍵行為模式也適合用來探討乘法心算的認知負荷情形，當受試者在同一題目中分別使用兩種不同的策略時，理論上，使用學校策略的認知負荷會比使用專家策略時重。因為受試者必須記著相當多位的數值，同時還得不斷地進行運算，而使用專家策略時，當確定最大位數的數值後，按鍵輸出後，就可降低必須記憶的數值數量。

## 數學運算之神經機制

Roland 和 Friberg(1985)的研究是第一個探索人類處數學能力相關神經區域的實驗，其利用正子斷層造影(Positron emission tomography, PET)的研究結果發現，頂葉及額葉的新陳代謝在複雜計算過程中會增加。這研究的結果和之前從腦傷病人的研究結果發現一致，證實頂葉在處理數字上扮演關鍵角色(Piazza & Dehaene, 2004)。

Dehaene、Piazza、Pinel 和 Cohen(2003)的研究回顧相關的神經生理證據，並利用功能性磁振造影(functional magnetic resonance imaging, fMRI)觀察在不同數字作業時腦區的活化表現，區分出大腦頂葉區域在與數相關處理時的活動情形。他們提出三個頂葉區域在數相關作業中運作的部位及其處理機制：bilateral

posterior parietal lobes (PSPL)、left angular gyrus (AG) 和 bilateral horizontal segment of the intraparietal sulcus (HIPS)。PSPL 與視覺空間處理有關；AG 與數的語言處理 (verbal processing) 相關；而 HIPS 則與表徵數量有關，無論呈現方式是用阿拉伯數字、數字文字或點數 (dots)，當受試者注意到數量時，HIPS 皆會活化。

Piazza 和 Stanislas Dehaene (2004) 綜合許多關於數與 HIPS 區域活化程度的研究，指出 HIPS 這個區域活化程度增加有些個特徵 (features)，分別是：(1) 估計近似結果時 HIPS 會有較多的活化；(2) 使用到數值比例 (numerical scale) 的比較操作 (comparative operation) 時 HIPS 會被活化；(3) 相對於物體或概念的類別，與數類別有關時 HIPS 會相當穩定地活化；(4) 數字呈現時，HIPS 的活化並不受其數字呈現方式的影響；(5) 即使是無意識地處理到數量，HIPS 亦會活化。這些使大腦 HIPS 區域活動增加的特徵，都是關於編碼 (encode) 數量尺度的類比表徵 (analogical representation)，而此表徵是源於對數量大小意義的直覺。

此外，過去研究顯示受試者在計算估計加法题目的近似結果時，HIPS 有較多的活化，Dehaene、Spelke、Pinel、Stanescu 和 Tsivkin (1999) 的研究比較受試者在做精算加法 (exact addition) 與概算加法 (approximate addition) 時的大腦活動，結果發現 HIPS 在做概算加法時較活躍，此外和數字較小時相比，數字較大活化量較大，活化時間也比較久。Lee (2000) 的實驗中則發現做精算 (exact calculation) 時，在確實有在做數值操作 (manipulation) 的作業 (例如：減法)，與由長期記憶中提取數值的作業 (例如：乘法) 相比較時，前者的 HIPS 較活躍，然而 Lee 的實驗材料都是一位數對一位數的乘或減，而非二位數或三位數的運算。

過去研究也顯示在需要使用到數值比例 (numerical scale) 的比較操作 (comparative operation) 時 HIPS 也會被活化。Pinel、Dehaene、Rivière 和 LeBihan (2001) 的研究中要求受試者比較視覺呈現的數字比 65 大或小，發現數字距離效應 (numerical distance effect) 的主要大腦活動在頂葉區域，包括 right intraparietal focus、bilateral posterior intraparietal foci 及 bilateral precuneus。這結果與 Dehaene (1996) 的 ERP 研究的發現一致。Temple 和 Posner (1998) 則在五歲的小孩上發現與成人一樣的數字距離效應，這樣的效果無論是在阿拉伯數字上或是一堆的點的實驗設計上皆被發現。

在類別的研究也發現，相對於物體或概念的類別，在數類別上 HIPS 區域會相對穩定地活化。Pesenti、Thioux、Seron 和 Volder (2000) 在做比較判斷時，受試者在處理數值比例時相對於處理非數值比例的物體類別，HIPS 有較高的活動。Thioux、Pesenti、Costes、De Volder 和 Seron (2005) 發現無論是在數字上的語意作業或是比較作業，都觀察到 left and right intraparietal sulci 的活動，因此認為 HIPS 的活動與數的類別特徵語意知識有關。Eger、Sterzer、Russ、Giraud 和 Kleinschmidt (2003) 的研究檢驗關於三重編碼理論 (triple-code theory) 中所假



設的抽象語意「數字感」(abstract-semantic "number sense")，要求受試者對數字、字母及顏色做簡單的偵測作業 (detection task)，刺激材料中的字母與顏色為控制材料，兩者皆包含距離效應 (distance effect)。而字母還包含序列成分 (serial component)，但兩者都沒有數量的意義。在這個實驗中並沒有直接要求做數量的判斷，只是簡單的偵測作業。結果顯示，相對於偵測字母和顏色，偵測數字時 HIPS 是唯一活化較多的部位，因此認為 HIPS 特別編碼了關於量的資訊。

過去研究進一步發現，數字呈現時，HIPS 的活化並不受其數字呈現方式的影響。無論是阿拉伯數字、數字文字或點數，當受試者注意到它們的數量時，皆會活化 HIPS 區域。Piazza、Giacomini、Le Bihan 和 Dehaene (2003) 要求受試者注意視覺 (顏色) 或聽覺 (音高) 呈現的數量訊息，發現無論是哪種模式的刺激，皆會造成右側的 HIPS 活化。而無論數字是以阿拉伯數字或語文的方式呈現，皆有數字距離效用，也都會活化兩側的 HIPS 區域 (Pinel et al., 2001)。

此外，當受試者並未看到數字符號時，若有對其做數量處理，HIPS 亦會活化。Naccache 和 Dehaene (2001) 的實驗中受試者被要求比較目標數字比 5 大或小，但在呈現目標數字時，短暫的呈現一個促發數字 (prime number)。fMRI 資料顯示兩側的 intraparietal region 對於相同數字是否重複相當敏感，即便是受試者並沒有意識到。當觸發數字與目標數字一致的量時 (例如，ONE 與 1) 相較於不一致量時 (例如，FOUR 與 1) 額葉的活動較低。這樣的結果顯示 intraparietal region 可能包含對於處理不同數量的神經部件 (neural assemblies)，因此在處理兩個數量時，相較於只處理一個數量時，神經部件的活化較多。

Piazza 和 Dehaene (2004) 整理關於額葉損傷的研究，亦顯示 HIPS 與數量表徵有關，一些病人顯現出數字概念和其他語意概念雙重分離 (double dissociation) 的現象，left temporofrontal cortices 受傷但 intraparietal regions 未受傷的病人語意能力很差，但仍保留數字理解及計算能力。而有些左側 parietal region 受傷的病人保留語言及語意能力，但是數字理解能力受損。在發展的研究上亦顯示有計算困難的人通常在 HIPS 不正常，像是 left inferior parietal area 新陳代謝不正常。而在 X 染色體不正常 (只有一個 X) 的 Turner's syndrome 的病人上，通常伴隨著數學技巧的缺失，但智力正常，測試其灰質密度，發現右側的 HIPS 的灰質密度較少，而 fMRI 研究亦顯示在做數字作業時，像是簡單加法，Turner's syndrome 的病人的右側 HIPS 活化程度與正常人相比有顯著不同。

綜上所述，許多證據顯示 HIPS 區域在數學技巧發展上扮演關鍵的角色，然而並非只有這個系統參與數字處理的過程。例如心算需要綜合許多心智過程，而其中有些歷程可能不是僅在數字領域。Dehaene 等人 (1999) 的研究顯示，在精算時，相對於概算，left angular gyrus 的活化程度較高。Spelke 和 Tsivkin (2001) 研究則發現雙語受試者的語言與數字的關係，顯示精確數字的訊息以學習階段使用的語言來提取較為有效，但是概略數字的訊息，無論用哪一種語言來提取都一樣有效。一些研究發現顱內出血的病人有時會出現不同型態的計算缺損，Lee (2000) 的 fMRI 實驗中觀察兩種不同運算方式的大腦活動，發現在做精算時，

特別是相對於減法作業，乘法作業有比較多由長期記憶中提取數值，left angular gyrus 的活化程度較高。Delazer 等人 (2005)、Ischebeck 等人 (2006) 和 Ischebeck、Zamarian、Schocke 和 Delazer (2009) 之研究亦證實 left angular gyrus 的活化與運算時長期記憶的提取有關。

Ischebeck、Zamarian、Schocke 和 Delazer (2009) 比較受過乘法訓練的受試者在已訓練過的乘法題型上與未訓練過乘法題型上的大腦活化情形，發現在反覆學習過的題型作答時，受試者在額葉-頂葉區域 (fronto-parietal areas) 上，像是 intraparietal sulci (IPS) 及 left inferior frontal gyrus 活動較低，而 angular gyrus 的活化較高，這樣的大腦活動差異顯示，受試者在已訓練過的乘法題型上是從長期記憶中提取已學習過的結果 (fact)，而非直接計算。

另外，在已訓練過的乘法題目的相關除法題目方面，亦發現遷移的大腦活化情況。例如：在「4 乘以 7 等於 28」這樣乘法題型上，與「28 除以 4 等於 7」及「28 除以 4 等於 7」等題型相關。除了「4 乘以 7 等於 28」這樣的乘法題型表現出額葉與頂葉區域活化減少與 angular gyrus 的活化增加外，相關的除法題型「28 除以 4 等於 7」及「28 除以 4 等於 7」也表現類似的大腦活化變化，顯示學習效果的遷移。行為表現上也顯示學習效果的遷移，除了已經學習過的乘法題目在測驗的時候反應速度較快且正確率較高外，在相關的除法問題上，行為表現也較未訓練過的題目上速度快且正確率高。

Delazer 等人 (2005) 探究使用兩種不同學習策略學習乘法之後，回答乘法問題時的大腦活化差異。這兩種學習策略分別是利用運算法則計算的學習，及機械式背誦兩個運算子之間的結果的學習。發現後者的學習方式造成測試的表現相對於前者有較多的 left angular gyrus 的活動，顯示機械式背誦學習方式會促發結果的提取。

Ischebeck 等人 (2006) 比較乘法與減法的運算過程大腦活動，發現受試者在訓練後的乘法與減法題目同時表現出額葉與頂葉區域活化降低的情形，但只有在已訓練過的乘法題目上在 left angular gyrus 活動相較於未訓練過的乘法題目顯著增加。這樣的結果被認為在乘法上相對於減法因訓練產生的記憶提取是比較有效的策略。

然而數學專家在解決問題的時候，其表現優異並不只是限制在較好計算結果的提取上，而是同時包含比較豐富的程序及概念的知識。程序知識是由已被儲存的運算法則到解決複雜計算問題的一串序列步驟的例行公式似的應用 (Ischebeck et al., 2009; McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985)。程序知識不是推論的產生，且可能與概念知識是分離的。要使推論產生與連結不同的概念資訊這兩部分形成有意義的連結，概念知識是必要的。在算術上，概念知識包括運算子和運算法則的基本瞭解。數個神經心理學研究顯示概念知識與結果知識 (fact knowledge) 是分離的，也與程序知識及運算法則知識分離 (Cappelletti, Kopelman, Morton, & Butterworth, 2005; Girelli & Delazer, 1996; Ischebeck et al., 2009)，而腦傷的研究結果認為在算術上至少有部分分開的神經網路可能分別支持重複學習結果知識、程

序知識和概念知識。Cappelletti 等人發現，語意性記憶受損的患者，在圖片及語言呈現的作業皆表現較差，但數字相關知識卻沒有明顯損害。此結果顯示數字相關記憶與圖片、語言記憶有不同運作系統（Cappelletti, Butterworth, & opelman, 2001）。後續研究更進一步證實該病患即使非運算法則（nonarithmic conceptual knowledge）知識受損，但其運算法則知識仍能被保存。顯示概念知識與運算法則知識分離（Cappelletti, Kopelman, Morton, & Butterworth, 2005）。除此之外，Girelli 等人發現書寫計算困難的患者 MT，其多位數相減的能力受損，此結果亦支持運算法則與概念知識相互獨立（Girelli & Delazer, 1996）。

除了在 left angular gyrus 中的語言相關區域與數字處理有關外，許多研究亦分離出在 PSPL 上的視覺空間區域與數字處理的空間及非空間注意力有關。在前述之 Dehaene 等人（1999）及 Spelke 和 Tsivkin（2001）的研究，除了發現 left angular gyrus 在精算時比粗算時以及在乘法運算時比減法運算時活動高外，還發現 PSPL 區域活化，且通常與 HIPS 一起活化。像是在數字比較作業中的數字處理時（Pinel et al., 2001）、概算時（Dehaene et al., 1999）、或一些減法作業時（Lee, 2000）以及計數（counting）時（Pesenti et al., 2000），會看到 PSPL 區域的活動。但此區不只是和數量有關，還與空間、時間的注意力有關，在 Wojciulik 和 Kanwisher（1999）的 fMRI 研究中企圖探討不同種類視覺注意力是否共用某些神經基質（neural substrate），發現 PSPL 在空間與時間的注意力選擇上扮演重要角色。因為數字本身及含有強烈的序列關係以及空間成分，可想而知這樣的結果很可能是相同的運作發生在選擇空間上的位置及處理數線上的特定數量的注意力切換。

Piazza、Mechelli、Price 和 Butterworth(2006)的 fMRI 研究探究在不同感覺通路上粗估與精算方式的大腦神經網路活動，發現跨感覺輸入通路的神經活動。無論是哪種感覺輸入，粗估方式時會活化 right lateralized fronto-parietal cortical network，而精算時則增加左側前額葉、頂葉以及兩側前運動皮質區的活動。他們認為精算的時候受試者必須注意哪些區域或是哪些訊息已經處理過（計數過），因此活化的區域跟運動及注意力相關系統有關。

## 數學運算與工作記憶成分的關係與其神經機制

Lee 和 Kang（2002）利用雙作業抑制語音或視覺空間處理來探究計算功能與工作記憶的關係，發現乘法的表現與語音迴路有比較高的關連，減法則與視覺空間模版有關。這樣的結果與所有的算術是一件事（the arithmetic is done on a unitary）的看法衝突，反而比較支持人類數字認知上的三重編碼或模組處理模型（modular processing models）的假設，這些假設中在輸入及輸出的模式中及計算方式上的數字表徵是特殊的。這些在行為表現上的分離現象顯示計算的神經基礎是異質的（heterogeneous）。

Montejo & Courtney（2008）利用數學運算的記憶更新作業來探究工作記憶中刺

激特殊資訊的維持與反應之間的關係，利用 fMRI 來測試是否數字的更新與數學運作的更新在工作記憶中依賴相同的神經系統；其研究結果顯示在運作的更新時大腦活化情形偏好在共同網路的前額葉部份，而數字更新則偏好在頂葉，顯示數字與規則皆在工作記憶中被維持，但它們是不同的資訊，且分開被控制。

## 認知負荷之生理指標

Recarte and Nunes (2000) 的研究證實可以利用口語或視覺想像的作業使得瞳孔大小產生有效的變化。因此陸續許多研究發現這些發生一段時間的認知事件與一連串的瞳孔突然放大有關 (Marshall, 2002; Marshall, Pleydell-Pearce, & Dickson, 2003)，顯示作業會引發瞳孔放大，並且證明瞳孔放大是認知負荷有關 (Andreassi, 2000; Granholm, Asarnow, Sarkin, & Dykes, 1996; Siegle, Granholm, Ingram, & Matt, 2001, Karatekin, Couperus, & Marcus, 2003)，也與情緒強度有關 (Gilzenrat, Nieuwenhuis, Jepma, & Cohen, 2010; Einhauser, Stout, Koch, & Carter, 2008)。也發現瞳孔大小的變化與作業的認知負荷以及注意力要求的關係 (see also Goldwater, 1972; Granholm, Asarnow, Sarkin, & Dykes, 1996; Hoecks & Levelt, 1993; Iqbal, Zheng, & Bailey, 2004; Janisse, 1977; Porter, Troscianko, & Gilchrist, 2007)，並且認為瞳孔放大的變化是測量認知負荷的一個穩定的指標。

## 參、研究方法

本研究採用實驗設計法，並依照實驗需求配合功能性核磁共振造影，探討在執行較為複雜的乘法運算時大腦的認知活動負荷情形。本計畫為達成研究目的，依序進行了多個行為實驗，包含了乘法心算作業、概數判斷作業、四種工作記憶作業、乘法眼動實驗，fMRI 實驗來探索不同乘法運算策略對認知負荷的影響。

行為實驗的目的除了為後續要進行的 fMRI 找尋並測試合適的刺激材料外，還探究乘法心算能力與一些基本認知能力之間的關係，以及在不同的乘法題型下的運算策略以及不同運算能力者之策略與其工作記憶能力之關係。眼動實驗則是在更進一步利用瞳孔縮放對認知負荷的敏感性，來檢視行為資料中篩選出來的刺激材料是否具備穩定數字負荷，最後設計 fMRI 實驗來探究乘法牽涉的認知成分以及大腦活化情況。

與過去研究多以簡單的一位數加法與乘法運算不同之處在於，本研究將使用較為複雜的數學運算題目作為實驗的刺激材料，嘗試釐清受試者在執行數學運算時認知負荷不同對大腦活化的影響。因眼動指標中的瞳孔變化對於認知負荷較具敏感度，因此本研究將第一年度所篩選出來的刺激材料設計成眼動實驗，在第二年時利用眼動儀來觀察受試者的瞳孔隨著刺激材料在運算時數字記憶負荷程度的變化。第三年之 fMRI 實驗中所使用的刺激材料則依據認知負荷之瞳孔變化實

驗的結果來篩選。以下將依序報告行為實驗之實驗結果，以及依據眼動實驗結果和研究目的設計出來的 fMRI 實驗。

## 乘法心算能力、策略選擇與工作記憶及數感關係之行為實驗

**受試者** 48 位同學參與實驗，平均年齡 24，男女各半，多數為國立政治大學之大學部或研究所之學生。最後資料分析在乘法心算能力與工作記憶及數感關係上只有 45 位的資料（因為其中一位參與者在乘法心算的正確率過低，80 題中僅有 26 題正確，因此不納入最後分析；另有兩位參與者之概數判斷作業上正確率方向與他人完全相反，容易判斷之題型反而正確率較低，因此不納入相關分析中）。在乘法策略變化與工作記憶之關係部分，有 47 位的資料（刪除之資料則同為上述之參與者，因為其在乘法心算的正確率過低，80 題中僅有 26 題正確，無法納入）。

**作業與程序** 本研究受試者參與的作業總共有三種，共含六個作業，分別是乘法心算作業、概數判斷作業以及四個工作記憶作業。半數的受試者參與作業的順序為：乘法心算作業→概數判斷作業→工作記憶作業；另外半數的受試者參與作業的順序則為：工作記憶作業→概數判斷作業→乘法心算作業。

以下將分別說明各作業之詳細內容，包含他們的所使用的刺激材料以及實驗程序。

### 乘法心算作業

**刺激材料** 此作業總共包含 80 個題目，每 20 題有一個休息。題目的種類依照題目難度（四種）及數字負荷程度（兩種）而分，共八類，每一類有 10 題，共 80 題。題目難度分為兩個數字乘以一個數字（二乘一）、三個數字乘以一個數字（三乘一）、四個數字乘以一個數字（四乘一）及兩個數字乘以兩個數字（二乘二）；數字負荷程度，則依據 Anderson（2009）之學校策略分成簡單題（較低數字負荷題型）與困難題（較高數字負荷題型）。

為了避免數字重複產生促發效果，題目中的數字皆不重複；此外，題目中的數字不包括 1 或 0，另，被乘數還不包含 5。

題目的類型舉例如下，依難度分，二乘一（ $35 \times 4$ ）、三乘一（ $356 \times 4$ ）、四乘一（ $3567 \times 4$ ）及二乘二（ $35 \times 67$ ）。而題目的數字負荷程度範例（見圖 3），依據 Anderson（2009）的研究，以學校策略的方式計算時的數字最大負荷來篩選題目。同一類型的題目之最大負荷值相同。以  $3456$  乘以  $2$  為例，若以學校策略（藍色方框）來計算，整個心算過程的數字負荷依序為  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 4 \rightarrow$

3->2->1；最大數字心智負荷為 7（紅圈處）(參見圖 2)。

3456*2			
Digit load	School	Digit load	Expert
2	2*6=12	1	2*3=6
4	2*5=10	2	2*4=8
5	10*10=100	3	6*10=60
3	100+12=112	2	60+8=68
4	2*4=8	1	Press 6
6	8*100=800	3	2*5=10
3	800+112=912	4	8*10=80
4	2*3=6	2	80+10=90
7	6*1000=6000	1	Press 9
4	6000+912=6912	3	2*6=12
3	Press 6	3	0*10=0
2	Press 9	2	0+12=12
1	Press 1	1	Press 1
0	Press 2	0	Press 2
	Press ENTER		Press ENTER

