

第二十三屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA23-568

隊伍名稱：如鼠家珍

作品名稱：猜拳與轉向中的運籌帷幄--

探討人類與鼠婦在連續決策行為
的偏好與決策經驗依賴等特性

參賽類別：生物

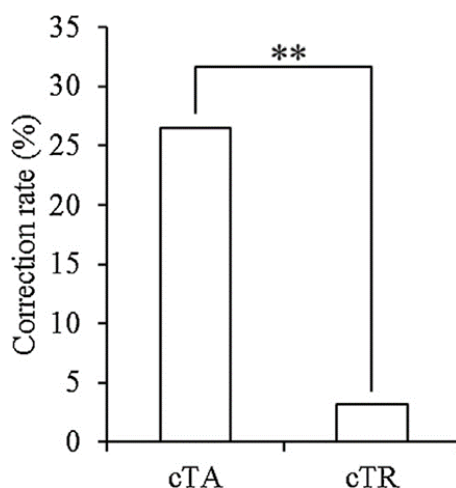
關鍵字：機率、負趨光性、決策經驗依賴

壹、前言

一、研究動機

生活中有許多行為涉及決策判斷，且很多的決策行為並不以意識作為主要的依據，例如遊戲「剪刀石頭布」，因為時間的限制，不容易經過深思熟慮，常是當下反射性地出拳。若是連續出拳，就會經歷多次連續的決策，上一次的決策經驗是否會影響下一次的決策機率？而意識又扮演什麼角色？「剪刀石頭布」是一種進行方式非常簡便的遊戲，適合作為觀察人類連續快速的決策行為，可用來探討是否連續決策具有「習慣化」，也就是作為「是否具有決策經驗依賴性」的研究模式？

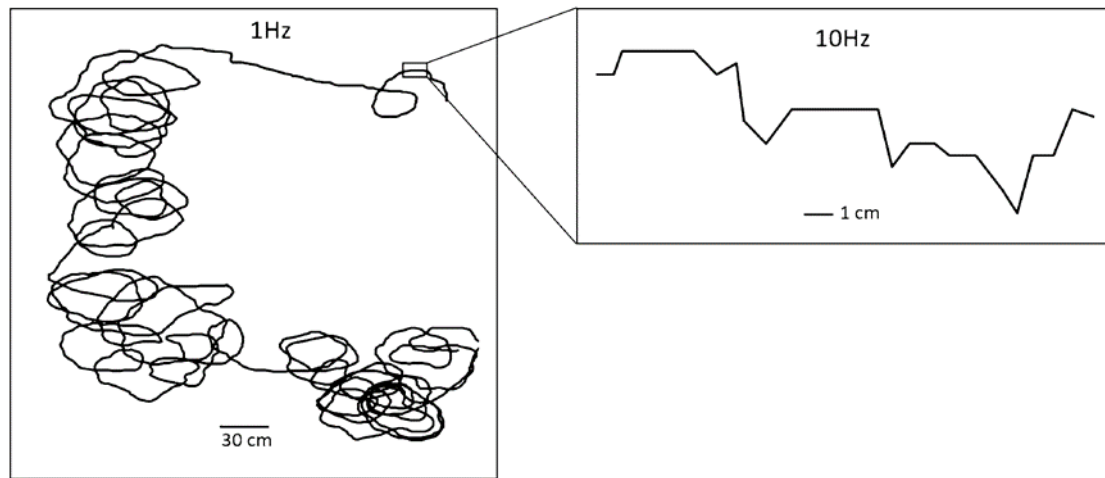
鼠婦(pill bugs)是一類十分常見、在盆栽或落葉堆中便能找到的甲殼類動物。大多數人都見過牠們，卻對其了解甚少。在構思動物進行「決策行為」的科學探究議題時，我們瀏覽到數篇有關鼠婦「交替性轉向(turn alternation)」行為的研究。交替性轉向是鼠婦用來確保在經過許多障礙物時，可使整體行走方向仍維持直線前進的方向，這種行為可在尋常球鼠婦(*Armadillidium vulgare*)走 T 形迷宮時觀察到(Moriyama *et al.*, 2015、Shokaku, *et al.*, 2020)。甚至在強迫鼠婦進行連續同向轉彎-稱為重複轉向(turn repetition)時，還會修正轉彎方向成為交替性轉向，稱為校正性交替性轉向(corrected turn alternation, cTA)，其發生的機率大於校正性重複轉向(corrected turn repetition, cTR)(圖一)。