圖 2 乘法心算的心智負荷

在本實驗中，刺激材料的數字負荷之最大負荷分別為，二乘一簡單題之數字負荷順序為 2->3->4>2，最大數字負荷為 4；二乘一難題之數字負荷順序為 2->4->5->3，最大數字負荷為 5；三乘一簡題之數字負荷順序為 2->3->4->2->3->5->3，最大數字負荷為 5；三乘一難題之數字負荷順序為，最大數字負荷為 7；四乘一簡題之數字負荷順序為 2->4->5->3->4->6->3->4->7->4，最大數字負荷為 7；四乘一難題之數字負荷順序為 2->4->5->3->5->7->4->6->9->5，最大數字負荷為 9；二乘一簡題之數字負荷順序為 2->3->4->2->4->5->3->4->6->4，最大數字負荷為 6；二乘一難題之數字負荷順序為 2->4->5->3->5->6->3->5->7->4，最大數字負荷為 7。

**實驗程序** 實驗中螢幕將會依序出現題目，不同的題型隨機出現，受試者看到題目後，開始心算，並口頭報告心算過程，實驗者同時記錄參與者的口語報告並錄音；受試者計算出答案後，按鍵出答案後，螢幕同時出現參與者的按鍵結果；當參與者按確認鍵後（Enter），題目跳出，再出現下一題（見圖 3）。每位參與者每回答 20 題後可休息，共可休息三次，共回答 80 題。實驗結束後再依據參與者的口語資料回溯每一題之計算過程，確認每一題的計算方式。

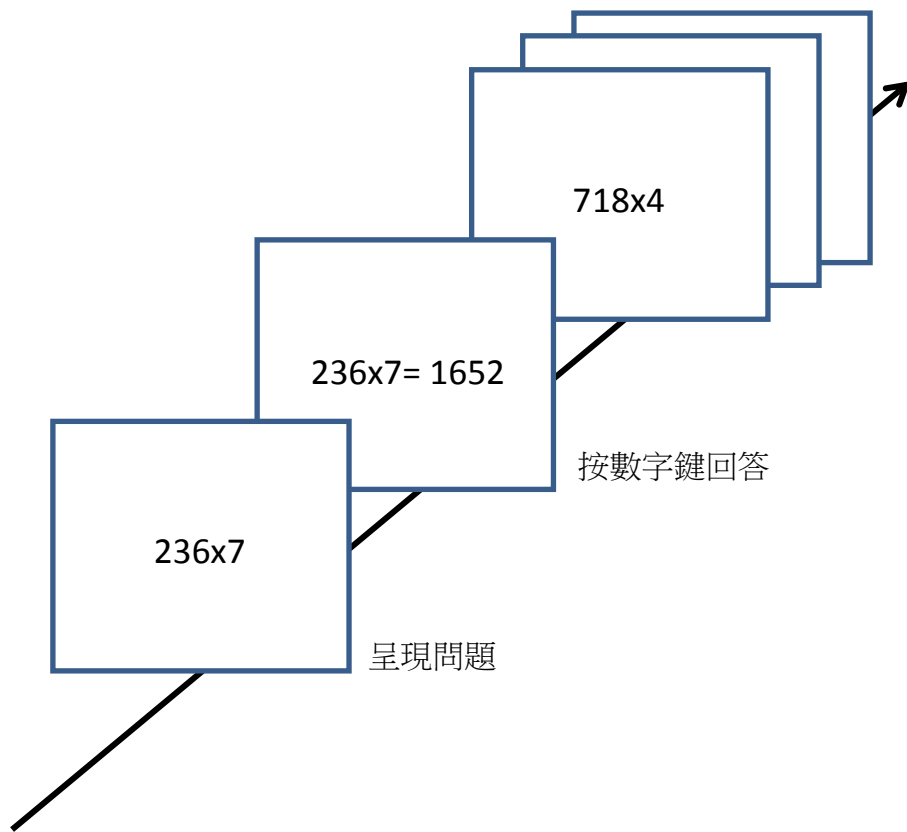


圖 3 乘法心算作業之實驗程序

### 概數判斷作業 (Numerical Discrimination Task)

**刺激材料** 在概數判斷作業中，刺激材料為分布在螢幕上不同地方的黃點與藍點（見圖 4），半數的題目中，是黃點比較多，另半數的題目則是藍點多。黃點與藍點數目的比例分別為 2 (2:1)、1.33 (4:3)、1.2 (6:5) 及 1.14 (8:7)。半數的題目中控制黃點與藍點的區域相同 (**area controlled**：全部黃點的像素大小與全部藍點的像素大小相同)，半數的題目則控制黃點與藍點的點尺寸相同 (**dot-size controlled**：黃點與藍點的平均尺寸相同)。

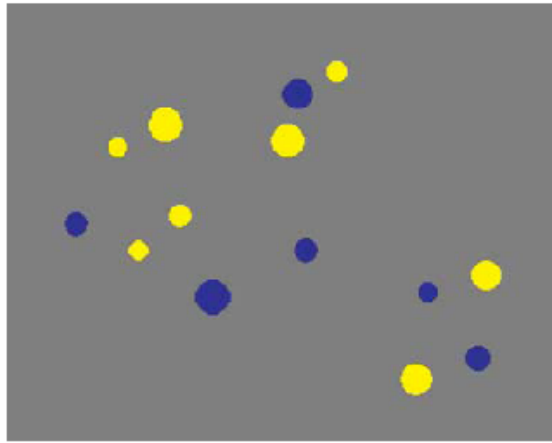


圖 4 概數判斷作業刺激材料範例

**實驗程序** 實驗中，每一個題目出現十字後，立刻呈現刺激在螢幕上 200 毫秒，然後刺激消失，出現問號，參與者按鍵回答剛剛出現的刺激中，哪一個顏色的點比較多（見圖 5）。為了避免參與者慣性按左鍵或右鍵造成偏誤，半數的參與者在黃點多的時候按左鍵（N 鍵），藍點多時按右鍵（M 鍵）；半數的參與者則是藍點多的時候按左鍵（N 鍵），黃點多時按右鍵（M 鍵）。

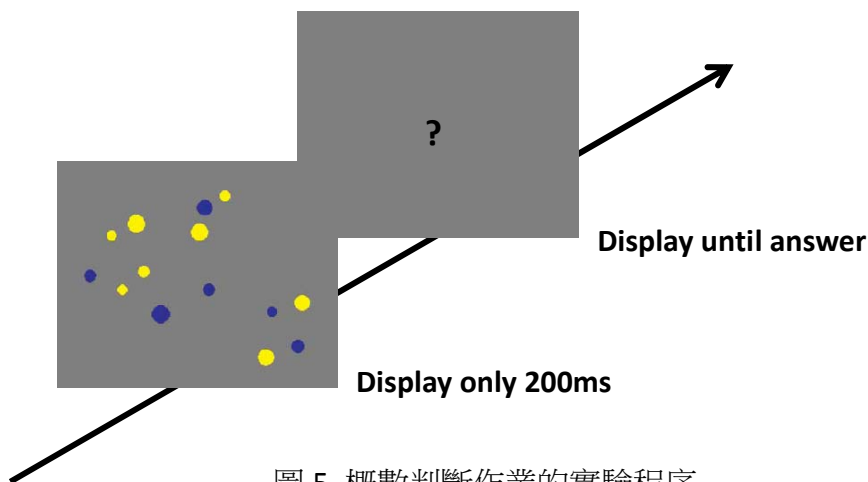


圖 5 概數判斷作業的實驗程序

## 工作記憶作業

在工作記憶作業中，我們選擇了四種著名的工作記憶作業作為本實驗的作業（Lewandowsky, Oberauer, Yang, & Ecker, 2010），分別為記憶更新作業（Memory Updating task）、運作廣度作業（Operation span task）、句子廣度（Sentence span task）作業以及空間短期記憶作業（Spatial short-term memory task）。



## 記憶更新作業

**實驗程序** 記憶更新作業的實驗程序如下：在每次嘗試開始時，螢幕上會呈現 3-5 個不等的方框，方框中依序呈現數字，數字呈現完後會呈現算式，參與者須將算式與先前該方框出現過的數字結合進行運算，然後在出現「？」方框的時候運算結果，將數字填入欄位中。作答時間不限，但作答後，不能修改答案，作答完畢後繼續下一個嘗試。所有的過程見圖 6。

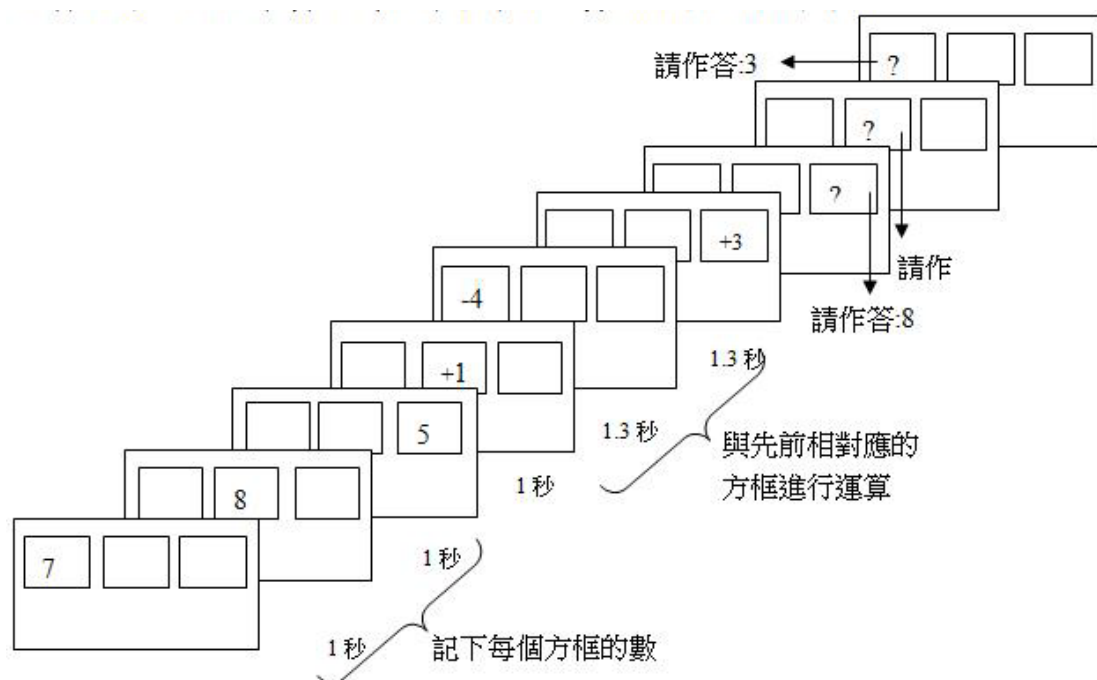


圖 6 記憶更新作業的實驗程序

## 運作廣度作業

**實驗程序** 運作廣度作業的實驗程序如下：在每次嘗試開始時，螢幕上會呈現一個簡單數學算式，參與者必須判斷這個數學算式是否正確，並按鍵作答反應；算式只會在螢幕上呈現 3 秒鐘，參與者必須在這段時間內儘快作答，若無作答，3 秒鐘後數學算式亦會消失。算式消失後，螢幕會呈現一個英文字母，參與者必須記住這個字母。這樣的過程會重複 4 到 8 次，接著會出現「？」，參與者必須把之前呈現的英文字母依序按出來。作答時間不限，但作答後，不能修改答案，作答完畢後繼續下一個嘗試。整個過程見圖 7。

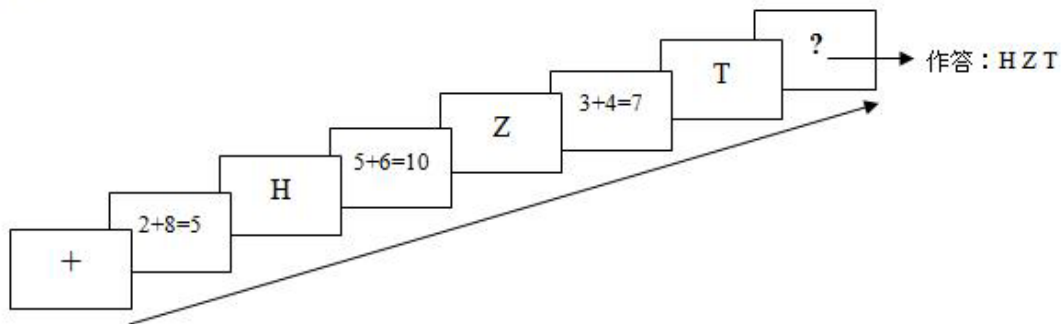


圖 7 運作廣度作業的實驗程序

### 句子廣度作業

**實驗程序** 句子廣度作業的實驗程序如下：在每次嘗試開始時，螢幕上會呈現一個簡單數學算式，參與者必須判斷這個數學算式是否正確，並按鍵作答反應；算式只會在螢幕上呈現 5 秒鐘，參與者必須在這段時間內儘快作答，若無作答，5 秒鐘後數學算式亦會消失。算式消失後，螢幕會呈現一個英文字母，參與者必須記住這個字母。這樣的過程會重複 3 到 7 次，接著會出現「？」，參與者必須把之前呈現的英文字母依序按出來。作答時間不限，但作答後，不能修改答案，作答完畢後繼續下一個嘗試（見圖 8）。

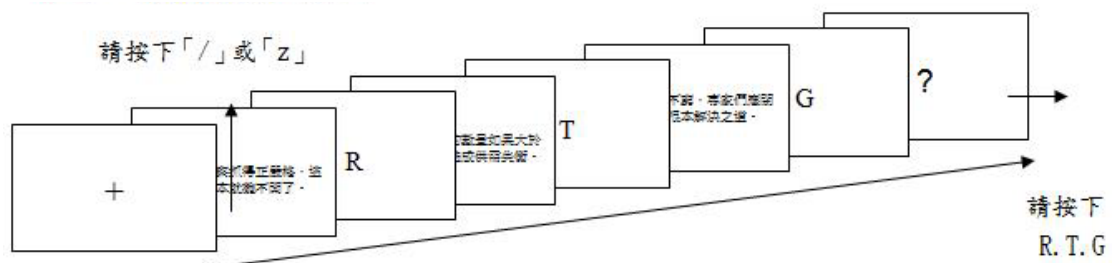


圖 8 句子廣度作業的實驗程序

### 空間短期記憶作業

**實驗程序** 空間短期記憶作業的實驗程序如下：在每次嘗試開始時，螢幕上會呈現一個 10x10 的棋盤式矩陣，接著螢幕上會出現 2 到 6 個不等的黑點，一次只會出一個點，每個點呈現約一秒鐘後消失。參與者必須儘可能地記下這些點的位置。之後螢幕會出現「Please reproduce the dot pattern」字樣，表示黑點已經完全呈現完畢，接著螢幕會出現相同的但空白的棋盤，此時參與者使用滑鼠在棋盤上點出黑點所出現過的位置。此作業可以更改答案。參與者作答出所有黑點後，螢幕會呈現「Next」，按下「Next」後，則進行下一個嘗試（見圖 9）。作答時不

需依照呈現的順序，也不限時間，只許要將點的位置正確回憶出來即可；如果參與者無法精確的回憶出點所出現的位置，則儘可能的描繪出點與點之間的正确關聯性。

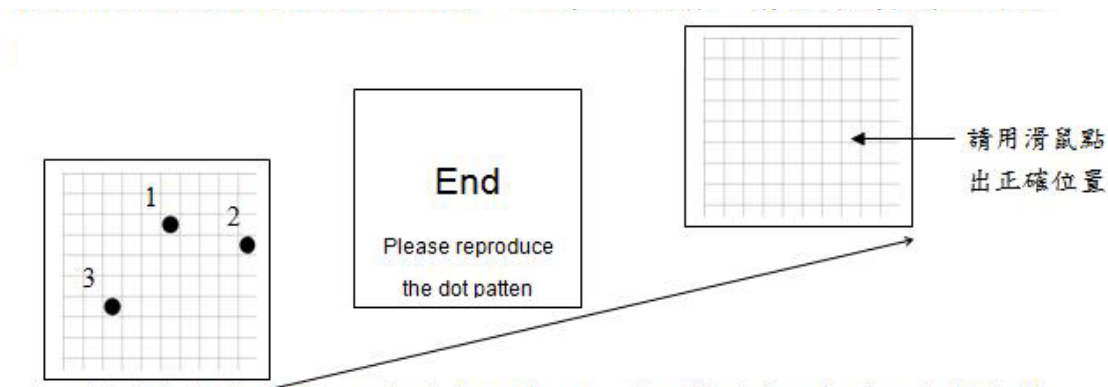


圖 9 空間短期記憶作業的實驗程序

## 乘法眼動實驗

### 受試者

國立政治大學校園招募之學生 30 名(男 5 名,女 25 名,平均年齡 20.9 歲),受試者費 200 元新台幣,矯正後視力正常。

### 刺激材料

以第一年度所建立之刺激材料庫中篩選出題型不同(2x1、3x1 及 4x1)與數字記憶負荷程度不同(數字負荷較低題與數字負荷較高題)的題目共 48 題。控制同一題目內數字不重複,且所有的題目的數字皆不含 0、1 和 5。不同題型中的數字負荷程度見表 1,不同題型之範例見表 2。

表 1 不同題型中數字負荷程度

	題型		
數字負荷程度	2 位數 x1 位數	3 位數 x1 位數	4 位數 x1 位數
簡單	4	5	7
困難	5	7	9

表 2 乘法眼動實驗之不同題型範例

數字負荷程度	題型		
	2 位數 x1 位數	3 位數 x1 位數	4 位數 x1 位數
簡單	<b>27x3</b>	<b>348x2</b>	<b>4396x2</b>
困難	<b>98x4</b>	<b>279x6</b>	<b>97298x6</b>

## 實驗設計

本實驗為 3 (2x1、3x1、4x1) x2 (簡單題與困難題) 之受試者內設計，每一個操弄皆有 8 題，共 48 題。受試者進行的實驗程序如圖 10，實驗中同時收集受試者的眼動與瞳孔縮放資料。如果刺激材料的數字記憶負荷穩定，預期將從受試者的正確率以及反應時間，以及眼動指標（平均凝視時間、凝視點數以及瞳孔大小變化）觀察到隨著數字記憶負荷程度的變化。

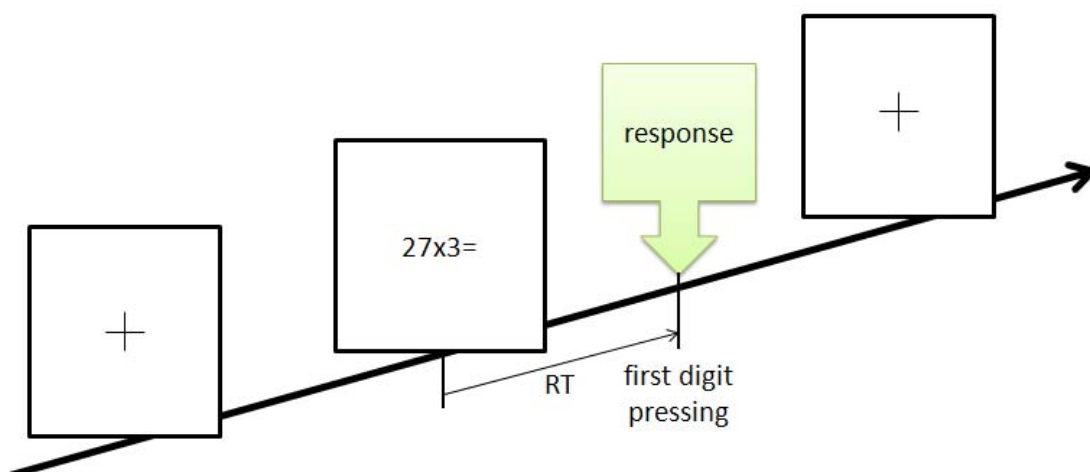


圖 10 乘法眼動實驗程序

## 乘法題型與數字負荷的 fMRI 實驗

為達成研究目的，依據前述之乘法行為實驗以及乘法眼動實驗之結果，篩選出適合在 fMRI 實驗中進行之刺激材料，並依據受試者在 MRI 掃描室中平均適合之實驗時間（約 45 分鐘）設計出 fMRI 實驗。以下將依序說明。

## 受試者

以網路公告的方式招募政治大學自願參與實驗的學生，每位受試者在一小時的實驗結束後可獲得 500 元的獎金。參與者須符合下列條件：(1) 有近視者矯正後視力正常，並需配戴隱形眼鏡。(2) 沒有動過心臟或腦部手術者。(3) 沒有情感性或心智疾病、腦傷、心臟血管疾病、癲癇等病史。(4) 體內沒有植入金屬物質：鋼釘、心律調節器、人工心臟瓣膜、人工耳蝸、胰島素體內注射器、體內電極、刺機器、神經刺激器、植入之藥物注射器、血管支架等。(5) 口腔內沒有植入金屬假牙、沒有固定式金屬牙套及牙齒矯正器。(6) 沒有懷孕。(7) 沒有持續服用任何藥物、沒有抽菸、沒有習慣性喝酒。(8) 沒有幽閉恐懼症。(9) 簽署實驗同意書，了解實驗相關注意事項和參與者權益。