圖一 尋常球鼠婦(*Armadillidium vulgare*)在 T 型迷宮中，發生校正性交替性轉向(cTA)與校正性重複轉向(cTR)的機率(引用自：Moriyama, *et al.*, 2016)。**： $p < 0.001$

若在無障礙物的情形下，讓尋常球鼠婦(*Armadillidium vulgare*)自由行走，在微觀觀察層級(取樣頻率 10 Hz)較常觀察到交替性轉向，但在宏觀觀察層級(取樣頻率 1 Hz)時卻較常觀察到重複轉向(圖二)，代表鼠婦在無障礙條件下，微觀層次以左右交替轉向運動為主，而巨

觀層次是以同向的弧線運動為主，至少具有微觀與巨觀兩種轉彎控制機制(Fukai, *et al.*, 2022)。



圖二 尋常球鼠婦的運動路徑(引用自：Fukai, *et al.*, 2022)。左圖：1 Hz 取樣頻率記錄 30 分鐘；右圖：10 Hz 取樣頻率記錄。

許多以鼠婦的轉向行為作為動物模式的研究，也都有觀察到鼠婦的交替性轉向反應，例如：方誌鈞等人(民 111)觀察多霜蠟鼠婦(*Porcellio pruinosus*)及光滑鼠婦(*Porcellio laevis*)的轉向行為，兩者皆表現出交替性轉向反應；他們也發現若轉向決策前的移動距離越長，則交替性轉向反應比率則會降低。Hughes(1985)曾對鼠婦的交替性轉向反應提出一個假說：由於鼠婦在步行轉彎時，身體兩側步足所行走的距離不同，其中外側移動的距離較長，步足行走需要花費更多的步數，使得外側步足較內側步足更容易產生疲乏現象；若鼠婦表現出交替性轉向反應，則可平衡左右兩側步足的耗力程度，這個假說將此行為反應稱為「雙側不對稱腿部運動(bilaterally asymmetrical leg movements, BALM)」。方誌鈞等人(民 111)發現鼠婦在轉彎時，內側步足的站立期(站立而接觸地面)的時間比率較外側步足高，並認為此現象可以作為支持雙側不對稱腿部運動(BALM)假說的證據。但我們認為 BALM 假說僅以肌肉疲勞的層次解釋轉向行為，是一種比較機械式、低層次的機制，而非探討高層次的判斷決策行為，故本研究的實驗設計中，增加轉彎決策之前的時間間隔，以避免步足行為因疲勞等機械因素干擾，才有機會一窺鼠婦較高層次的判斷、決策等行為。另一方面，我們認為內側步足的站立期時間比率，並無法反映出步足的耗力程度，故無法直接證明 BALM 假說。

李泓儒等人(民 112)也以多霜蠟鼠婦及光滑鼠婦作為研究對象，發現這兩種鼠婦轉向次數越多，交替性轉向反應越明顯，這代表決策的經驗可能會影響新的決策。他們也發現鼠婦的交替性轉向反應也受環境刺激影響，若給予噴氣刺激，則交替性轉向反應明顯增加；而粗糙表面也會影響轉向決策，鼠婦偏好停棲在粗糙表面上，且轉彎方向較常朝向粗糙面，且牆面越粗糙則鼠婦轉彎角度越大，後者的現象被稱為 Thigmokinesis。由此可知，走道的觸覺