## 實驗設計與程序

在所有的 fMRI 實驗開始前，實驗者先和受試者詳細說明實驗目的與進行腦造影實驗的注意事項。受試者填寫完實驗同意書後，實驗者確定受試者身上未攜帶金屬物品以及其他會受磁力干擾的物件，接著請受試者於模擬的 fMRI 機器中完成加法與乘法的練習題，以確定受試者熟悉 fMRI 內部環境與按鍵作答方式。

### 作業與材料

在乘法的題目中，根據被乘數的不同分成「兩位數乘以一位數(2 x 1)」，以及「四位數乘以一位數(4 x 1)」兩類型題目。而每種類型的題目內又根據數字負荷程度分成「數字負荷程度低」和「數字負荷程度高」兩組。每個細格的題目如下：「2 x 1 / 數字負荷程度低」20 題，「2 x 1 / 數字負荷程度高」32 題，「4 x 1 / 數字負荷程度低」24 題，「4 x 1 / 數字負荷程度高」36 題，共 112 題。

### 實驗程序

首先，螢幕先呈現十次凝視點 ( 200 ms )，接著出現題目，受試者只要計算出答案便可按鍵作答，最長作答時間為 20000 ms，超過時間則出現下一個題目的十字凝視點。實驗結束後感謝受試者並給予 500 元酬金。實驗中共分成 4 個 session，受試者在每個 session 間可以休息(參見圖 11)。

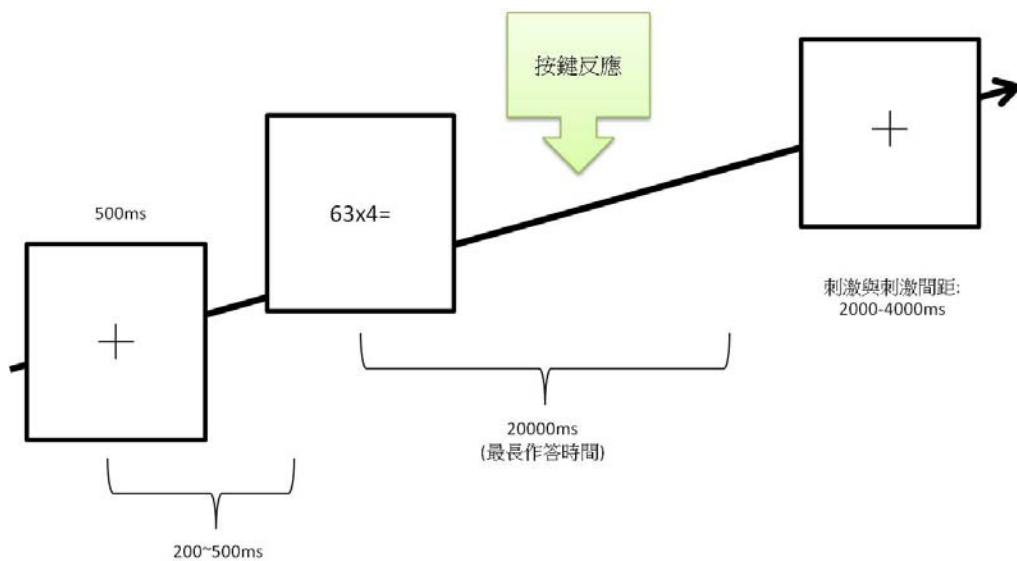


圖 11 乘法題型與數字負荷之 fMRI 實驗程序

## fMRI 影像蒐集

本研究將使用政治大學的功能核磁共振腦照影儀器 (Siemens MAGNETOM Skyra 3T)。解剖影像 (T1) 將使用 1x1x1 mm 的高解析度取得。功能性核磁共振 T2\* 影像將使用 EPI 序列掃描程序 (echo-planar imaging sequence) 取得。其他參數值設定如下：TR=2000 ms; TE= 35 ms; flip angle = 90°; slice thickness = 3 mm; matrix size = 64x64; FOV = 192x192 mm。

## 肆、研究結果

### 乘法心算能力、策略選擇與工作記憶及數感關係之行為實驗

本實驗研究結果將依序報告乘法心算作業、概數判斷作業以及工作記憶作業的結果 (反應時間及正確率); 然後再報告這幾項作業彼此之間的相關性。接著進一步分析乘法心算作業中參與者的在執行乘法心算時的策略表現。再將依據參與者的乘法心算表現, 分成高表現組及低表現組, 比較高低表現組的策略運用在不同難度的題目中的分布。

## 各項作業的正確率與反應時間

### 乘法心算作業

乘法心算作業的刺激材料依題型（2x1、3x1、4x1 及 2x2）及數字負荷程度（easy 及 difficult）而分，共有八種。受試者在各題型的正確率（圖 12）及正確解題之反應時間（圖 13）之平均值見表 3。因此作業為 4x2 之二因子受試者內設計，隨後進行正確率之完全相依設計二因子變異數分析，發現題型與數字負荷程度兩自變項之主要效果皆達顯著，題型變項上  $F(3,138) = 87.346$ ， $p < .001$ ；數字負荷變項上  $F(1,46) = 65.333$ ， $p < .001$ ；兩變項之間有交互作用， $F(3,138) = 10.564$ ， $p < .001$ 。

表 3 乘法心算作業之正確率與反應時間表

Type			2x1	3x1	4x1	2x2
Accuracy	Easy	Mean	0.94	0.93	0.85	0.64
		SE	0.004	0.004	0.005	0.009
	Difficult	Mean	0.90	0.80	0.61	0.56
		SE	0.004	0.006	0.010	0.009
	total	Mean	0.92	0.86	0.73	0.60
		SE	0.003	0.004	0.006	0.008
Reaction Time (sec)	Easy	Mean	4.64	8.07	15.50	31.45
		SE	0.081	0.121	0.308	0.829
	Difficult	Mean	8.55	18.67	33.30	40.79
		SE	0.143	0.344	0.701	0.842
	total	Mean	6.54	12.87	23.04	35.78
		SE	0.102	0.207	0.394	0.727

註：SE 為平均標準誤。

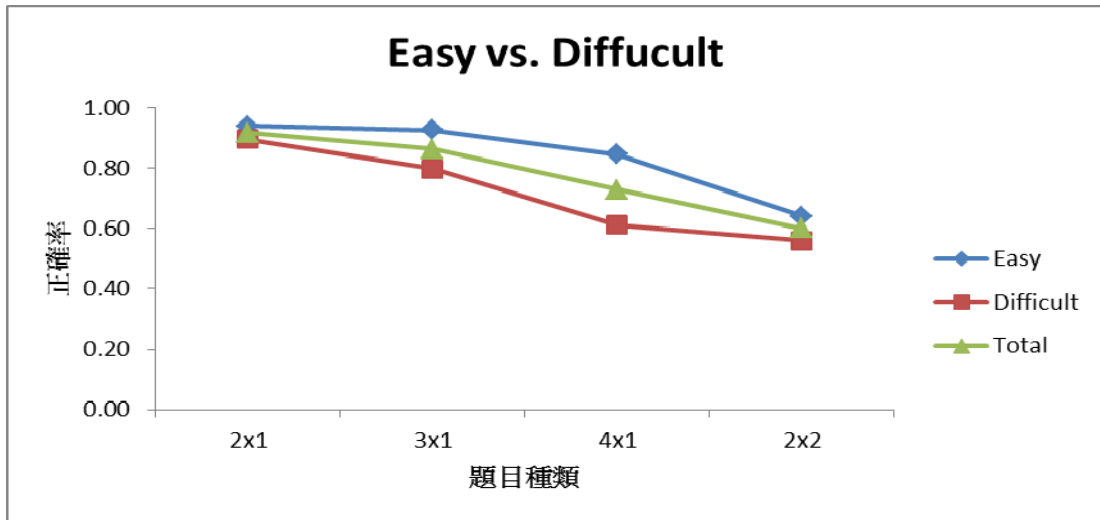


圖 12 乘法心算作業中數字負荷難易度與正確率之關係圖

進一步分析單純主要效果，在數字負荷的效果上，2x1 題型中數字負荷不同對正確率沒有影響， $F(1,184) = 2.815$ ， $p = .120$ ；在 3x1、4x1、2x2 則有差，3x1： $F(1,184) = 23.753$ ， $p < .001$ ，4x1： $F(1,184) = 77.241$ ， $p < .001$ ，2x2： $F(1,184) = 9.218$ ， $p < .005$ ，數字負荷高的題目之正確率都比較低。

在題型效果上，數字負荷低之簡單題中，題型類別對正確率有影響， $F(3,276) = 49.000$ ， $p < .001$ ，其中 2x1 與 3x1 之正確率比 4x1、2x2 的正確率高，4x1 題型之正確率比 2x2 高，2x1 與 3x1 之正確率沒有差異；在數字負荷較高的難題中，題型亦有影響， $F(3,276) = 63.023$ ， $p < .001$ ，2x1 之正確率顯著高於 3x1、4x1、2x2 題型，而 3x1 之正確率也高於 4x1 及 2x2，4x1 題型與 2x2 題型之間之正確率則無顯著差異。

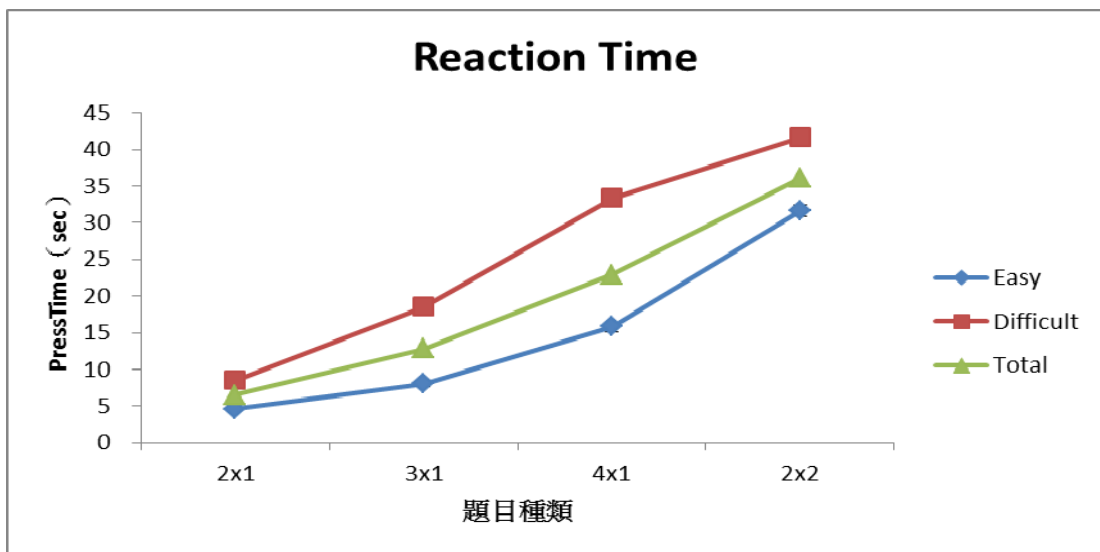


圖 13 乘法心算作業中數字負荷難易度與反應時間之關係圖



在受試者正確解題之反應時間上，亦同樣的進行完全相依設計二因子變異數分析。同樣的發現題型與數字負荷程度兩自變項之主要效果皆達顯著，題型變項上  $F(3,138) = 126.921, p < .001$ ；數字負荷變項上  $F(1,46) = 140.166, p < .001$ ；；兩變項之間有交互作用， $F(3,138) = 15.287, p < .001$ 。

進一步分析單純主要效果，數字負荷程度對所有的題型皆有影響， $2 \times 1: F(1,184) = 5.964, p < .05$ ； $3 \times 1: F(1,184) = 44.110, p < .001$ ， $4 \times 1: F(1,184) = 132.475, p < .001$ ， $2 \times 2: F(1,184) = 39.737, p < .001$ ，在所有的題型中受試者解題所花的時間，在數字負荷高的題目皆比同題型但數字負荷低的多。在題型效果上，數字負荷低之簡單題中，題型類別對反應時間有影響， $F(3,276) = 74.172, p < .001$ ， $2 \times 1$  和  $3 \times 1$  所花時間比  $4 \times 1$  及  $2 \times 2$  短， $4 \times 1$  題型之反應時間也比  $2 \times 2$  少；在數字負荷較高的難題中，題型亦有影響， $F(3,276) = 114.732, p < .001$ ， $2 \times 1$  題型之反應時間顯著低於  $3 \times 1$ 、 $4 \times 1$  與  $2 \times 2$ ， $3 \times 1$  題目解答速度也比  $4 \times 1$  及  $2 \times 2$  的快， $2 \times 2$  的題目解答所花時間也比  $4 \times 1$  多。

上述結果顯示本研究在乘法心算的選題上，題目的數字負荷度與題型區分大部分是有效的；只有在  $2 \times 1$  題型的難易度的正確率上區分不出來，對受試者而言都數字負荷度都太低，但在反應時間上，依然能將數字負荷程度區分出來。

### 概數判斷作業

在概數判斷作業上，刺激材料的操弄上有數量大小，以及兩色點之數量比例（ $2(2:1)$ 、 $1.33(4:3)$ 、 $1.2(6:5)$ 及  $1.14(8:7)$ ），並控制色點的分布為 area controlled 及 dot-size controlled。而結果呈現上，分成「數量大小」對比於「點之間的比例」以及「色點分布控制」及「點之間的比例」兩種，見表 4 及表 5。

表 4 概述判斷作業之正確率與反應時間 (Dot-Size vs. Area controlled)

		Ratio	1.14	1.20	1.33	2.00
Accuracy	Dot-Size Controlled	Mean	<b>0.66</b>	<b>0.70</b>	<b>0.82</b>	<b>0.97</b>
		SE	0.004	0.005	0.006	0.008
	Area Controlled	Mean	<b>0.63</b>	<b>0.68</b>	<b>0.74</b>	<b>0.93</b>
		SE	0.005	0.005	0.007	0.010
	Total	Mean	<b>0.63</b>	<b>0.68</b>	<b>0.77</b>	<b>0.93</b>
		SE	0.003	0.003	0.004	0.006
Reaction Time (msec)	Dot-Size Controlled	Mean	<b>668.0</b>	<b>665.6</b>	<b>573.7</b>	<b>419.1</b>
		SE	12.95	11.89	9.94	6.78
	Area Controlled	Mean	<b>658.5</b>	<b>639.4</b>	<b>592.7</b>	<b>415.3</b>
		SE	13.05	11.20	11.84	6.02
	Total	Mean	<b>677.4</b>	<b>666.3</b>	<b>595.6</b>	<b>426.1</b>
		SE	12.20	10.53	9.56	5.34

表 5 概述判斷作業之正確率與反應時間 (total dot number)

ratio		1.14		1.2		1.33		2.0	
Dots Size		S	L	S	L	S	L	S	L
Dot Number		15	30	11	22	14	28	15	24
Accuracy	Mean	0.62	0.64	0.68	0.67	0.77	0.76	0.91	0.92
	SE	0.004	0.003	0.004	0.003	0.006	0.006	0.007	0.006
RT	Mean	683.2	661.4	685.5	641.9	592.7	606.9	453.1	409.9
	SE	12.51	12.98	11.51	11.11	11.75	10.59	8.08	7.04

在正確率上，ratio 與 control 之 4x2 因子 F 考驗之統計分析顯示，Dots Size Control 與 Area Control 有差異， $F(1,46) = 23.082$ ， $p < .001$ ；ratio 之間也有差異， $F(3,138) = 198.885$ ， $p < .001$ ，無交互作用（但接近邊緣）， $F(3,138) = 2.645$ ， $p = .052$ 。Area Control 的正確率顯著較 Dots Size Control 的低，而 ratio 越高，正確率越高。

在 ratio 與 total dots number 之 4x2 因子 F 考驗統計分析部分，點的數量並不影響正確率， $F(1,46) = 0.093$ ， $p = .762$ ，只有 ratio 影響正確率， $F(3,138) = 136.160$ ， $p < .001$ ，ratio 越高，正確率越高（見圖 14）。兩變項之間沒有交互作用， $F(3,138) = 1.113$ ， $p = .353$ 。

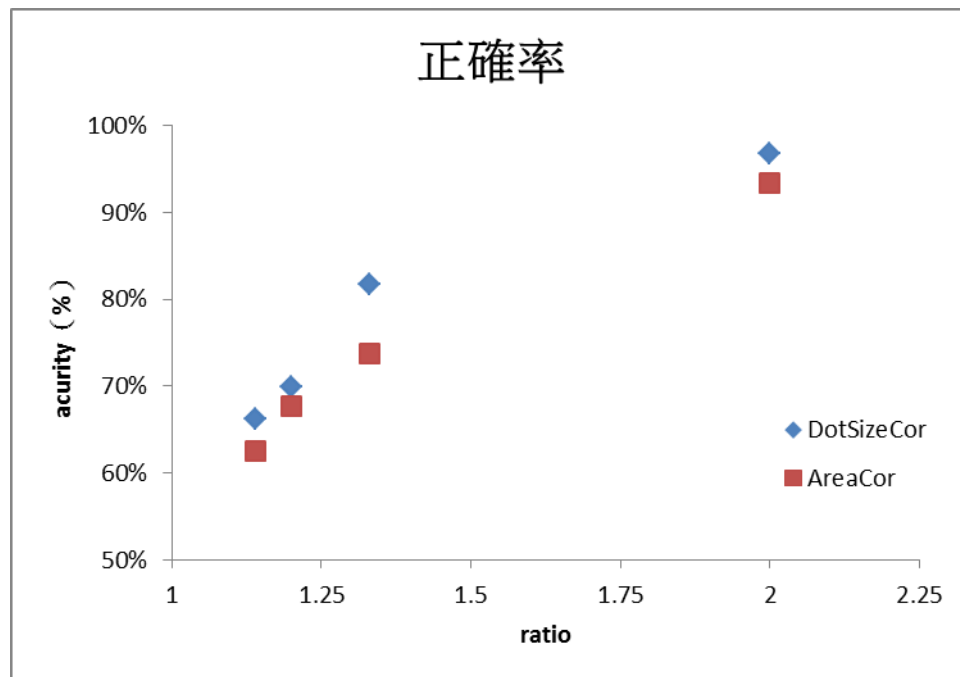


圖 14 概數判斷作業中之正確率圖

在分析完概數判斷作業之正確率後，接續進行反應時間部分的 2x4 相依二因子設計 F 考驗統計分析。在反應時間上，dot size control 與 Area control 之受試者表現沒有差異， $F(1,46) = 0.291$ ， $p = .592$ ；反應時間只與 ratio 有關， $F(3,138) = 38.097$ ， $p < .001$ ，當 ratio 越接近，也就是 ratio 越小，反應時間越長。兩變項之間沒有交互作用， $F(3,138) = 0.73$ ， $p = .537$ 。(參見圖 15)

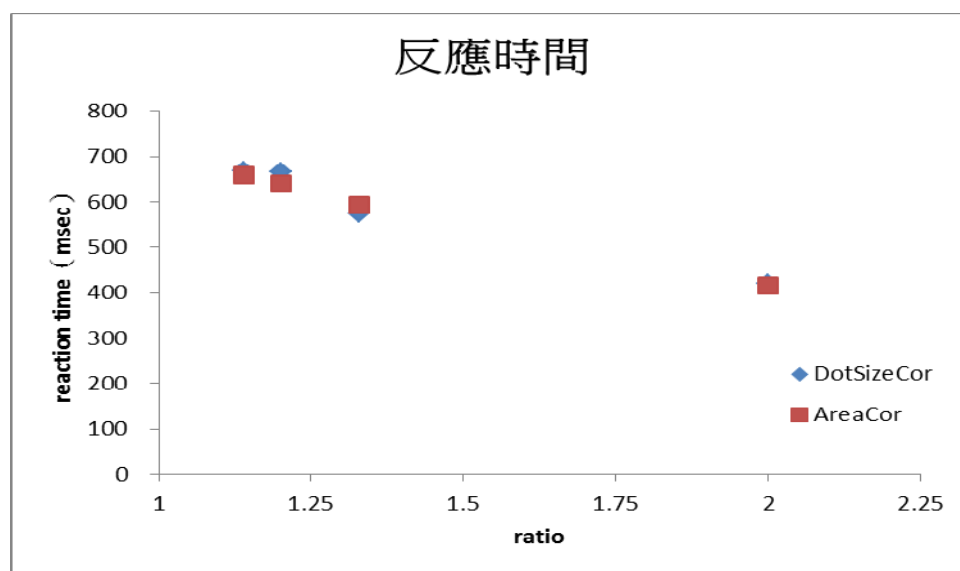


圖 15 概數判斷作業中之反應時間圖

若以點的數量大小與 ratio 進行反應時間之 4x2 相依樣本二因子 F 變異數統計分析，則發現依然只有 ratio 的影響， $F(3,138) = 31.354$ ， $p < .001$ ，也就是 ratio 越小，反應時間越長；而點的數量大小對於反應時間沒有影響， $F(1,46) = 1.240$ ， $p = .272$ ；點數量大小與 ratio 之間無交互作用， $F(3,138) = 0.918$ ， $p = .437$ 。

### 工作記憶作業

在工作記憶作業中，本研究共執行了四種工作記憶的作業，分別為記憶更新作業 (MU)、運作廣度作業、句子廣度作業以及空間短期記憶作業 (SSTM)。其中運作廣度作業中受試者的必須要做的判斷有兩個，一個是判斷數學方程式是否正確，另一個則是必須依序回憶出題目中出現的字母，前者為稱作運作廣度作業中的運算判斷 (OSpt)，後者運作廣度記憶表現 (OS)。在句子廣度作業部分，也分成句子判斷 (SSpt) 跟句子廣度記憶 (SS) 兩部分。四個作業共有六種正確率的結果 (見表 6)。六種結果彼此之間的相關性見圖 16，MU 與 OS、SS 之間彼此呈現高度正相關，OSpt 與 SSpt 彼此有高正相關，SSTM 與其他五種皆無關。

表 6 四種工作記憶作業之正確率

	WM	MU	OS	OSpt	SS	SSpt	SSTM
Accuracy	Mean	0.84	0.78	0.93	0.85	0.83	0.88
	SE	0.006	0.005	0.006	0.005	0.005	0.003

註：MU 為記憶更新作業；OS 為運作廣度作業中的廣度記憶表現；OSpt 為運作廣度作業中的運算判斷表現；SS 為句子廣度作業中之廣度記憶表現；SSpt 為句子廣度作業中句子判斷表現；SSTM 為視覺短期記憶作業之表現。

### 乘法心算表現與工作記憶能力、概數感能力之間的相關性

為了解工作記憶能力及領域特殊能力中概數感，與乘法運算之間的關係，本研究將上述共六個實驗的結果，進行彼此之間的正確率及反應時間之相關分析（見圖 16）。

multiplication		Working memory						Approximate numerosity system							
	Accuracy	RT	MU	OS	OSpt	SS	SSpt	SSTM	ND-acc	ND-RT	ND1.14Ac	ND2-Ac	ND1.14RT	ND2-RT	
Accuracy	1		-0.301	0.610	0.327	0.069	0.197	0.142	0.198	0.004	-0.021	-0.044	-0.039	-0.036	-0.251
RT		1	-0.414	-0.380	-0.070	-0.240	-0.181	-0.176	-0.402	0.000	-0.392	-0.339	0.002	0.053	
MU			1	0.549	0.184	0.607	0.268	0.327	0.216	0.048	0.186	0.018	0.076	-0.243	
OS				1	0.109	0.677	0.273	0.025	-0.044	-0.157	-0.011	-0.171	-0.123	-0.261	
OSpt					1	0.139	0.795	-0.108	0.013	0.183	-0.047	-0.011	0.186	0.044	
SS						1	0.372	0.113	0.040	0.014	0.114	-0.115	0.036	-0.155	
SSpt							1	-0.163	0.021	0.274	0.032	-0.027	0.271	0.058	
SSTM								1	0.378	0.034	0.287	0.304	0.070	-0.215	
ND-acc									1	0.247	0.882	0.908	0.252	-0.013	
ND-RT										1	0.245	0.243	0.979	0.511	
ND1.14Ac											1	0.742	0.219	0.036	
ND2-Ac												1	0.241	0.094	
ND1.14RT													1	0.412	
ND2-RT														1	

MU: memory updating  
 OS: operation span  
 OSpt: OS processing task  
 SS: sentence span  
 SSpt: SS processing task  
 SSTM: spatial short-term memory

圖 16 乘法心算表現與工作記憶作業、概數判斷作業表現之相關性

MU 為記憶更新作業；OS 為運作廣度作業中的廣度記憶表現；OSpt 為運作廣度作業中的運算判斷表現；SS 為句子廣度作業中之廣度記憶表現；SSpt 為句子廣度作業中句子判斷表現；SSTM 為視覺短期記憶作業之表現。

結果顯示，工作記憶能力與乘法心算表現之關係中，以記憶更新作業與運作廣度能力與乘法心算較有關係。在記憶更新作業上，此作業之正確率與乘法心算表現有較高的相關性，在正確率上為較高的正相關 ( $r = .61$ )，與反應時間則為中

度負相關 ( $r = -.41$ )。也就是記憶更新作業表現越好，其乘法心算表現則呈現反應時間越短（計算速度越快）且正確率越高。在運作廣度上，此作業之正確率與乘法心算之正確率及反應時間呈現接近於中度相關，在正確率上呈現正相關 ( $r = .33$ )，在反應時間上呈現負相關 ( $r = -.38$ )。也就是運作廣度能力越好，其乘法心算表現則呈現反應時間越短（計算速度越快）且正確率越高。其他之工作記憶能力，如句子廣度及視覺短期記憶，則表現出低度的相關（見圖 15）。

在概數判斷作業表現上，則發現與乘法心算表現之正確率無關 ( $r < .1$ )，但概數判斷作業之正確率與乘法心算之反應時間則呈現中度負相關 ( $r = -.40$ )。也就是當受試者在概數判斷作業中之正確率越高，其在乘法心算作業中之反應時間越快。

### 乘法心算的策略種類

本實驗中依據受試者在乘法心算計算中之口語資料將受試者的策略分成以下三種：專家策略、學校策略以及拆解策略。以 3456 乘以 2 為例，受試者在執行專家策略，口語資料多半會呈現出報告 6、8、10、9、12、6912 等資訊；若採取的策略為學校策略的話，則會報告出 12、10、112、8、912、6、6912 等資料；若是採取拆解策略的話，則口語資料將會可能呈現出 68、6800、112、6912，表示受試者先將 3456 拆解成 3400 及 56，再分別乘以 2 後，把 3400 乘以 2 的結果與 56 乘以 2 的結果相加。以下則是本研究中受試者在乘法心算作業中的表現情形。

### 在乘法作業中不同題目之策略使用情形分佈狀況

在乘法心算作業中，分析 47 受試者在不同題型（2x1、3x1、4x1、2x2）及策略分佈（專家策略、學校策略及拆解策略）的關係，其分佈情形如表 7。在所有題型中，受試者採取專家策略共佔 39.8%，學校策略佔 49.6%，拆解策略佔 10.6%。以不同題型與策略兩個變項所構成的列連表以卡分檢驗分析發現， $\chi^2_{(1)} = 1424.787$ ， $p < .001$ ，達顯著，表示兩個變項之間不相互獨立，有顯著關聯。另參考關聯係數  $phi = .616$ ， $p < .001$ ，亦非常顯著，同卡方檢驗，顯示兩變項之間並不呈現對稱關係。不同的題型使得受試者採取不同策略來解題。

表 7 乘法心算作業中受試者的策略分佈

	ex		sc		sp	
2x1-e	57%		40%		3%	
2x1-d	34%	<b>45%</b>	58%	<b>49%</b>	9%	<b>6%</b>
3x1-e	46%		39%		15%	
3x1-d	30%	<b>38%</b>	59%	<b>49%</b>	11%	<b>13%</b>
4x1-e	42%		41%		17%	
4x1-d	30%	<b>36%</b>	60%	<b>51%</b>	10%	<b>14%</b>
2x2-e	3%		26%		71%	
2x2-d	3%	<b>3%</b>	27%	<b>27%</b>	70%	<b>71%</b>

註：表中的 ex 表專家策略，sc 表學校策略，sp 表拆解策略。2x1、3x1、4x1 及 2x2 為二位數乘以一位數（以此類推）之題目；2x1-e 為二位數乘以一位數題型中屬於數字負荷較低的類型，2x1-d 為二位數乘以一位數題型中數字負荷程度較高的類型（其餘以此類推）。

### 在乘法表現高低者的使用策略之差異

在題目上，已發現受試者會因不同的題型採取不同的策略，因此進一步分析，能力不同的受試者是否會依據題型而有不同的策略偏好。依據受試者的乘法心算表現，以平均值加減一個標準差，將受試者分成高中低三群。高表現群為表現超過平均值加一個標準差之受試者，低表現群則為表現低於平均值減一個標準差之受試者。然後進一步分析乘法表現不同的受試者（高、低群）是否偏好的策略不同。

乘法心算高低表現者之正確率在不同題型之策略分布情形見表 8，比較其不同題型上的策略分佈發現在二位數乘以一位數、三位數乘以一位數以及四位數乘以一位數的題型上，專家策略使用有顯著性，高表現者群顯著相較於低表現者多使用專家策略， $p < .05$ 。在低表現者群則多偏好使用學校策略，在三位數乘以一位數題型上達顯著， $p < .05$ ，在二位數乘以一位數及四位數乘以一位數則在顯著邊緣，分別為  $p = .094$  及  $p = .167$ 。

表 8 乘法心算高低能力在不同題型正確率之策略分布

題型	策略	高能力者正確率 (N=8)	低能力者正確率 (N=9)	漸進顯著性 <sup>a</sup> (雙尾)
2x1	ex	65%	29%	.026*
	sc	26%	67%	.094
	sp	9%	4%	.692
3x1	ex	71%	26%	.022*
	sc	18%	66%	.025*
	sp	11%	8%	.866
4x1	ex	68%	27%	.020*
	sc	20%	66%	.167
	sp	13%	7%	.625
2x2	ex	13%	2%	.426
	sc	8%	38%	.260
	sp	79%	61%	.008**

註：表中的 ex 表專家策略，sc 表學校策略，sp 表拆解策略。2x1、3x1、4x1 及 2x2 為二位數乘以一位數（以此類推）之題目；<sup>a</sup> 曼惠二氏 U 檢定法 (Mann-Whitney U Test)：\* p<.05，\*\* p<.01；高能力者（八名）的整體平均正確率為 91%，低能力者（九名）的整體平均正確率為 63%。

受試者除了在不同題型時會採取不同的策略解題外，能力不同的受試者偏好的策略亦有不同，那採用不同的策略是否會影響反應時間？以下將分析高低受試者在不同題型使用不同策略之正確解題的反應時間。

#### 高乘法表現者在不同難度題目中使用不同策略時所需解題時間不同

高乘法表現者在使用不同策略解答似乎會影響其答題時間，特別是在二位數乘以二位數且高數字負荷題時，拆解策略可大幅縮短反應時間（圖 17）。在低表現者則較無明顯的差別（見表 9）。因不是所有的受試者在每一種題型都有採取不同的策略，各細格之反應時間會有缺值，因此並未進一步執行統計分析。

表 9 高低乘法表現群在不同類型題目下使用不同策略之平均反應時間

反應時間 (sec)		高表現群 (N=8)			低表現群 (N=9)		
題型	數字負荷	ex	Sc	sp	ex	sc	Sp
2x1	Easy	2.6	5.7	7.0	3.3	6.2	14.2
	difficult	4.6	8.3	6.9	10.2	11.0	11.2
3x1	Easy	4.9	9.4	6.0	8.4	11.3	9.6
	difficult	9.8	14.1	23.3	15.6	22.4	14.6
4x1	Easy	9.2	12.7	12.3	14.2	21.0	33.1
	difficult	15.8	30.2	60.9	22.3	44.7	(缺)
2x2	Easy	20.7	21.4	20.3	(缺)	50.2	29.5
	difficult	13.2	24.2	25.6	102.5	50.2	49.0

註：表中的 ex 表專家策略，sc 表學校策略，sp 表拆解策略。2x1、3x1、4x1 及 2x2 為二位數乘以一位數（以此類推）之題目；easy 為同題型中屬於數字負荷較低的類型，difficult 為二位數乘以一位數題型中數字負荷程度較高的類型。

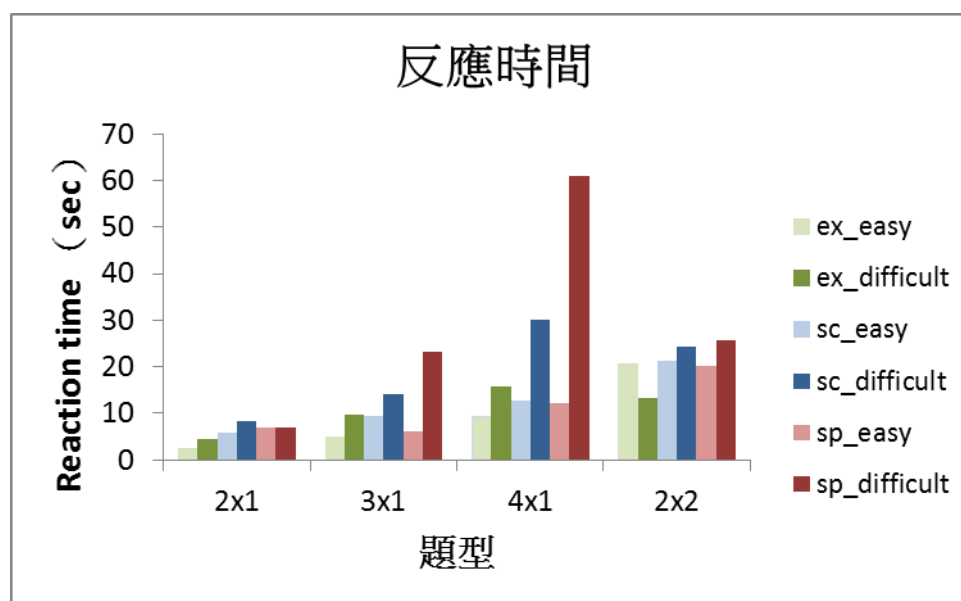


圖 17 高乘法表現者在不同題型下的各策略之平均反應時間

高低乘法心算表現之受試者在解題上依據題型的策略分布及反應時間有所不同，又乘法心算表現與工作記憶中記憶更新作業表現呈現高度相關，因此接著分析當受試者的記憶更新能力不同時，其乘法心算的表現情況。

#### 記憶更新能力高低不同受者之乘法心算策略分布情形

同上述將受試者依據乘法心算表現分成高中低三群的方式，在此則依據受試



者的記憶更新作業表現，將受試者分成記憶更新能力高中低三群，以平均值加減一個標準差來分。高記憶更新能力群為表現超過平均值加一個標準差之受試者，低記憶更新能力群則為表現低於平均值減一個標準差之受試者。然後進一步分析記憶更新能力不同的受試者（高、低群）在乘法心算作業上的表現是否不同。

記憶更新能力不同之受試者乘法心算正確率在不同題型之策略分布情形見表 10，比較其不同題型上的策略分佈發現在三位數乘以一位數、四位數乘以一位數及二位數乘以二位數的題型上，拆解策略使用有顯著性，高記憶更新能力者顯著相較於低記憶能力者常使用拆解策略， $p < .05$ 。

表 10 記憶更新表現高低群在乘法心算之策略分佈

題型	策略	高 MU 者正確率 (N=4)	低 MU 者正確率 (N=8)	漸進顯著性 (雙尾) <sup>b</sup>
2x1	ex	46%	31%	.348
	sc	24%	58%	.674
	sp	21%	3%	.863
3x1	ex	28%	18%	.298
	sc	33%	61%	.061
	sp	33%	3%	.005**
4x1	ex	20%	14%	.364
	sc	26%	41%	.306
	sp	40%	1%	.004**
2x2	ex	0%	0%	1.000
	sc	8%	16%	.716
	sp	66%	24%	.013*

註：表中的 ex 表專家策略，sc 表學校策略，sp 表拆解策略。2x1、3x1、4x1 及 2x2 為二位數乘以一位數（以此類推）之題目；<sup>b</sup> 曼惠二氏 U 檢定法 (Mann-Whitney U Test)：\*  $p < .05$ ，\*\*  $p < .01$ ；高 MU 者（四名）的整體平均正確率為 86%，低 MU 者（八名）的整體平均正確率為 67%。

### 乘法心算表現群及記憶更新能力群之策略分布比較與反應時間差異

因高低乘法心算表現群與高低記憶更新能力群之策略選擇有差異，乘法心算表現不同之受試者策略分布有所不同，記憶更新能力不同之受試者彼此之間之策略分布亦有不同，那這兩分類的各群之策略分布是否有差異？以下將比較高中低乘法心算表現群與高中低記憶更新能力群，兩兩之間的差異，例如：高乘法表現與高記憶更新能力之間策略分布情況。

表 11 以不同方式區分高低群之策略分布情形

	Type	以乘法表現區分			以記憶更新能力區分			漸進顯著性 <sup>a</sup> (雙尾)
		ex	sc	sp	ex	sc	Sp	
高	2x1	<b>65%</b>	26%	9%	<b>53%</b>	26%	21%	.020*
	3x1	<b>71%</b>	18%	11%	31%	<b>35%</b>	<b>34%</b>	.000**
	4x1	<b>68%</b>	20%	13%	24%	33%	<b>44%</b>	.000**
	2x2	13%	8%	<b>79%</b>	0%	13%	<b>88%</b>	.000**
中	2x1	45%	<b>50%</b>	5%	48%	<b>48%</b>	4%	.566
	3x1	33%	<b>52%</b>	15%	43%	<b>45%</b>	13%	.002**
	4x1	30%	<b>54%</b>	16%	41%	<b>47%</b>	12%	.000**
	2x2	0%	29%	<b>71%</b>	4%	24%	<b>72%</b>	.000**
低	2x1	29%	<b>67%</b>	4%	31%	<b>67%</b>	3%	.608
	3x1	26%	<b>66%</b>	8%	22%	<b>76%</b>	3%	.035*
	4x1	27%	<b>66%</b>	7%	19%	<b>77%</b>	4%	.062
	2x2	2%	38%	<b>61%</b>	0%	44%	<b>56%</b>	.141

註：使用的策略百分比高於或等於 50% 的為粗體；介於 33.3% 及 50% 之間的為斜線；低於 33.3% 的為淺灰色字體。<sup>a</sup>Person 卡方檢定：\* p<.05，\*\* p<.01

統計不同分類之不同群之策略分布情況後（表 11），進行皮爾森卡方檢定後發現，高乘法表現與高記憶更新能力群彼此之間的策略選擇差異很大，在各題型中其策略選擇情況皆有所不同，高乘法表現者常用專家策略，高記憶更新能力群則多使用拆解策略。在中間組別，中等乘法心算表現組較常使用學校策略，而中等記憶更新組平均使用專家策略及學校策略。在低乘法心算表現組及低記憶更新組織間，則僅在 3x1 題型上略有差異，低記憶更新組使用拆解策略的比例較低。

因高低乘法心算表現群與高低記憶更新能力群之策略選擇有差異，而在反應時間上，乘法心算表現不同之受試者反應時間有所不同，記憶更新能力不同之受試者彼此之反應時間亦有不同，這兩分類的高低群差異，是差在哪裡？以下將比較高低乘法心算表現群之反應時間差，以及高低記憶更新能力群之反應時間差。因為在乘法心算低表現群以及低記憶更新能力群中，有許多值缺漏，缺少受試者在 2x2 題型上使用拆解策略並正確解答，而無法獲得反應時間，因此不比較在 2x2 的表現，僅就 2x1、3x1 及 4x1 的表現結果來分析(參見圖 18)。

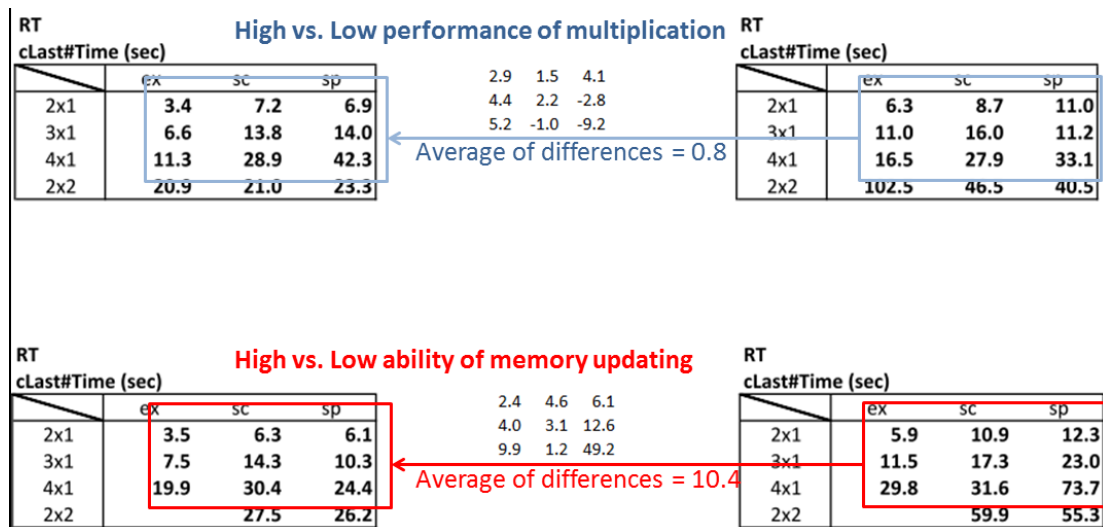


圖 18 不同分類之高低群反應時間差異比較

結果發現乘法心算表現高低群的反應時間差異平均值，只有 0.8 秒，而在記憶更新能力高低群的反應時間差異平均值卻高達 10.4 秒。似乎記憶更新能力不足時，會嚴重影響受試者的反應時間。

### 含 5 題目之特殊效應

因本研究的目的之一是為了未來研究篩選適合的刺激材料，因此必須檢測各變項裡是否還有其他混淆因子會影響刺激材料的一致性。再考慮各種可能性後，發現含 5 的題目可能具有特殊效應，因此進一步分析刺激材料中「含 5 的題目」與「不含 5 的題目」之間是否有差異。在反應時間的分析上，題型與「題目中是否含 5」進行 4x2 相依重複量數二因子變異數分析，發現有交互作用，進一步分析單純主要效果發現，在 2x1 和 2x2 的題型上，含 5 的題目之反應時間顯著比不含 5 的反應時間快，但在 3x1 和 4x1 的題型上則無顯著差異(參見圖 19)。