刺激也會影響轉向的決策，故本研究需以表面觸感一致的材質製作實驗器具，並轉變左右走道的刺激方向，以避免其他環境因子對方向決策行為的干擾。

除了鼠婦外，Hughes(1990)也發現青蟹(mud crab, *Helice crassa*)在自然棲息地挖隧道時，會呈現與先前轉彎相反之方向的傾向。

本研究以人類與鼠婦作為觀察對象，探討人類在進行連續決策行為時，是否有特定的偏好？決策行為是否受上一次選擇經驗或是輸贏經驗的影響(決策經驗依賴性)？另外，也驗證鼠婦是否具有趨光性？並以鼠婦趨光性的性質，探討鼠婦的轉向行為決策是否受趨光性的影響？這樣的影響在趨光性刺激消失後是否具習慣性？鼠婦的連續轉向選擇事件間是否互為獨立事件(是否具決策經驗依賴性)？

二、研究目的

本研究利用人類的遊戲「剪刀石頭布」，觀察連續決策行為的行為特性。此外，也利用鼠婦的負趨光行為特性，觀察鼠婦在多次轉向同一側(暗側)，再回到原環境(兩側亮度相同)後，轉向行為的改變情況，並進一步探討其是否有習慣性等學習反應。

本研究的目的是如下：

(一)、探討人類在進行「剪刀石頭布」遊戲時的決策行為特性

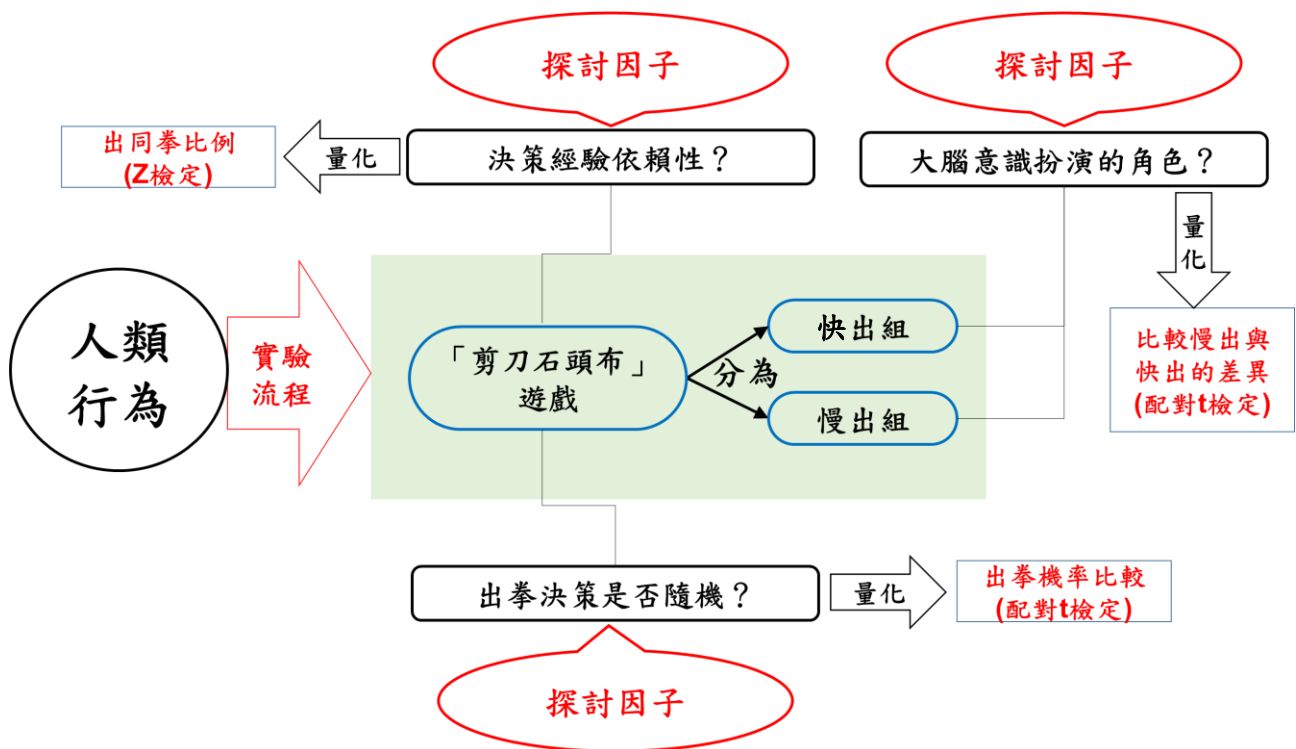
1. 決策結果是否隨機？
2. 利用機率原理，分析決策是否受上一次選擇經驗影響(決策經驗依賴性)？
3. 遊戲的勝負經驗是否會影響出拳決策？
4. 遊戲的勝負經驗是否會影響決策經驗依賴性？

(二)、探討鼠婦的決策行為特性

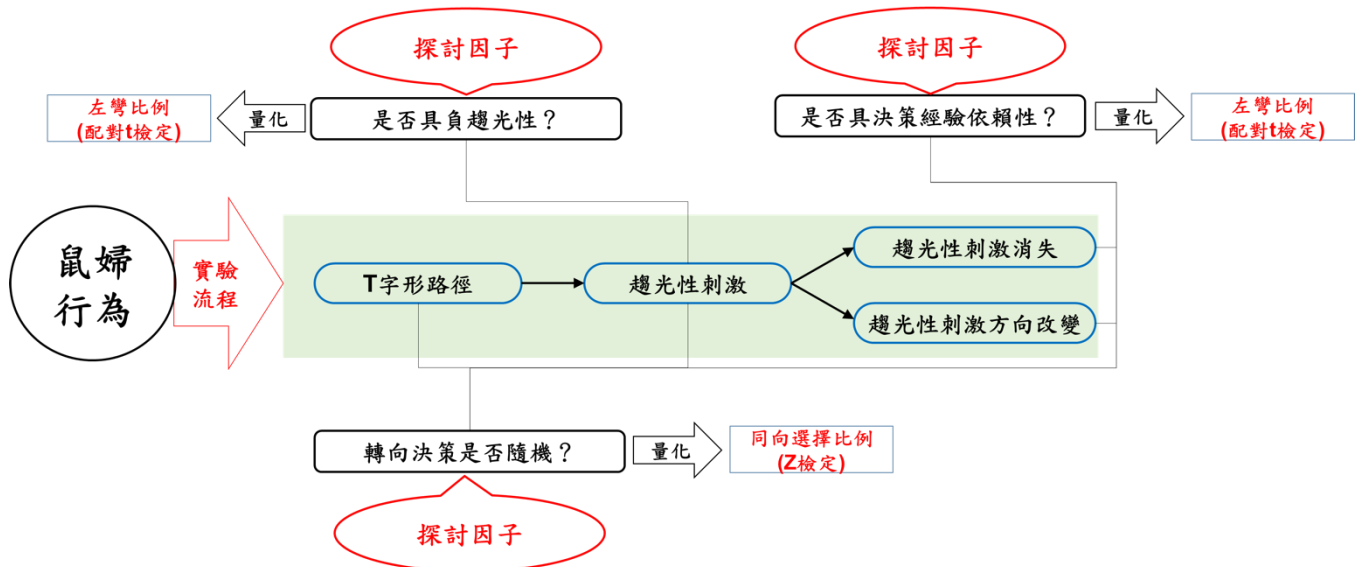
1. 建立負趨光性期間與恢復期的動物觀察模式，比較鼠婦轉彎方向的選擇性是否具有習慣性？
2. 建立負趨光性刺激方向轉換的動物觀察模式，比較鼠婦轉彎方向的習慣性是否影響負趨光性行為特性？
3. 利用機率原理，分析鼠婦的轉向決策是否受上一次選擇經驗影響(決策經驗依賴性)？
4. 探討鼠婦的轉向決策與負趨光性行為特性的交互作用。

本研究的架構如下(圖三)：

(A)



(B)