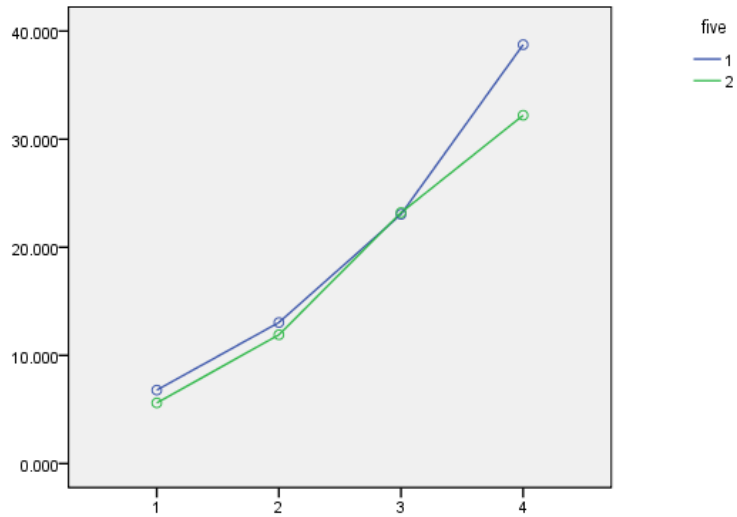


圖 19 含 5 與不含 5 題目之各題型之反應時間  
 縱軸為反應時間，單位為秒；橫軸為題型類別，1~4 分別為 2x1、3x1、4x1 及 2x2 題型；藍色線為不含 5 之題目，綠色線為含 5 之題目。

在正確率的分析上，僅題型因子有顯著，至於「是否含 5」這個因子無顯著效果，即便是將 2x1、3x1、4x1 及 2x2 四種題型分開進行兩兩之間之平均數 T 考驗，含 5 與不含 5 因子在這四種題型下均無顯著效果。因此題目中是否含 5 不並影響正確率，僅在部分題型上影響反應時間，有含 5 之題目計算速度較快(參見圖 20)。

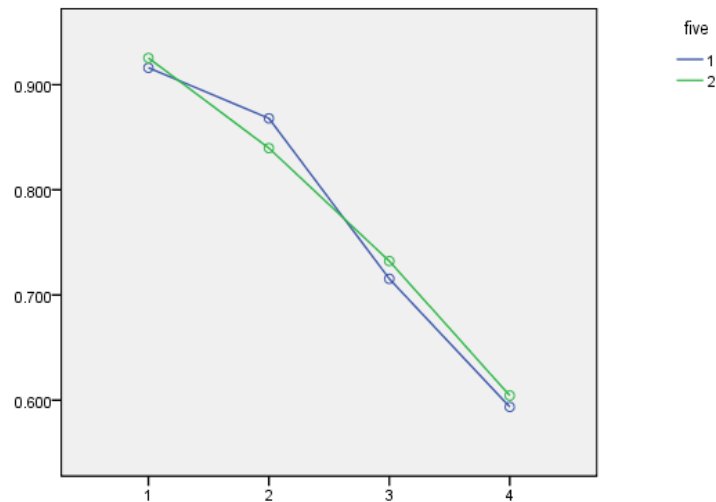


圖 20 含 5 與不含 5 題目之各題型之正確率  
 縱軸為正確率；橫軸為題型類別，1~4 分別為 2x1、3x1、4x1 及 2x2 題型；藍色線為不含 5 之題目，綠色線為含 5 之題目。

## 乘法眼動實驗

### 正確率與反應時間

乘法眼動實驗正確率與反應時間之平均值與標準差列於表 12。在正確率分析上，3(題型)×2(數字負荷程度)重複測量變異數分析(repeated measure ANOVA)結果顯示，在主效果上「題型」變項以及「數字負荷程度」變項及對正確率皆有影響並達顯著(見圖 21)，在題型變項上  $F(2,58)=17.272, p<.001, \eta^2=.373, F(1,29)=32.694, p<.001, \eta^2=.530$ ；且有交互作用， $F(2,58)=4.060, p<.005, \eta^2=.123$ 。進一步進行事後考驗檢視簡單主要效果(simple main effect)在題型變項下之數字負荷程度的影響，結果顯示除了「2 位數 x1 位數」之數字負荷程度沒有差異外， $p=.120$ ，「3 位數 x1 位數」及「4 位數 x1 位數」上，數字負荷程度皆對正確率造成影響，困難題之正確率顯著低於簡單題， $p<.005$ 。在數字負荷程度變項下的題型效果，顯示簡單題下之題型效果不明顯， $p=.098$ ，數字負荷大時題型變化對正確率有影響， $p<.001$ ，在困難題中，「4 位數 x1 位數」之正確率顯著小於「3 位數 x1 位數」及「2 位數 x1 位數」。

表 12 乘法眼動實驗正確率與反應時間之平均值與標準差 (30 人)

		題型		
		2 位數 x1 位數	3 位數 x1 位數	4 位數 x1 位數
正確率	數字負荷程度			
	簡單	0.93(0.097)	0.91(0.099)	0.86(0.179)
	困難	0.87(0.129)	0.80(0.191)	0.66(0.194)
反應時間 (sec)	簡單	4.02(1.190)	6.35(1.993)	12.11(4.535)
	困難	6.65(2.341)	12.99(4.835)	21.56(9.721)

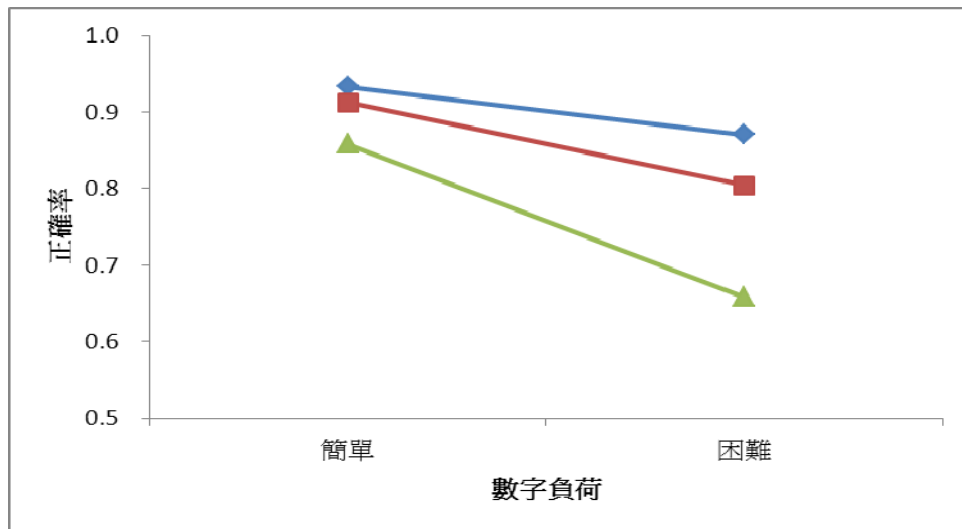


圖 21 乘法眼動實驗之正確率

在反應時間分析上，3（題型）x2（數字負荷程度）重複測量變異數分析（repeated measure ANOVA）結果顯示，在主效果上「題型」變項以及「數字負荷程度」變項及對正確率皆有影響並達顯著（見圖 22），在題型變項上  $F(2,58)=116.644, p<.001, \eta^2=.801$ ， $F(1,34)=83.744, p<.001, \eta^2=.743$ ；且有交互作用，

$F(2,58)=19.962, p<.001, \eta^2=.408$ 。進一步進行事後考驗檢視簡單主要效果

（simple main effect）在題型變項下之數字負荷程度的影響，結果顯示無論何種題型，數字負荷程度對反應時間皆有影響， $p<.001$ ，困難題之反應時間顯著長於簡單題。而在數字負荷程度變項下的題型效果，顯示無論是在簡單題還是困難題，題型變化對反應時間皆有影響， $p<.01$ ，「4 位數 x1 位數」之反應時間長於「3 位數 x1 位數」及「2 位數 x1 位數」，「3 位數 x1 位數」亦長於「2 位數 x1 位數」。

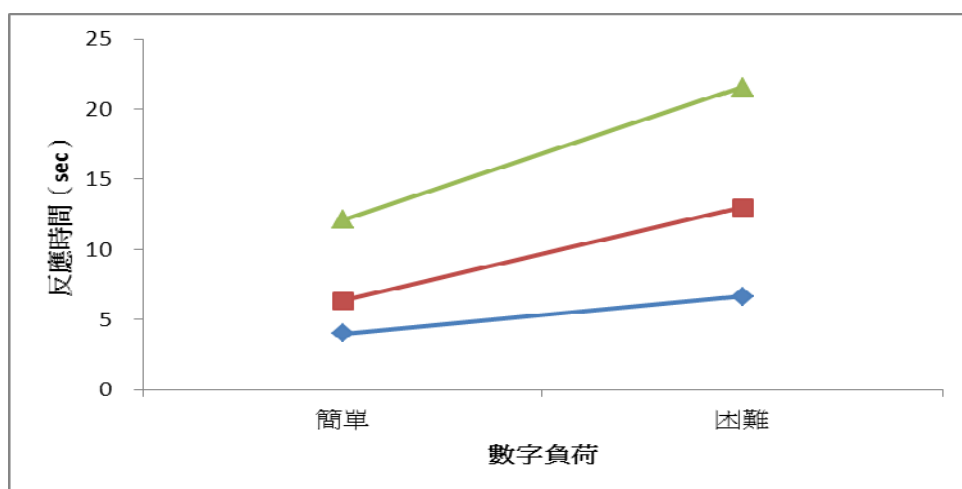


圖 22 乘法眼動實驗之反應時間

為了進一步檢視題型與數字負荷程度對於認知負荷的影響，本研究利用眼動儀觀察在乘法運算時的各項眼動指標，以確定這些刺激材料在認知負荷上是否呈現穩定的變化。因為過去的研究顯示，各項眼動指標中以瞳孔縮放程度對於認知負荷的變化最為敏感，因此本研究將以瞳孔縮放程度的結果作為最後篩選刺激材料的依據。以下是各項眼動指標的結果。

## 各項眼動指標

本研究在乘法眼動實驗中檢視的各項眼動指標共計有五種，包括常見的平均凝視時間長短（average fixation duration）、平均凝視次數（fixation numbers）、平均第一凝視點停留時間（first fixation duration）和平均第二凝視點停留時間（second fixation duration）以及對認知負荷最為敏感的瞳孔縮放變化（pupil dilations），見圖 23 至圖 29。

以「平均凝視時間」為依變項，進行 3 ( 題目形式：2\*1 / 3\*1 / 4\*1 ) x 2 ( 數字負荷：高 / 低 ) 的二因子完全受試者內變異數分析。題目形式的主效果、數字負荷的主效果，以及題目形式 x 數字負荷的交互作用均無顯著，數值分別為  $F(2,58)=2.37, p=.102$  與  $F(1,29)=0.02, p=.887$ ，交互作用部分為  $F(2,58)=1.16, p=.321$ ，見圖 23。

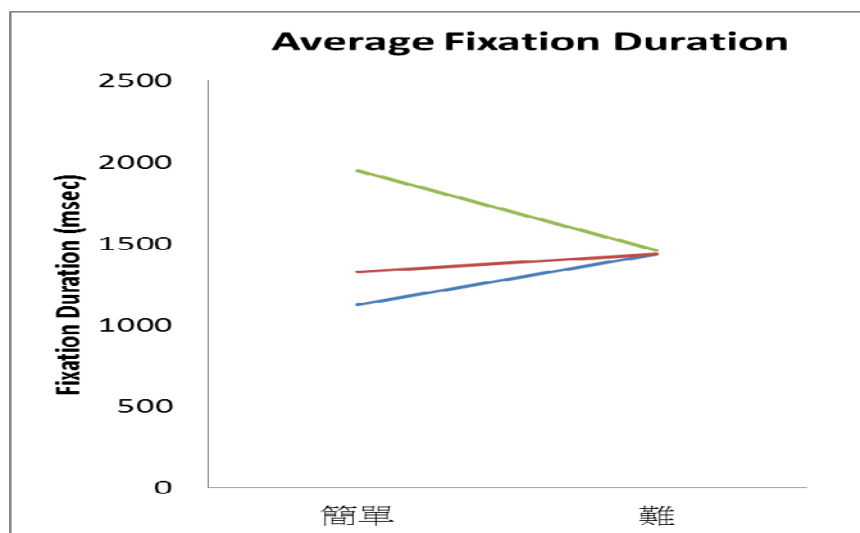


圖 23 乘法眼動實驗之平均凝視時間

以「凝視點數量」為依變項，進行 3 x 2 的二因子完全受試者內變異數分析，發現題目形式的主效果達到顯著 ( $F(2, 58) = 10.45, p < .001$ )，事後比較顯示「4x1」的凝視點數量顯著大於「2x1」 ( $t(29) = 3.54, p < .001$ )，且「3x1」也顯著大於「2x1」 ( $t(29) = 6.94, p < .001$ )，「4x1」也顯著大於「3x1」 ( $t(29) = 2.38, p < .05$ )，亦即在凝

視點數量的分析上，「4x1」>「3x1」>「2x1」。數字負荷的主效果達到顯著 ( $F(1, 29) = 12.17, p < .01$ )，顯示數字負荷大組的凝視點數量顯著大於數字負荷低組。題目形式 x 數字負荷的二階交互作用並未達到顯著（見圖 24）。

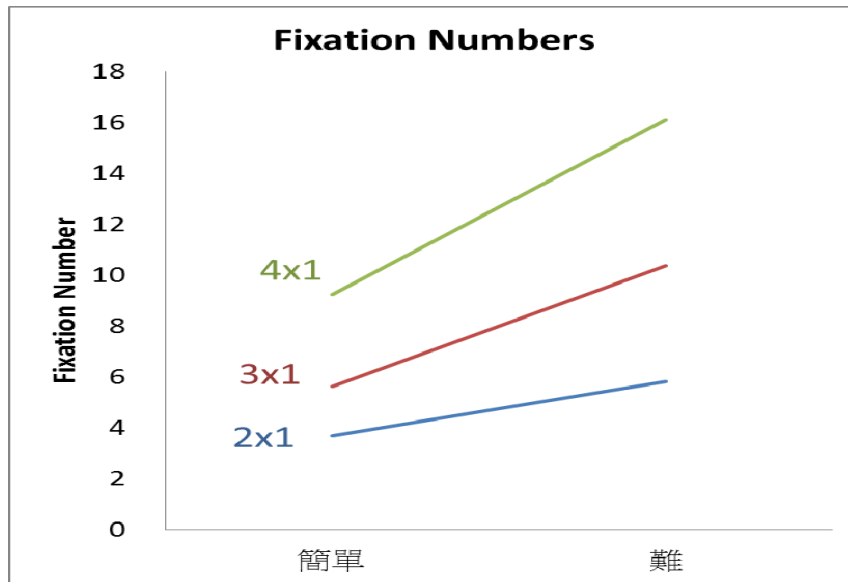


圖 24 乘法眼動實驗之凝視次數

以「第一凝視點時間」為依變項，進行 3 ( 題型 ) x 2 ( 數字負荷程度 ) 的二因子完全受試者內變異數分析。題目形式的主效果、數字負荷的主效果，以及題目形式 x 數字負荷的交互作用均無顯著，數值分別為  $F(2,58)=1.29, p=.283$  與  $F(1,29)=0.94, p=.341$ ，交互作用部分為  $F(2,58)=1.38, p=.260$ ，見圖 25。

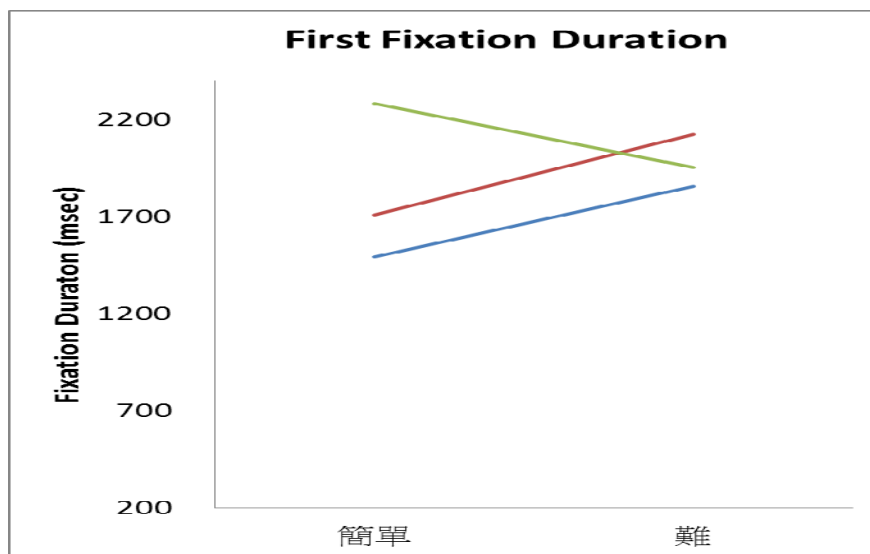


圖 25 乘法眼動實驗之第一凝視點平均停留時間



以「第二凝視點時間」為依變項，進行  $3 \times 2$  的二因子完全受試者內變異數分析，結果顯示題目形式的主效果達到顯著 ( $F(2, 58) = 7.86, p < .001$ )，事後比較顯示「 $4 \times 1$ 」的第二凝視點時間顯著大於「 $2 \times 1$ 」( $t(29) = 3.98, p < .001$ )，且「 $3 \times 1$ 」也顯著大於「 $2 \times 1$ 」( $t(29) = 2.32, p < .05$ )，「 $4 \times 1$ 」也顯著大於「 $3 \times 1$ 」( $t(29) = 2.39, p < .05$ )，亦即在第二凝視點時間的分析上，「 $4 \times 1$ 」>「 $3 \times 1$ 」>「 $2 \times 1$ 」。數字負荷的主效果達到顯著 ( $F(1, 29) = 5.82, p < .05$ )，顯示數字負荷大組的第二凝視點時間顯著大於數字負荷低組。題目形式  $\times$  數字負荷的二階交互作用並未達到顯著。題目形式  $\times$  數字負荷的交互作用圖可見圖 26。

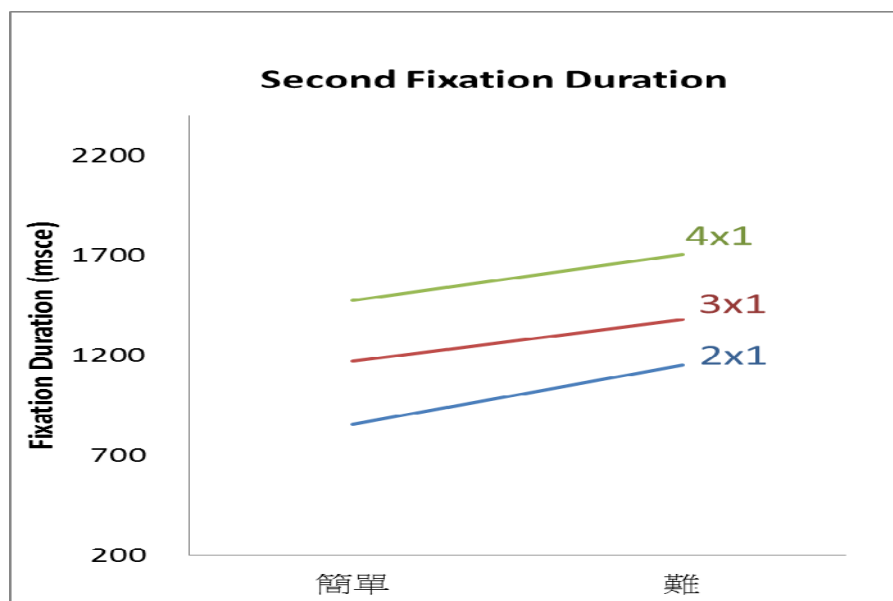


圖 26 乘法眼動實驗之第二凝視點平均停留時間

第一凝視點與第二凝視點之平均位置列於表 13。以相依樣本 T 檢定分析第一凝視點和第二凝視點的水平位置在各類型題目中是否有差異。結果在「 $3 \times 1$  / 數字負荷高」組與「 $4 \times 1$  / 數字負荷高」組，第一凝視點與第二凝視點的位置有顯著差異 (前者： $t(29) = 2.97, p < .01$ ；後者： $t(28) = 3.55, p < .01$ )，其他組別則無此顯著差異。顯示在「 $3 \times 1$  / 數字負荷高」組與「 $4 \times 1$  / 數字負荷高」組中，第一凝視點的水平位置顯著比第二凝視點位置偏右邊，其他組別的第一和第二凝視點的位置並無顯著差別。

以相依樣本 T 檢定分析第一凝視點和第二凝視點的垂直位置在各類型題目中是否有差異。結果在「 $2 \times 1$  / 數字負荷低」組的第一凝視點與第二凝視點的位置有顯著差異 ( $t(27) = 2.13, p < .05$ )，顯示在「 $2 \times 1$  / 數字負荷低」組，第一凝視點的垂直位置顯著低於第二凝視點的垂直位置。其他組別的第一和第二凝視點的垂直位置並無顯著差別。

表 13 第一凝視點與第二凝視點之平均位置

水平位置	2x1_簡單	2x1_難	3x1_簡單	3x1_難	4x1_簡單	4x1_難
第一凝視點	474.78 (67.21)	474.63 (67.00)	474.91 (66.17)	477.81 (66.60)	470.45 (71.85)	472.35 (65.74)
第二凝視點	465.16 (80.66)	464.45 (71.44)	462.74 (77.36)	466.52 (69.7)	464.82 (74.37)	457.91 (70.85)
垂直位置	2x1_簡單	2x1_難	3x1_簡單	3x1_難	4x1_簡單	4x1_難
第一凝視點	342.06 (81.60)	343.97 (94.64)	345.26 (86.53)	342.48 (93.09)	348.41 (79.27)	349.68 (78.29)
第二凝視點	369.34 (97.91)	345.12 (102.22)	336.21 (99.31)	336.79 (86.91)	349.44 (83.58)	353.67 (68.06)

以「平均水平瞳孔 X 軸大小」為依變項，進行 3 ( 題型 ) x 2 ( 數字負荷程度)的二因子完全受試者內變異數分析，結果顯示題型的主效果達到顯著， $F(2, 58) = 5.69, p < .01$ ，事後比較顯示「4x1」的平均水平瞳孔大小顯著大於「2x1」( $t(29)=2.78, p < .01$ )，且「3x1」也顯著大於「2x1」( $t(29)=3.29, p < .01$ )，但「4x1」和「3x1」沒有顯著差別。數字負荷的主效果達到顯著( $F(1, 29) = 5.04, p < .05$ )，顯示數字負荷大組的平均水平瞳孔大小顯著大於數字負荷低組。題目形式 x 數字負荷的二階交互作用並未達到顯著。題目形式 x 數字負荷的交互作用圖可見圖 27。

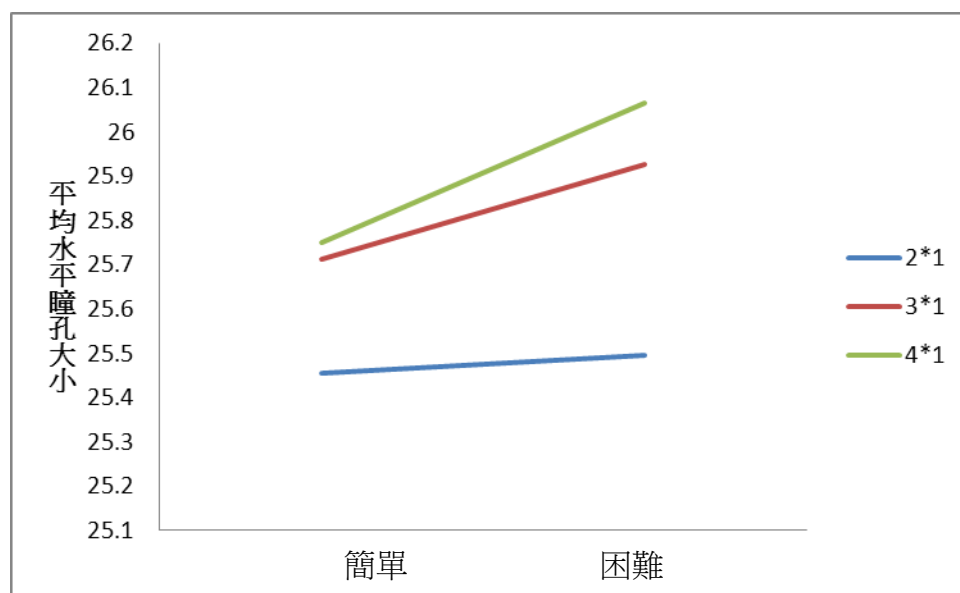


圖 27 乘法眼動實驗之瞳孔 X 軸平均大小

## 瞳孔時序變化分析

從平均凝視瞳孔 X 軸大小顯示，在不同題型與數字負荷程度下，瞳孔大小的確可以顯示出認知負荷之程度，因此進一步分析在時序上瞳孔之縮放。圖 28 為瞳孔 X 軸大小隨著時間上的變化，但因為同一受試者在同一個操弄下的題型之反應時間不同，而不同受試者在同一操弄題型下之反應時間也不同，因此將資料直接堆疊平均處理有理論上的爭議，且不容易顯示出隨著時序上的瞳孔變化。因此進一步將每一個受試者在每一個題目上之瞳孔大小變化以 50 等分來做合併處理，進一步觀察題型與數字負荷程度變化造成受試者之瞳孔隨著時間之變化(見圖 29)，顯示在運算中，受試者之瞳孔似乎隨著運算過程中逐漸擴大，此結果是否達到顯著差異之統計分析技術尚在摸索中。

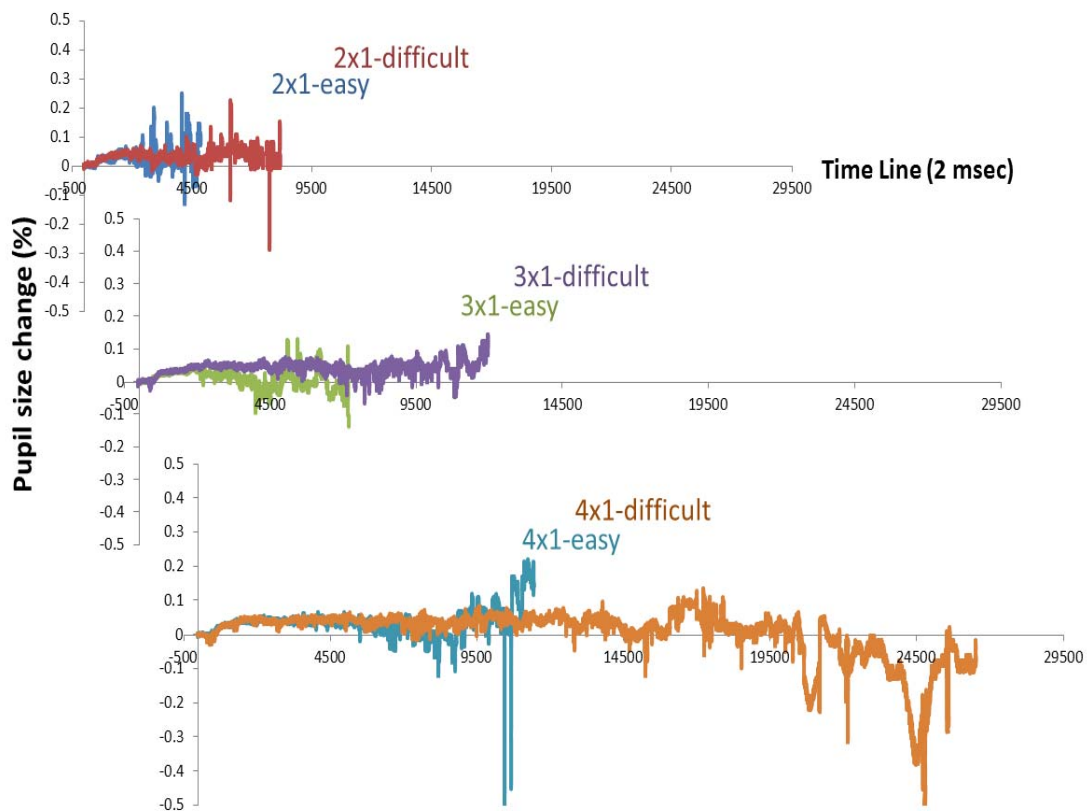


圖 28 乘法眼動實驗之瞳孔隨時間變化

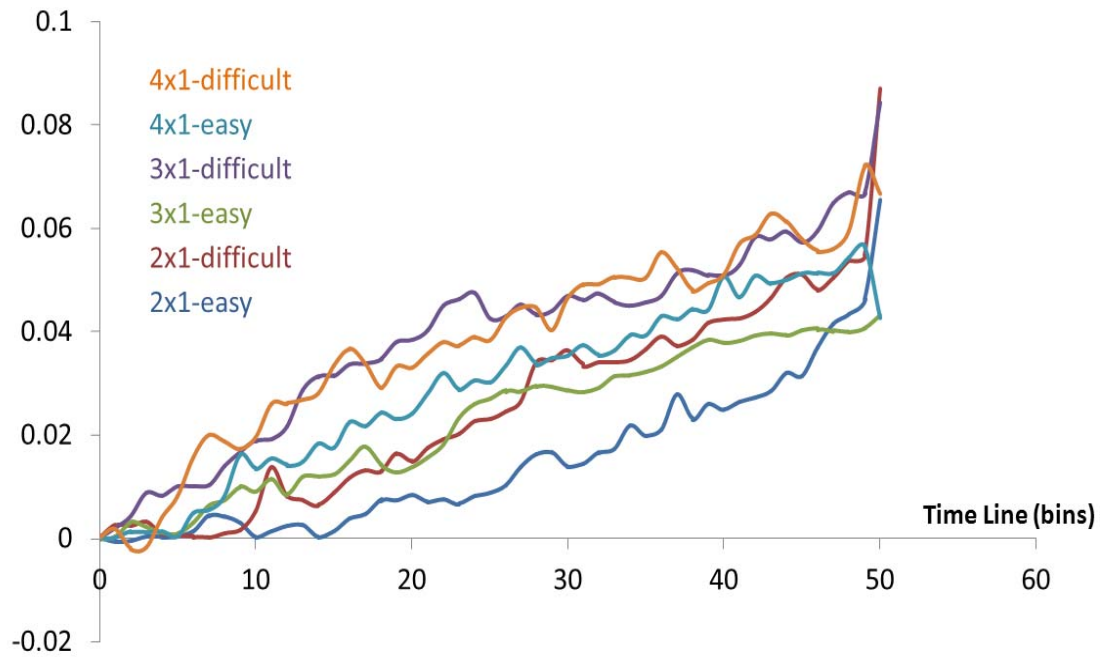


圖 29 乘法眼動實驗 normalize 後之瞳孔隨時間平均變化（切 50 個 bins）

## 小結

從乘法眼動實驗結果顯示，本實驗之刺激材料雖然在題型不同（ $2 \times 1$ 、 $3 \times 1$  及  $4 \times 1$ ）與數字記憶負荷程度不同（數字負荷較低題與數字負荷較高題）之間的變化，在行為資料上（正確率與反應時間）皆能分出差異，但是在眼動指標上，部分數字負荷重疊之題型上（見表一），似乎就沒有明顯的差異，像是  $2 \times 1$  之難題與  $3 \times 1$  簡單題，數字負荷程度皆為 5，在時序上瞳孔變化大小之眼動指標上也顯示出略微重疊，而  $3 \times 1$  之難題與  $4 \times 1$  簡單題，數字負荷程度皆為 7，亦顯示出類似的結果。因此未來若需要進一步在 fMRI 實驗上篩選材料，應考慮數字負荷程度上的值，排除數字負荷相同的題目（雖然題型或難度不同），來避免數字負荷相同可能造成 fMRI 資料分析的對比之效果不足無法得到結果。

## fMRI 實驗

為達成研究目的，依據前述之乘法行為實驗以及乘法眼動實驗之結果，篩選出適合在 fMRI 實驗中進行之刺激材料，並依據受試者在 MRI 掃瞄室中平均適合之實驗時間（約 45 分鐘）設計出 fMRI 實驗。以下將依序說明。

本實驗共收取 29 名參與者之資料，其中 4 位參與者在不同的 session 中正確

答題數未滿 3 題，資料無法列入 fMRI 分析中，因此刪除；1 名參與者之資料因收集資料時因資料損毀，缺乏最後一個 session 之 fMRI 資料，因此未納入分析。最後共分析 24 名參與者之資料，其結果如下：

### 正確率與反應時間

在行為結果上，乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率與反應時間平均值與標準誤列於表 14。以「正確率」為依變項，進行 2 ( 題型 ) x 2 ( 數字負荷程度 ) 的二因子完全受試者內變異數分析。結果顯示題型的主效果達到顯著， $F(1, 92) = 1456.51, p < .001$ ，「2x1」的正確率高於「4x1」。數字負荷的主效果達到顯著 ( $F(1, 92) = 1268.78, p < .001$ )，顯示數字負荷低組的正確率高於數字負荷高組。題目形式 x 數字負荷的二階交互作用亦達到顯著 ( $F(1, 92) = 647.34, p < .001$ )，「4x1」數字負荷低組的正確率高於數字負荷高組的差異，大於在「2x1」的情況下的差異。題目形式 x 數字負荷在正確率上的交互作用參見圖 30。

表 14 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率與反應時間平均值與標準誤

N=24		題型	
Mean(SE)	數字負荷程度	2 位數 x1 位數	4 位數 x1 位數
	簡單	0.94(0.011)	0.89(0.017)
正確率	困難	0.90(0.017)	0.65(0.028)
	簡單	4.73(0.232)	8.53(0.690)
反應時間 (sec)	困難	6.27(0.267)	13.28(0.917)

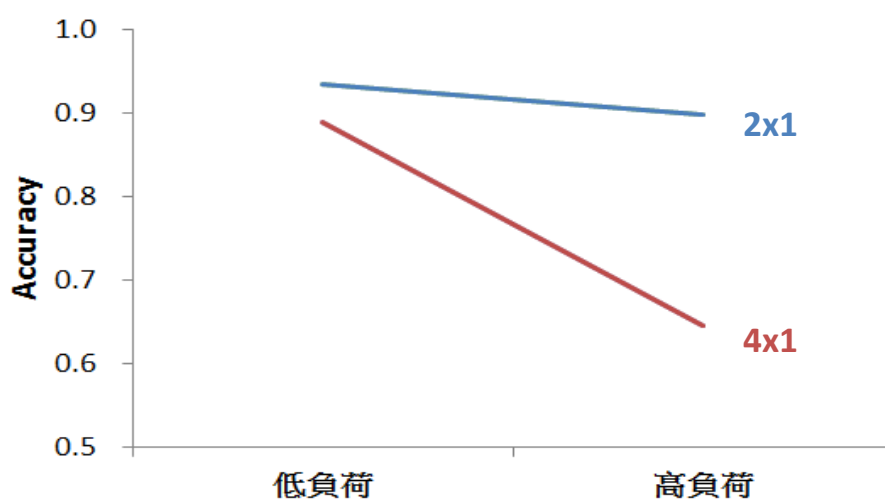


圖 30 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率

以「反應時間」為依變項，進行 2 ( 題型 ) x 2 ( 數字負荷程度 ) 的二因子完全受試者內變異數分析。結果顯示題型的主效果達到顯著， $F(1, 92) = 19.54, p < .01$ ，「 $2 \times 1$ 」的反應時間快於「 $4 \times 1$ 」。數字負荷的主效果達到顯著( $F(1, 92) = 6.42, p < .05$ )，顯示數字負荷低組的反應時間快於數字負荷高組。題目形式 x 數字負荷的二階交互作用則未達顯著( $F(1, 92) = 2.02, p > .05$ )。題目形式 x 數字負荷在反應時間上的交互作用參見圖 31。

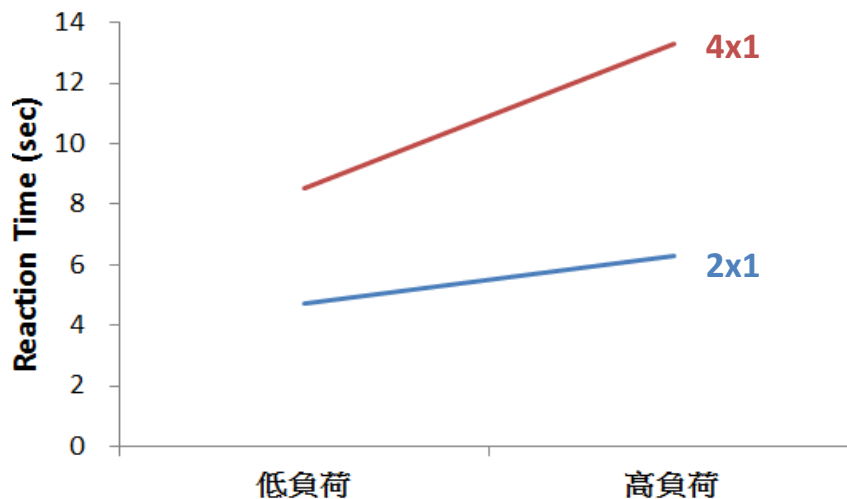


圖 31 乘法題型與數字負荷 fMRI 實驗之正確率

### fMRI 分析結果

本實驗為 2 ( 題型 ) x 2 ( 負荷 ) 之受試者內設計，其中題型分成「兩位數乘以一位數(  $2 \times 1$  )」，以及「四位數乘以一位數(  $4 \times 1$  )」兩種。而每種題型的題目內又根據數字負荷程度分成「數字負荷程度低」和「數字負荷程度高」兩組。本實驗目的主要是要觀察在乘法心算時在不同數字負荷時大腦之處理區域，因此 fMRI 分析中的對比共計分成題型對比 ( 兩種 )、負荷對比 ( 兩種 )、不同題型下的不同負荷對比 ( 四種 )、不同負荷下之不同題型對比 ( 四種 )、高低負荷交叉對比 ( 四種 )、題型與負荷交叉對比 ( 兩種 ) 及線性高低負荷對比 ( 一種 ) 等共七類 19 種對比 ( 對比表如表 15 )。

表 15 乘法題型與數字負荷的 fMRI 實驗之對比分析參照表

		2x1-低負荷	2x1-高負荷	4x1-低負荷	4x1-高負荷
1	2x1-4x1	1	1	-1	-1
2	4x1-2x1	-1	-1	1	1
3	easy-hard	1	-1	1	-1
4	hard-easy	-1	1	-1	1
5	easy_2x1-4x1	1	0	-1	0
6	easy_4x1-2x1	-1	0	1	0
7	hard_2x1-4x1	0	1	0	-1
8	hard_4x1-2x1	0	-1	0	1
9	2x1_easy-hard	1	-1	0	0
10	2x1_hard-easy	-1	1	0	0
11	4x1_easy-hard	0	0	1	-1
12	4x1_hard-easy	0	0	-1	1
13	2x1e-4x1h	1	0	0	-1
14	4x1h-2x1e	-1	0	0	1
15	2x1h-4x1e	0	1	-1	0
16	4x1e-2x1h	0	-1	1	0
17	typexdifficulty1	-1	1	1	-1
18	typexdifficulty2	1	-1	-1	1
19	linearML	-3	-1	1	3

以下只呈現主要觀察的三類各一種共三種，在不同情況下之腦區對比結果， $P_{FEW-corr} < .001$  之結果：

在高負荷減低負荷題的對比

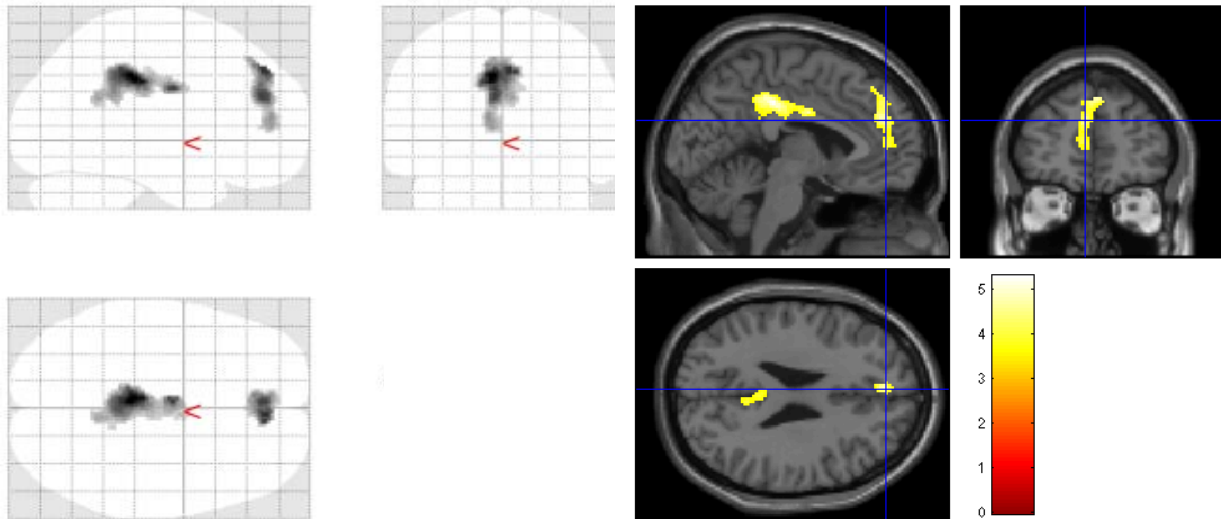


圖 32 fMRI 實驗之高負荷對比低負荷之大腦活化圖

表 16 fMRI 實驗之高負荷對比低負荷之腦區位置表 ( $k=412$ )