圖三 本研究的實驗架構示意圖。(A)人類行為觀察模式。(B)鼠婦行為觀察模式。

貳、研究設備及器材

一、實驗生物

人類(*Homo sapiens*，就讀高二的高中女學生)與木瓜鼠婦(*Cubaris murina*)。木瓜鼠婦為車尾燈鼠婦(*Cubaris murina*)的變色種(圖四)，身體呈藕粉色。本實驗取體長達 10 毫米且身體無明顯缺陷的成熟個體。

鼠婦的飼養方式，是在兩個飼養箱的底部鋪上椰纖土，並在飼養箱上編號為 1、2，未實驗過的個體飼養於編號 1；已實驗的個體飼養於編號 2，確保已實驗過的個體與未實驗過的個體分開飼養，用來確認個體是否做過實驗。每天定時補水確保土壤的濕潤、提供充足的羊蹄甲作為食物及微量的鈣粉有利脫殼。



圖四：木瓜鼠婦(*Cubaris murina*)。

二、實驗器材：節拍器、75%酒精、黑色不透明厚紙板、積木、透明壓克力板、手電筒、吸管、平板。

參、研究過程與方法

一、探討人類在進行「剪刀石頭布」遊戲時的決策行為特性

以 20 位高二女高中生，2 人為一組進行「剪刀石頭布」遊戲。以節拍器的聲響控制出拳的時間間隔，分為「慢出組」與「快出組」兩種進行模式，「慢出組」每次出拳相隔 1 秒(節拍速度為 60)，「快出組」每次出拳相隔 0.75 秒(節拍速度為 80)，每輪實驗皆連續猜拳 20 次。紀錄雙方每次出拳的結果，計算每人分別「出剪刀」、「出石頭」與「出布」的次數，並計算各種出拳情形的平均機率等參數，以單因子變異數分析(one-way ANOVA)與 Tukey 事後檢定分析「出剪刀」、「出石頭」與「出布」之間的出拳機率是否具有顯著差

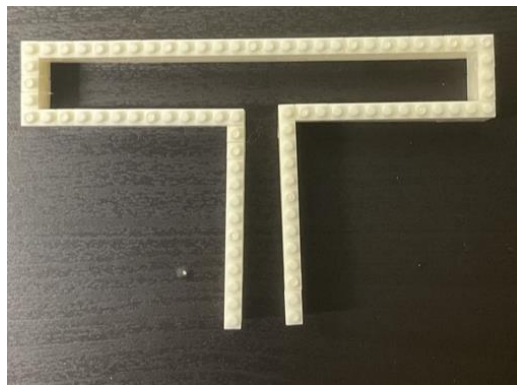
異。另以單尾配對 t 檢定驗證各種出拳情形，在「慢出組」與「快出組」兩種進行模式間是否具有顯著差異。

為分析出拳的決策是否受上一次選擇經驗影響(決策經驗依賴性)，利用機率原理，先計算每種出拳情形的機率(假設各出拳情形機率分別為 $P_{剪刀}$ 、 $P_{石頭}$ 、 $P_{布}$)，再計算理論上連續 2 次出拳出一樣情形(與上次決策一樣)的機率($(P_{剪刀})^2 + (P_{石頭})^2 + (P_{布})^2$)，並與實際紀錄的情形比對，並以 z 檢定比較理論值與實際值之間是否具有顯著差異，即可判斷連續兩次決策的行為是否符合隨機分布，或是具有決策經驗依賴性(正相關或負相關)。