**Statistics:  $p$ -values adjusted for search volume**

set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm		
$p$	$c$	$p_{FWE-corr}$	$q_{FDR-corr}$	$k_E$	$p_{uncorr}$	$p_{FWE-corr}$	$q_{FDR-corr}$	$T$	$(Z_w)$	$p_{uncorr}$			
0.000	2	0.000	0.000	900	0.000	0.288	0.947	5.29	4.24	0.000	-6	-30	40
						0.631	0.947	4.73	3.91	0.000	-4	-6	32
						0.951	0.947	4.13	3.54	0.000	0	-22	32
		0.001	0.001	412	0.000	0.564	0.947	4.83	3.97	0.000	4	46	42
						0.640	0.947	4.72	3.90	0.000	-4	46	26
						0.846	0.947	4.39	3.70	0.000	-6	44	34

圖 32 為高負荷題對比低負荷題之大腦活化區域，表 16 顯示高負荷對比低負荷之腦區位置表。結果顯示位在左腦的 cingulate gyrus 的區域([-32, 4, 54]-BA6, [-40, 2, 50]-BA6, [-48, 6, 42]-BA6)以及左腦頂葉的 superior parietal lobule([-28, -56, 58]-BA7)、inferior parietal lobule([-42, -38, 50]-BA40)及 precuneus 區域([-20, -56, 54]-BA7)，在高負荷時比低負荷時來得大， $p_{FWE-corr} < .001$ 。



四乘一題型下高負荷減低負荷的對比

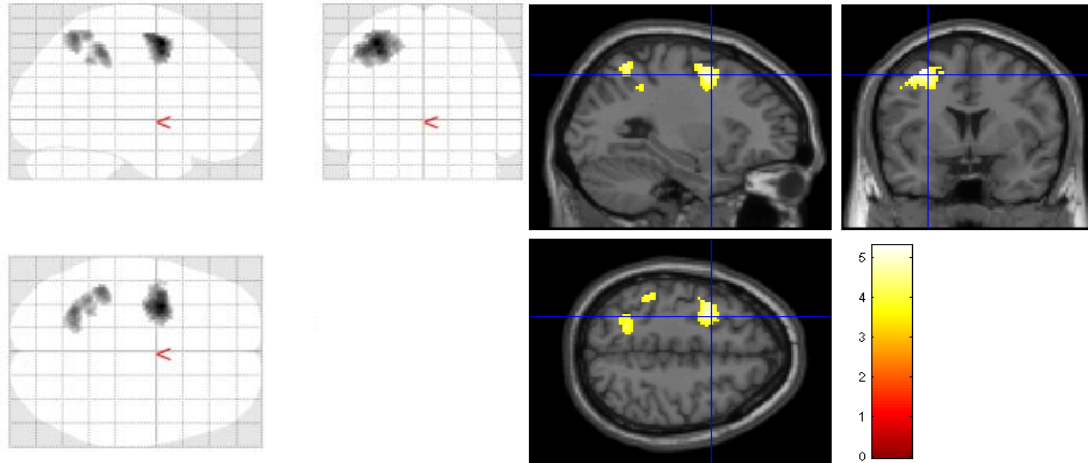


圖 33 fMRI 實驗中四乘一題型下高負荷對比低負荷之大腦活化圖

表 17 fMRI 實驗中四乘一題型下高負荷對比低負荷之腦區位置表 ( $k=369$ )

**Statistics:  $p$ -values adjusted for search volume**

set-level		cluster-level				peak-level					mm mm mm		
$p$	$c$	$P_{FWE-corr}$	$q_{FDR-corr}$	$k_E$	$P_{uncorr}$	$P_{FWE-corr}$	$q_{FDR-corr}$	$T$	$(Z_{\text{max}})$	$P_{uncorr}$			
0.000	2	0.001	0.000	447	0.000	0.286	0.611	5.28	4.23	0.000	-32	4	54
						0.633	0.665	4.71	3.90	0.000	-40	2	50
						1.000	0.918	3.56	3.14	0.001	-48	6	42
		0.002	0.001	369	0.000	0.775	0.665	4.50	3.77	0.000	-28	-56	58
						0.804	0.665	4.45	3.74	0.000	-42	-38	50
						0.908	0.665	4.24	3.61	0.000	-20	-56	54

在行為結果上，高負荷與低負荷正確率的差異，主要顯示在 4x1 的題型中，因此在 4x1 的題型下，高負荷對比低負荷之腦區活化差異應更為清楚。圖 33 為在 4x1 的題型下，高負荷題對比低負荷題之大腦活化區域，表 17 顯示其腦區位置表。在四位數乘以一位數的心算中，正確回答此類型題型中的高負荷題相對於低負荷題，顯示出位在左腦的 Middle Frontal Gyrus ([-6, -30, 40]-BA31, [-4, -6, 32]-BA24, [0, -22, 32]-BA23)、Superior Parietal Lobule、Inferior Parietal Lobule、Precuneus，活化程度較高， $p_{FWE-corr} < .001$ 。

線性高低數字負荷的對比 (load-linear model)

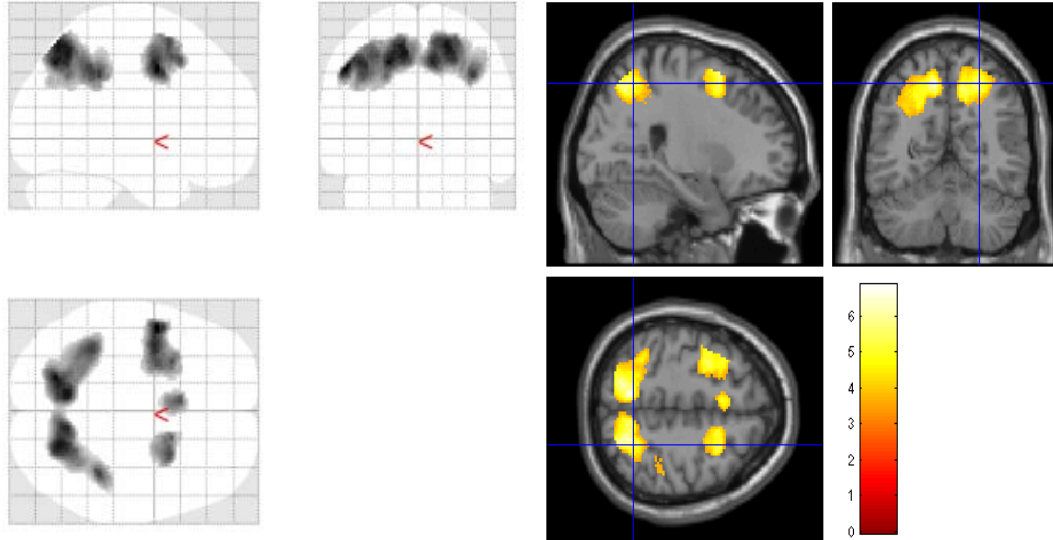


圖 34 fMRI 實驗線性負荷對比大腦活化圖

表 18 fMRI 實驗線性負荷對比腦區位置表 ((k=227))

**Statistics: p-values adjusted for search volume**

set-level		cluster-level				peak-level					mm	mm	mm
P	C	$P_{FWE-CORR}$	$q_{FDR-CORR}$	$k_E$	$P_{UNCORR}$	$P_{FWE-CORR}$	$q_{FDR-CORR}$	T	$(Z_M)$	$P_{UNCORR}$			
0.000	4	0.000	0.000	958	0.000	0.020	0.040	6.87	5.02	0.000	-50	2	42
						0.068	0.040	6.21	4.71	0.000	-40	0	46
						0.204	0.062	5.60	4.40	0.000	-28	2	50
		0.000	0.000	3746	0.000	0.035	0.040	6.56	4.88	0.000	-20	-68	46
						0.039	0.040	6.50	4.85	0.000	-10	-60	52
						0.043	0.040	6.46	4.83	0.000	20	-66	56
		0.000	0.000	484	0.000	0.192	0.062	5.63	4.42	0.000	26	10	56
						0.284	0.079	5.40	4.30	0.000	16	12	50
		0.009	0.003	227	0.001	0.202	0.062	5.60	4.40	0.000	-6	18	48
						0.466	0.120	5.07	4.11	0.000	-4	12	54

因本實驗之題目在不同題型下以及不同負荷下，其數字負荷接近於線性關係。在二乘一低負荷題中最高數字負荷為 4，在二乘一高負荷題中最高數字負荷為 5，在四乘一低負荷題中最高數字負荷為 7，在二乘一高負荷題中最高數字負荷為 9，數字負荷從低到高，因此分析時，將正確答題之題目一數字負荷高低做對比分析。圖 34 為線性負荷對比之大腦活化區域，表 18 顯示其腦區位置表。結果顯示數字負荷高相對於數字負荷低，在左右腦區域的 middle frontal gyrus ([-50, 2, 42]-BA6, [-40, 0, 46]-BA6, [-28, 2, 50]-BA6 及 [26, 10, 56]-BA6) 和 superior frontal gyrus ([-6, 18, 48]-BA8, [-4, 12, 54]-BA6, [16, 12, 50]-BA6)、左腦的 precuneus ([-20,

-68, 46]-BA7, [-10, -60, 52]-BA7)，以及右腦的 superior parietal lobule ([20, -66, 56]-BA7) 有較高的活化。

## 伍、討論

本計畫研究結果大致可以小結如下：

- 一、乘法心算表現與工作記憶作業表現有關，特別是在記憶更新作業表現上，呈現高的正相關，當受試者在記憶更新作業上表現越佳，其在乘法心算作業上的正確率越高且反應時間越快。
- 二、概數判斷之正確率與反應時間的表現與乘法心算正確率表現無關，也與工作記憶各項作業無關。但概數判斷之正確率與乘法心算之反應時間呈負相關，也就是當概數判斷正確率越高者，其乘法心算反應時間越短。
- 三、乘法心算高低表現不同之受試者，在執行乘法心算時的策略偏好不同。乘法心算能力佳者相較於能力較弱者，偏好使用專家策略。
- 四、高低記憶更新表現者，其乘法心算之正確率差異小，使用的策略偏好只在拆解策略上有差異，高記憶更新能力者相較於低記憶更新能力者使用較多的拆解策略。此外，高低記憶更新能力者在乘法心算的反應時間差異相對於高低乘法心算表現者大，顯示高記憶更新能力在處理運算時的速度較快。
- 五、在找尋適合使用於 fMRI 實驗中的刺激材料時，要儘可能的控制刺激材料的視覺呈現的一致性，以及欲控制變項之穩定性，本計畫特選用對認知負荷敏感的瞳孔縮放指標作為刺激材料穩定性測試，結果證明瞳孔縮放指標的確適合用來作為在進行認知負荷相關之 fMRI 實驗前之測試工具。
- 六、乘法心算中不同題型之認知負荷從 fMRI 實驗中發現，在較高負荷的題型中相對於較低負荷的題型中，主要活化差異表現在左右腦之 medial frontal gyrus、superior parietal lobule 以及 inferior parietal lobule 區域，以及左腦之 cingulate gyrus 區域以及 left parietal lobe 的 precuneus 區域，參與者表現出在這些區域的活化程度較高。其中 medial frontal gyrus 被認為並非特別處理數學的區域，但與結構化的公式處理有關。在 superior parietal lobule 與 Precuneus 區域的活化則可能與代數有關。

### 數學運算需要的基本能力

本研究結果顯示，乘法心算表現與工作記憶作業表現有關。工作記憶被定義為在認知的過程中，一個可以同時儲存與處理資訊的系統。這系統依據 Baddeley (2003) 的研究包含了四個部分：中央執行系統、視覺空間模板、語音迴路與事件緩衝器。其中中央執行系統負責調控其他三個部份的活動，並執行訊息的儲存

與處理。本研究中的記憶更新作業中，受試者必須不斷的執行不同訊息的儲存與處理，包含語音的記憶、視覺空間位置的記憶，以及數值的運算處理。因此受試者在此作業的表現與其工作記憶中的中央執行系統的能力特別有關。而本研究的結果顯示，乘法心算過程依賴中央執行系統的能力，乘法心算表現之正確率與記憶更新能力呈現高正相關，反應時間與記憶更新能力呈現負相關，也就是，乘法心算高表現者，不但正確率高，且反應時間也快。另外分析了高低記憶更新能力者在乘法心算上的表現，則發現記憶更新能力對於正確率的影響較小，而其影響多半反映在反應時間上，記憶更新能力較弱者，其反應時間較長。

在概數判斷作業上，過去有些文獻顯示數學成就與概數系統的能力有關 (Attridgea, Gilmorea, & Inglis, 2009; Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008)，但本研究並未發現這樣的結果，和 Iuculano、Moro 及 Butterwoth (2011) 以及 Rouselle 及 Noël (2007) 的研究結果一致。但這樣的結果也有可能是因為本研究之受試者皆來自於國立政治大學之學生，屬於較高的學業成就學生群，而在概數判斷作業上呈現著天花板效應。

整體而言，就「人們學習數學運算需要哪些基本能力支援」此一爭議問題而言，本研究結果支持工作記憶以及執行功能在數學表現扮演較重要的角色；而領域特殊能力，如大數目的概數感則和數學表現較無關係。

### 乘法心算表現、記憶更新能力與題型和策略使用的關係

在策略使用上，依照不同的指標分群，無論是依據乘法心算表現，以及依據記憶更新能力，不同乘法心算表現及不同記憶更新能力之受試者，其策略選擇分布情況皆有所不同。高乘法心算表現之受試者偏好使用專家策略，而高記憶更新能力使用者則多選用拆解策略。在題型上，不同的題型也會影響受試者策略的選擇，在  $2 \times 2$  的題型上，受試者一致的偏好選擇拆解策略。各策略對於答題速度的影響也有不同的影響，從高乘法心算表現受試者的反應時間情況可看出較明顯的趨勢，專家策略之解題速度最快，拆解策略則在不同題型上產生不同的效果，在  $2 \times 1$ 、 $3 \times 1$  及  $4 \times 1$  上無明顯速度優勢，但在  $2 \times 2$  題型上，使用拆解策略則明顯速度較快。類似的情形出現在高記憶更新能力受試者上，記憶更新能力高之受試者多採用拆解策略，而其解題速率相較於低記憶更新能力者快許多。

### 乘法心算中認知負荷與大腦活化之關係

在本計畫之初步分析結果下已知在乘法心算時，不同的數字負荷對心算者的認知負荷會造成影響，主要表現的區域在左右腦之 medial frontal gyrus、superior parietal lobule 以及 inferior parietal lobule 區域，以及左腦之 cingulate gyrus 區域以及 left parietal lobe 的 precuneus 區域。這些區域的高負荷時活化程度較高。此結果支持 fronto-parietal cortical network 在數學計算中扮演重要角色 (Piazza,

Mechelli, Price & Butterworth, 2006)。在認知負荷量大的情況下，尤其是左腦有較大的活化，顯示認知負荷在本作業中主要在精算而非概算。

## 參考文獻

- 蔣大偉 (2001)。由工作記憶角度探討數學障礙兒童的表現。國立中正大學心理學研究所碩士論文 (未出版)。
- 秦麗花 (1995)。國小數學學習障礙兒童數學解題補救教學實施成效之比較研究。國民教育研究集刊，1，225-265。
- 劉柏宏 (2004)。從美國「數學戰爭」看台灣的數學教育。數學傳播，28(4)，3-16。
- Andreassi, J. L. (2000). Pupillary response and behavior. *Psychophysiology: Human Behavior & Physiological Response, 4th ed.* Lawrence Erlbaum Assoc., Mahwah, N.J., pp. 218-233.
- Attridgea, N., Gilmorea, C., & Inglis, M. (2009). Symbolic addition tasks, the approximate number system and dyscalculia. *Proceedings of the British Society for Research into Learning Mathematics day conference*, 29(3).
- Baddeley, A.D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18, 362-365
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.). *Recent advances in learning and motivation* (V. 8, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D., Thomson, N.; Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 575-589.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D., Emslie, H., Kolodny, J., & Duncan, J. (1998). Random generation and the executive control of working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 51(4), 819-852.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, 4(11), 417-423.
- Baddeley, A., Chincotta, D., & Adlam, A. (2001). Working memory and the control of action: evidence from task switching. *Journal of Experimental Psychology. General*, 130(4), 641-657.
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive Functioning as a Predictor of Children's Mathematics Ability: Inhibition, Switching, and Working Memory. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 273.

- Baddeley, A. D. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Review Neuroscience*, 4, 29–39.
- Barth, H., Kanwisher, N., & Spelke, E. (2003). The construction of large number representations in adults. *Cognition*, 86, 201-221.
- Barth, H., Mont, K. L., Lipton, J., Dehaene, S., Kanwisher, N., & Spelke, E. (2006). Nonsymbolic arithmetic in adults and young children. *Cognition*, 98, 199-222.
- Bull, R., Espy, K. A., & Wiebe, S. A. (2008). Short-Term Memory, Working Memory, and Executive Functioning in Preschoolers: Longitudinal Predictors of Mathematical Achievement at Age 7 Years. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 205-228. doi:10.1080/87565640801982312
- Butterworth, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 534-541. doi:10.1016/j.tics.2010.09.007
- Cappelletti, M., Butterworth, B., & Kopelman, M. (2001). Spared numerical abilities in a case of semantic dementia. *Neuropsychologia*, 39(11), 1224-1239.
- Cappelletti, M., Kopelman, M. D., Morton, J., & Butterworth, B. (2005). Dissociations in numerical abilities revealed by progressive cognitive decline in a patient with semantic dementia. *Cognitive Neuropsychology*, 22(7), 771.
- Conrad, R. & Hull, A. J. (1964). Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*. 55, 429–432.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychol Bull*, 104(2), 191, 163.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1983). Individual Differences in Integrating Information between and within Sentences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9(4), 561-84.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual Differences in Working Memory and Reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-66.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science (New York, N.Y.)*, 284 (5416), 970-974.
- Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *J. Cognitive Neuroscience*, 8(1), 47-68.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487.
- Delazer, M., Ischebeck, A., Domahs, F., Zamarian, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C. M., et al. (2005). Learning by strategies and learning by drill--evidence from an

- fMRI study. *NeuroImage*, 25(3), 838-849. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.12.009.
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37(4), 719-725.
- Einhäuser, M., Stout, J., Koch, C., & Carter, O. (2008) Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 105(5):1704-1709.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, 102–134.
- Fry-Hussey, A. (1998). Age, processing speed, working memory, and fluid intelligence in children. *Dissertation Abstracts International: Section B. The Sciences and Engineering*, 58(9-B), 5151.
- Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2000). Assessment of Working Memory in Six- and Seven-Year-Old Children. *Journal of Educational Psychology*, 92(2), 377-90.
- Gathercole, S. E., & St Clair-Thompson, H. L. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745-759.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1-16. doi:10.1002/acp.934
- Geary, D. C., Bailey, D. H., & Hoard, M. K. (2009). Predicting Mathematical Achievement and Mathematical Learning Disability with a Simple Screening Tool. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 265 -279. doi:10.1177/0734282908330592
- Geary, D. C., Bailey, D. H., Littlefield, A., Wood, P., Hoard, M. K., & Nugent, L. (2009). First-Grade Predictors of Mathematical Learning Disability: A Latent Class Trajectory Analysis. *Cognitive Development*, 24(4), 411-429.
- Gentner, D. R. (1988). Expertise in typewriting. In M. T. H. Chi, R. Glaser, and M. J. Farr. (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp. 1-12). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gilmore, C. K., McCarthy, S., & Spelke, E. S. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447, 589-591.
- Gilzenrat, M. S., Nieuwenhuis, S., Jepma, M., & Cohen, J. D. (2010). Pupil diameter tracks changes in control state predicted by the adaptive gain theory of locus coeruleus function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 10, 252–269.