二、探討鼠婦的決策行為特性

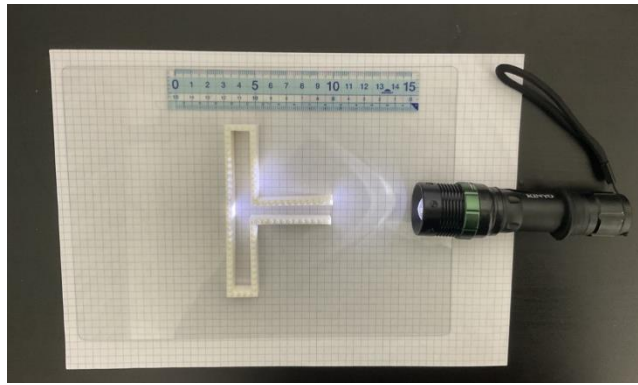
(一)、實驗裝置組裝

我們參考方誌鈞等人(民 111)的科展作品中，使用積木搭建迷宮的設計，準備長各為 0.4cm、0.8cm、4cm、寬為 0.4cm、高為 0.4cm 的白色積木。為了避免鼠婦會沿著軌道的壁行走，如沿著左邊的壁前進而向左轉；沿著右邊的壁前進而向右轉，進而影響實驗結果，因此我們將軌道的寬度訂為 0.8cm，約與鼠婦的體寬相等，減少實驗的誤差。將積木組裝成寬度為 0.8cm、高度為 1.2cm 的 T 字軌道，左右兩端皆為 4.8cm 長，中間則為 5.2cm 長(圖五)。



圖五 本實驗使用的 T 字軌道。

將透明壓克力板置於最底層，方便用酒精消除鼠婦在每次行走時遺留的費洛蒙，避免影響實驗結果。透明壓克力板上放置 T 字軌道，並在距離 T 字軌道的入口 5cm 的位子放上手電筒(圖六)，因為鼠婦具有負趨光性，因此在軌道的入口放置手電筒可以刺激鼠婦向前行走。

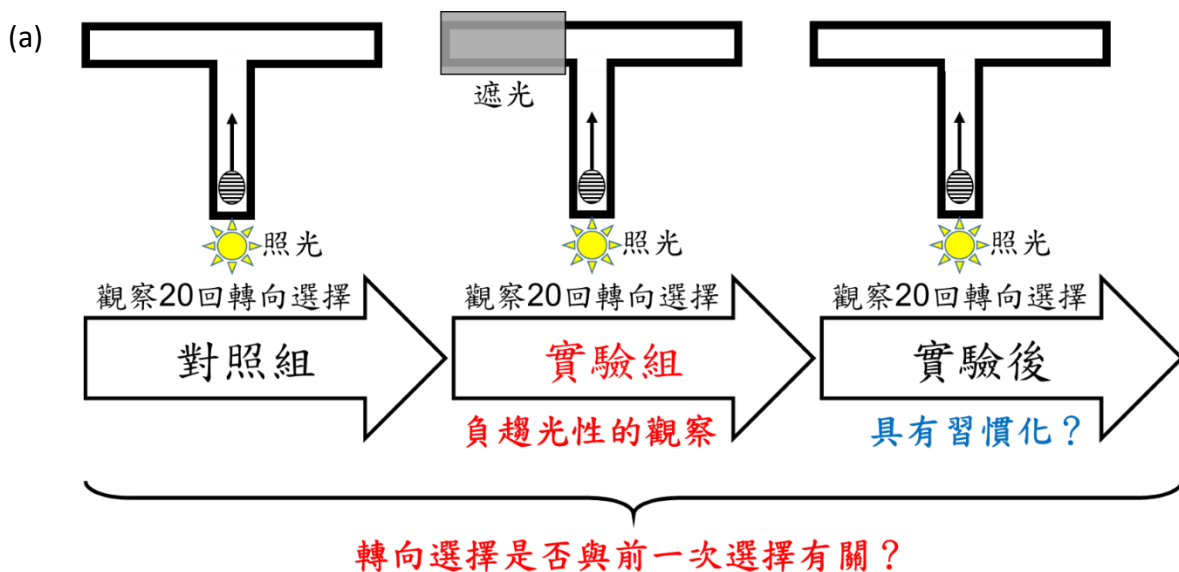


圖六 實驗裝置。

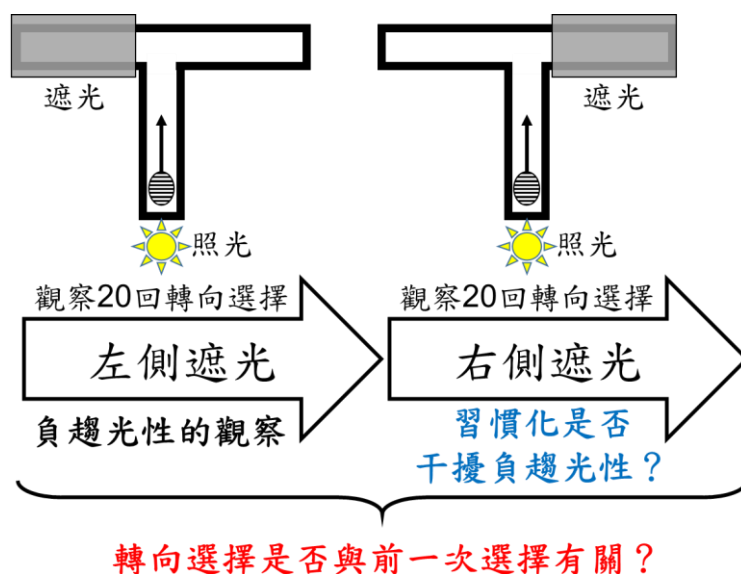
實驗前我們發現很難徒手將鼠婦從飼養箱中移出，且如何將鼠婦放置在軌道也是問題，我們嘗試許多材料像是厚紙板、葉子等，都發現當材料的材質不光滑時，很難控制鼠婦。因此最後選擇用吸管製作移動鼠婦的裝置，吸管的管壁光滑，鼠婦不易攀爬、可以有效的控制鼠婦姿勢。此外，吸管的寬度與軌道的寬度相當，可以避免放置時偏向某一方向而影響結果，例如：放置時偏向軌道的右邊，而沿軌道的右壁前進。將距離吸管尖端 5cm 處剪下，並將尖端修圓即可作為移動鼠婦的裝置。

(二)、實驗操作流程

本實驗取 12 隻身體無明顯缺陷且成熟的鼠婦個體，並按照對照組、實驗組、實驗後三個步驟進行實驗(圖七 a)。再另取 12 隻身體無明顯缺陷且成熟的鼠婦個體，依左側遮光與右側遮光等步驟進行實驗(圖七 b)。



(b)



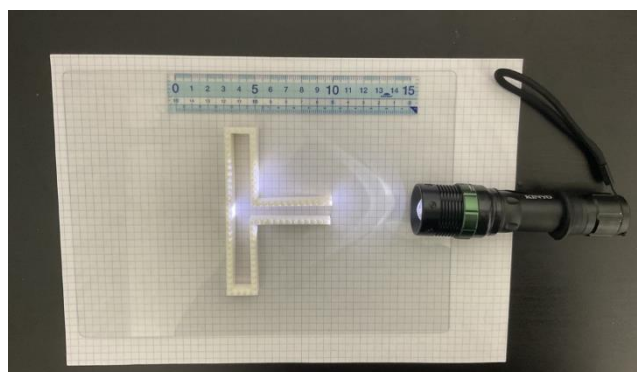
圖七 實驗流程示意圖。

(a).對照組、實驗組、實驗後操作示意圖。

(b).負趨光刺激方向改變(從左側遮光轉變成右側遮光)前與後的的操作示意圖。

1.對照組：無添加誘因，作為空白的對照組(圖八)

將鼠婦置於 T 字軌道入口，記錄其左右轉的數據，並在鼠婦行走後用酒精消毒軌道及透明壓克力板，消除鼠婦在裝置上遺留的費洛蒙，確認酒精完全揮發後再將鼠婦置於軌道入口，並重複二十次，每次實驗操作間隔 1 分鐘，以減少因鼠婦步足運動所引發之疲勞干擾效應。



圖八 對照組實驗裝置。

2.實驗組(變因組)：建立鼠婦的負趨光行為(圖九)