- Girelli, L., & Delazer, M. (1996). Subtraction bugs in an acalculic patient. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 32(3), 547-555.
- Glaser, R. and Chi, M. T. H. (1988). Overview. In M. T. H. Chi, R. Glaser, and M. J. Farr (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp. xv-xxviii). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Granholm, E., Asarnow, R. F., Sarkin, A. J., Dykes, K. L. (1996). Pupillary responses index cognitive resource limitations. *Psychophysiology* 33, 457-461.
- Halberda, J., Mazocco, M. I. M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in nonverbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455, 665-668.
- Hecht, S. A. (2002). Counting on working memory in simple arithmetic when counting is used for problem solving. *Memory & Cognition*, 30, 447-455.
- Henry, L. A. (2001). How does the severity of a learning disability affect working memory performance? *Memory* (Hove, England), 9(4-6), 233-247.
- Hitch, G.J., Towse, J. N., & Hutton, U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 184-198.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Schocke, M., & Delazer, M. (2009). Flexible transfer of knowledge in mental arithmetic --An fMRI study. *NeuroImage*, 44(3), 1103-1112.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Siedentopf, C., Koppelstätter, F., Benke, T., & Felber, S.. (2006). How specifically do we learn? Imaging the learning of multiplication and subtraction. *NeuroImage*, 30(4), 1365-1375.
- Iuculano, T., Moro, R., & Butterworth, B. (2011). Updating Working Memory and arithmetical attainment in school. *Learning and Individual Differences*, In Press, Corrected Proof. doi:16/j.lindif.2010.12.002
- Karatekin, C., Markiewicz, S. W., Siegel, M. A. (2003). A preliminary study of motor problems in children with attention-deficit/ hyperactivity disorder. *Perceptual and Motor Skills*. 97(3 II):1267-1280.
- Krulik, S. K. & Rudnick, J. A. (1989). *Problem solving: A handbook for senior high school teachers*. Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Krutetskii, V.A. (1993). *The psychology of mathematics abilities in school children*. Chicago : University of Chicago Press.
- Kyllonen, P. C., & Christal, R. E. (1990). Reasoning Ability Is (Little More Than) Working-Memory Capacity?! *Intelligence*, 14(4), 389-433.
- Lee, K. M. (2000). Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: a functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia. *Annals of Neurology*, 48(4), 657-661.
- Lee, K.-M., & Kang, S.-Y. (2002). Arithmetic operation and working memory:



- differential suppression in dual tasks. *Cognition*, 83(3), B63–B68.
- Lemera, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41, 1942–1958.
- Lerner, J. W. (2003). *Learning disabilities: theories, diagnosis, and teaching strategies* (9th ed.). Boston, MA: Houghton Mifflin. Boston, MA: Allyn and Bacon.
- Lewandowsky, Oberauer, Yang, & Ecker (2010). A working memory test battery for MATLAB. *Behavior Research Methods*, 42(2), 571-85.
- Logie, R. H., Gilhooly, K. J., & Wynn, V. (1994). Counting on working memory in arithmetic problem solving. *Memory & Cognition*, 22(4), 395-410.
- Marshall, S. P. (2002). The Index of Cognitive Activity: Measuring cognitive workload. In *Proceedings of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants* (pp. 7.5 – 7.9). New York: IEEE.
- Marshall, S. P., Pleydell-Pearce, C. W., & Dickson, B. T. (2003). Integrating psychophysiological measures of cognitive workload and eye movements to detect strategy shifts. In *Proceedings of the Thirth-Sixth Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Los Alamitos, CA: IEEE.
- Mayer, R. E. (1992). *Thinking, Problem Solving, Cognition*. New York: Freeman.
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4(2), 171-196.
- Montojo, C. A., & Courtney, S. M. (2008). Differential neural activation for updating rule versus stimulus information in working memory. *Neuron*, 59(1), 173–182.
- Murray, D.J. (1968). Articulation and acoustic confusability in short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*. 78, 679–684
- Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). The Priming Method: Imaging Unconscious Repetition Priming Reveals an Abstract Representation of Number in the Parietal Lobes. *Cerebral Cortex*, 11(10), 966-974.
- National Research Council. (2001). J. Kilpatrick, J. Swafford, B. Findell, (Eds); Mathematics Learning Study Committee; *Adding It Up: Helping Children Learn Mathematics*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Oberauer, K., Lange, E., & Engle, R. W. (2004). Working Memory Capacity and Resistance to Interference. *Journal of Memory and Language*, 51(1), 80-96.
- Oberauer, K., Schulze, R., Wilhelm, O., & Süß, H. (2005). Working memory and intelligence--their correlation and their relation: comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin*, 131(1), 61-65; author reply 72-75.
- Olton, D. S., & Feustle, W. A. (1980). Hippocampal function required for nonspatial

- working memory. *Experimental Brain Research*, 41(3-4), 380-389.
- Pesenti, M., Thioux, M., Seron, X., & De Volder, A. (2000). Neuroanatomical substrates of arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: a PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 461-479.
- Pesenti, M. (2005). Calculation abilities in expert calculators. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp. 413-430). New York: Psychology Press.
- Piazza, M., & Dehaene, S. (2004). From number neurons to mental arithmetic: the cognitive neuroscience of number sense. *The cognitive neurosciences*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Piazza, M., Giacomini, E., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2003). Single-trial classification of parallel pre-attentive and serial attentive processes using functional magnetic resonance imaging. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 270(1521), 1237-1245.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group. *Science*, 306(5695), 499-503.
- Pinel, P., Dehaene, S., Rivière, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14(5), 1013-1026.
- Porter, G., Troscianko, T., & Gilchrist, I. D. (2007). Effort during visual search and counting: Insights from pupillometry. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60, 211-229.
- Privitera, C. M., Renninger, L. W., Carney, T., Klein, S., & Aguilar, M. (2010). Pupil dilation during visual target detection. *Journal of Vision*, 10(10):3, 1-14, <http://www.journalofvision.org/content/10/10/3>, doi:10.1167/10.10.3.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial imagery task on eye fixations while driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6, 31-43.
- Repovš, G., & Baddeley, A. (2006). A The Multi-component Model of Working Memory: Explorations in Experimental Cognitive Psychology. *Neuroscience*, 139, 5-2.
- Repovš, G., Bresjanac, M. (2006). Cognitive neuroscience of working memory: A prologue. *Neuroscience*. 139(1). 1-3.
- Roland, P. E., & Friberg, L. (1985). Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, 53(5), 1219-1243.
- Rosenberg-Lee, M., Lovett, M., & Anderson, J. R. (2009). Neural correlates of arithmetic calculation strategies. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 9(3), 270-285.

- Rousselle, L., & Noël, M. P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs. non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102, 361–395.
- Schatz, J., Kramer, J. H., Ablin, A., & Matthay, K. K. (2000). Processing speed, working memory, and IQ: A developmental model of cognitive deficits following cranial radiation therapy. *NEUROPSYCHOLOGY-NEW YORK-*, 14(2), 189–200.
- Seyler, D. J., Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2003). Elementary subtraction. *Journal of Experimental Psychology. Learning Memory and Cognition*, 29, 1339–1352.
- Shiffrin, R. M. (1993). Short-term memory: a brief commentary. *Memory & Cognition*, 21(2), 193-197.
- Siegle, G. J., Granholm, E., Ingram R. E., Matt, G. E. (2001). Pupillary response and reaction time measures of sustained processing of negative information in depression. *Biological Psychiatry*, 49, 624-636.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1997). Working memory: a view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33(1), 5-42.
- Spelke, E. S., & Tsivkin, S. (2001). Language and number: a bilingual training study. *Cognition*, 78(1), 45-88.
- Staszewski J. J. (1988). Skilled memory and expert mental calculation. In M. T. H. Chi, R. Glaser, and M. J. Farr. (Eds.), *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Swanson, H. L., & Ashbaker, M. H. (2000). Working Memory, Short-term Memory, Speech Rate, Word Recognition and Reading Comprehension in Learning Disabled Readers: Does the Executive System Have a Role? *Intelligence*, 28(1), 1-30.
- Süß, H.-M., Oberauer, K., Wittmann, W. W., Wilhelm, O., & Schulze, R. (2002). Working memory capacity explains reasoning ability – and a little bit more. *Intelligence*, 30, 261-288.
- Temple, E., & Posner, M. I. (1998). Brain mechanisms of quantity are similar in 5-year-old children and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(13), 7836-7841.
- Thioux, M., Pesenti, M., Costes, N., De Volder, A., & Seron, X. (2005). Task-independent semantic activation for numbers and animals. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 284-290.
- Turner, M.L., & Engle, R.W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28, 127–154.
- Wickelgren, I. (1997). Cognitive Neuroscience: Getting a Grasp on Working Memory. *Science*, 275(5306), 1580-0. doi: 10.1126/science.275.5306.1580.
- Wojciulik, E., & Kanwisher, N. (1999). The generality of parietal involvement in visual attention. *Neuron*, 23(4), 747-764.

## 出席國際學術會議心得報告

計畫編號	NSC 99-2511-S-004-001-MY3
計畫名稱	基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇與大腦認知負荷之研究
出國人員姓名	顏乃欣
服務機關及職稱	國立政治大學心理系教授
會議時間地點	2011 Sep. 30 - Oct. 3, Evanston, Illinois, U.S.A.
會議名稱	9 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroeconomics
發表論文題目	1. <i>The effects of expected value and risk level in a modified IGT: An fMRI study.</i> 2. <i>The risk factor and emotion-decision mechanism in somatic marker hypothesis.</i>

### 一、與會心得摘要

神經經濟學年會為神經經濟領域界之重要學術組織，參與會議的與會者主要為經濟學、神經科學與心理學等相關領域的學者，2011 年的會議議程總共有 3 天，包括了工作坊與正式會議。工作坊的課程，一方面提供神經科學背景知識給社會科學的研究者，另一方面提供經濟學的知識給神經科學的研究者，藉以達到跨領域訓練的目的。另外，今年的大師開講 The Kavli Foundation Plenary Lecture，請到南加大的 Antonio Damasio，講題為 About the neural basis of feeling，介紹與情緒有關的神經機制，其中亦包含其以 Iowa Gambling Task 探討情緒影響決策之經典研究。我由於有進行 Iowa Gambling Task 之相關研究，因此亦特別與其討論相關議題。

在會議期間有八場神經經濟學相關研討會，其中包含 Risk, Valuation, Affect, Social decision making, Learning and choice 等議題；除此之外，年會也安排了壁報論文議程，藉由此安排可提供各地相關領域的學者有深入交流討論的機會。此次會議特別看到的幾個神經經濟學發展的趨勢，包括功能性核磁共振造影（fMRI）分析技術的進步、眼動研究和個別差異。

過去的 fMRI 的研究多會探討不同情境間腦區活化的差異，但近期有越來越多研究不單只是探討進行某種活動時，有哪些腦區的參與，更進一步要找出這些腦區是如何連結運作的。會使用些像是 SEM、DCM 或是中介變項等等的方法，進行腦區之間連結的分析，

這些方法在行為資料上已被大量的使用，而現在有許多人將其應用到 fMRI 的資料上。fMRI 資料有全腦的資料，如此大量的資料很適合進行腦區間連結的分析；因此除了找出參與的腦區外，腦區間的連結是越來越重視的一個方向。例如：過去的情緒調節研究發現 VMPFC 與情緒調節成功有關。而在進行中介變項分析後，發現 VMPFC 還會影響到 NAcc 與 Amygdala 在影響到情緒調節的成功，VMPFC 會增強 NAcc 再增強情緒調節，而 VMPFC 會增強 Amygdala 再抑制情緒調節。這樣更細緻的分析，能提供我們更多的資訊。

過去眼動比較少會使用在決策的研究上，但這次會議中也看到了很多研究使用了眼動的技術。眼動技術的優點在於，可以了解人們是如何來處理訊息，進而來預測人們的決策行為。例如：當人們眼動在懲罰的值上停留時間越久，懲罰趨避的程度就越高，會避開懲罰較大的選項。此外，個別差異是未來很重要的趨勢，決策為一高階歷程，有較大的變異性，不是每個人的決策都能用同一種模式解釋，所以了解不同特性的人會有怎樣的決策行為變得很重要。例如：在一個使用不同賽局的研究中，利用受試者眼動的軌跡將受試者分成不同策略的組別。眼動軌跡都在自己策略和結果上的受試者，在只需要關注自己策略和結果就能做出最好決策的賽局中表現最好；而眼動軌跡在對手策略和結果上的受試者，則是相反，在需要關注對手策略和結果才能做出最好決策的賽局中表現最好。

本人今年除了發表二篇壁報論文外，由於是神經經濟學年會的理事(Board Member)，因此還擔任八場研討會中一場次的主持人。理事任期共三年，我的任期自 2009 年 9 月至 2012 年 9 月。藉由擔任理事，可和國外研究者有更多的互動，並積極推動國內乃至亞洲區域神經經濟學研究的發展，希望能吸引更多研究者投入此一跨領域研究。神經科學跨人文社會科學領域的研究，是國內近年來的發展重點。我們每天都需要面臨決策的情境，而人的決策行為是如此多變，因此，運用多元的研究方式與多方的學術交流，才能對這複雜的研究議題進行深入的了解與探索，希望有朝一日能夠對人類進行決策機制的領域有更多貢獻。

## 二、研究成果

Kao, C. H., Chung, H. K., Kuo, W. J., & Yen, N. S.\* (2011, Oct.). *The effects of*

*expected value and risk level in a modified IGT: An fMRI study*. Poster presented at the 2011 annual meeting of the Society for Neuroeconomics, Evanston, IL, U.S.A.

Chung, H. K., Yen, N. S.\*, Kao, C. H., & Liu, Y. C. (2011, Oct.). *The risk factor and emotion-decision mechanism in somatic marker hypothesis*. Poster presented at the 2011 annual meeting of the Society for Neuroeconomics, Evanston, IL, U.S.A.

### 三、相關連結

<http://www.neuroeconomics.org/conference>

## 出席國際學術會議心得報告

計畫編號	NSC 99-2511-S-004-001-MY3
計畫名稱	基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇與大腦認知負荷之研究
出國人員姓名	顏乃欣
服務機關及職稱	國立政治大學心理系教授
會議時間地點	2012 Sep. 28-30, Miami, FL, U.S.A.
會議名稱	10 <sup>th</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroeconomics
發表論文題目	1. <i>The anticipated risk factor in error monitoring system: A FRN study.</i> 2. <i>Effects of color and avatar on perceived webpage closeness: An exploratory fMRI study.</i>

### 一、與會心得摘要

神經經濟學年會為神經經濟領域界之重要學術組織，參與會議的與會者主要為經濟學、神經科學與心理學等相關領域的學者，2012 年的會議議程總共有 3 天，包括了工作坊與正式會議。工作坊的課程，一方面提供神經科學背景知識給社會科學的研究者，另一方面提供經濟學的知識給神經科學的研究者，藉以達到跨領域訓練的目的。今年 Princeton University 的 Yael Niv 有關 reinforcement learning，Caltech 的 Colin Camerer 有關 Game theory 的介紹，都非常精采。另外，今年的大師開講 The Kavli Foundation Plenary Lecture，請到史丹佛大學的 William Newsome，講題為 A new look at gating: Selective integration of sensory signals through network dynamics，Newsome 之研究主要以猴子進行單一神經元電生理研究，其研究顯示神經元對情境 (context) 很敏感，同樣的刺激在不同情境下會有不同的決策，在腦中被處理與整合的方式亦不同。Newsome 為美國歐巴馬總統提出之 BRAIN Initiative 計畫的三個主要領導研究學者之一，對神經科學的發展扮演極其重要的角色。

在會議期間安排了七場神經經濟學相關研討會，其中包含 Reinforcement learning, Risk, Valuation, Discounting task, Social decision making, Self control 等議題，其中介紹 Reinforcement learning 神經機制的場次由幾位該領域著名學者演講，非常精彩；除此之外，年會也安排了壁報論文議程，藉由此安排可提供各地相關領域的學

者有深入交流討論的機會。本人今年除了發表二篇壁報論文外，由於是神經經濟學年會的理事(Board Member)，因此還和另外二位會員擔任今年研討會與壁報論文的議程委員會委員並擔任主席。理事任期共三年，我的任期自 2009 年 9 月至 2012 年 9 月，今年為擔任理事的最後一年，有幸擔任本屆議程委員會主席，議程安排獲得會員們的肯定，頗感榮幸與欣慰。這三年擔任理事期間，得以參與會務討論，提供年會服務，和國外研究者有更多的互動，並藉此積極推動國內乃至亞洲區域神經經濟學研究的發展，吸引更多研究者投入此一跨領域研究，是一個非常好的學習與服務經驗。

今年除了我自己參加年會外，和我合作研究的本校資訊管理學系梁定澎講座教授，亦帶領他的博士後研究員與高雄應用科技大學資訊管理學系趙國仁助理教授，一起參與本次會議並發表壁報論文。梁定澎教授與 Colin Camerer 是舊識，會議期間我們還一起和 Colin Camerer 討論我們新實驗的構想，收穫頗豐。

神經科學跨人文社會科學領域的研究，是國內近年來的發展重點。我們每天都需要面臨決策的情境，而人的決策行為是如此多變，因此，運用多元的研究方式與多方的學術交流，才能對這複雜的研究議題進行深入的了解與探索，希望有朝一日能夠對人類進行決策機制的領域有更多貢獻。

## 二、研究成果

Chang, Y. F. , & Yen, N. S. \* (2012, Sep.). *The anticipated risk factor in error*

*monitoring system: A FRN study.* Poster presented at the 2012 annual meeting of the Society for Neuroeconomics, Miami, FL, U.S.A..

Liang, T. P. , Yen, N. S. \*, Hsieh, R. H., Li, Y. W., & Kang, T. C. (2012, Sep.). *Effects*

*of color and avatar on perceived webpage closeness: An exploratory fMRI*

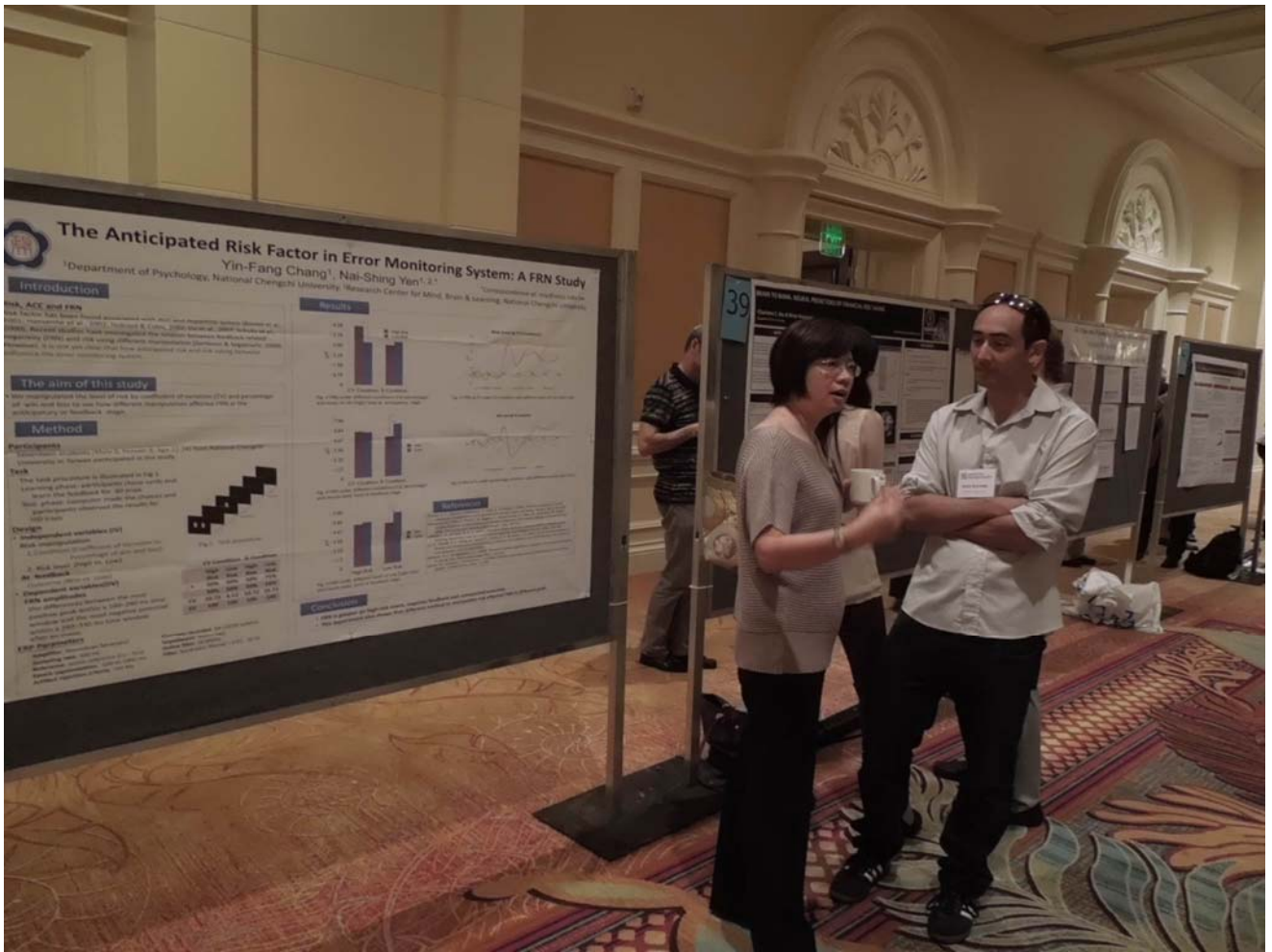
*study.* Poster presented at the 2012 annual meeting of the Society for Neuroeconomics, Miami, FL, U.S.A.

## 三、相關聯結

<http://www.neuroeconomics.org/conference>



四、照片



# 科技部補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2014/11/01

科技部補助計畫	計畫名稱: 基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇與大腦認知負荷之研究
	計畫主持人: 顏乃欣
	計畫編號: 99-2511-S-004-001-MY3      學門領域: 數學教育—科學教育理論—數學
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：顏乃欣		計畫編號：99-2511-S-004-001-MY3				計畫名稱：基本數學運算能力高低者的乘法運算策略選擇與大腦認知負荷之研究	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	6	0	100%	人次	
		博士生	1	0	100%		
博士後研究員		0	0	100%			
專任助理		5	0	100%			
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	5	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
博士後研究員		1	0	100%			
專任助理		0	0	100%			

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>本計畫之研究議題，得以和英國倫敦大學(University College London)認知神經科學所及心理學系榮譽教授，亦為英國研究院院士(Fellow of the British Academy)之 Brian Butterworth 教授，進行研究合作。已共同發表 5 篇國際會議論文，目前正撰寫期刊論文投稿中。</p>
--	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 科技部補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究之議題，讓本人得以和英國倫敦大學(University College London)認知神經科學所及心理學系榮譽教授，亦為英國研究院院士(Fellow of the British Academy)之 Brian Butterworth 教授，共同進行研究合作，增加國際連結。我們已合作發表 5 篇國際會議論文，目前正合作撰寫期刊論文。