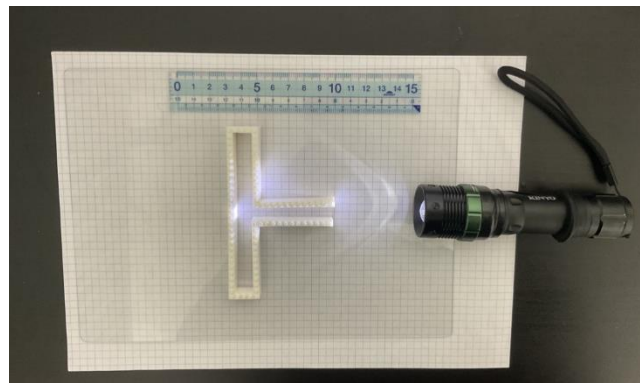
在實驗裝置下放置平板，將平板的螢幕調整成白色且最大亮度作為下方的光源，並在T字軌道左邊的下方及上方用黑色不透光厚紙板完整覆蓋，確保左邊不透光且黑暗。將鼠婦置於軌道入口，紀錄其左右轉向的數據，並在鼠婦行走後用酒精消毒軌道及透明壓克力板，消除鼠婦在裝置上遺留的費洛蒙，確認酒精完全揮發後再將鼠婦置於軌道入口，並重複二十次，每次實驗操作間隔1分鐘。



圖九 實驗組的實驗裝置。

3.實驗後：用來檢測鼠婦是否有習慣性(圖十)

移除實驗裝置下的平板與遮光的黑色厚紙板。將鼠婦置於軌道入口，紀錄其左右轉的數據，並在鼠婦行走後用酒精消毒軌道及透明壓克力板，消除鼠婦在裝置上遺留的費洛蒙，確認酒精完全揮發後再將鼠婦置於軌道入口，並重複二十次，每次實驗操作間隔1分鐘。



圖十 實驗後的實驗裝置。

(三)、鼠婦行為的量化方法

當鼠婦進入左邊軌道達軌道長二分之一時，則數據記為L，反之則記為R，例如鼠婦進入左邊軌道並行走2.4cm時，將數據記為L；如果鼠婦進入左邊軌道行走不到2.4cm便回頭

進入右邊軌道，並在右邊軌道行走超過 2.4cm，將數據記為 R。將收集到的數據記錄於 excel 表格中。

1. 鼠婦負趨光性後是否建立轉向習慣？(大尺度的觀察分析)

分別計算鼠婦對照組、實驗組與實驗後左轉與右轉次數，分別計算對照組 20 回、實驗組 20 回與實驗後 20 回各自的左轉向比例，再計算平均、標準誤(standard error)等數值，並以單尾配對 t 檢定比較各組間的 p 值。此外，也將對照組前 10 回與後 10 回、實驗組前 10 回與後 10 回與實驗後前 10 回與後 10 回，各自計算左轉向比例，再計算平均、標準誤(standard error)等數值，並以單尾配對 t 檢定比較各組間的 p 值。此分析方式的目的是，比較因負趨光性而引發多次左轉向後，當趨光性因子消失後，是否仍存在左轉向的習慣性選擇？

2. 鼠婦轉向選擇是否會受前一次選擇影響？(小尺度的觀察分析)

分別計算鼠婦對照組、實驗組與實驗後，每 2 次選擇事件的理論發生機率(圖十一)，若向左轉向的機率($P_{左}$)為 a ，則向右轉向的機率($P_{右}$)為 $(1-a)$ ，連續 2 次選擇皆為反向的事件包含先左向再右向，與先右向再左向，機率分別為($P_{左,右}$)與($P_{右,左}$)，可得連續 2 次選擇皆為反向的機率 = $2a-2a^2$ ，連續 2 次選擇皆為同向的機率 = $1-(2a-2a^2)$ 。向左轉向的機率($P_{左}$)可由左轉向比例帶入，則可計算出若符合隨機分布的機率理論值，再將實際得到的數據與機率理論值進行統計分析，即可驗證連續 2 次轉向選擇之間是否屬於獨立事件(轉向選擇是否會受前一次選擇影響)。

將對照組 20 回、實驗組 20 回與實驗後 20 回，計算連續 2 次轉向選擇事件屬於同向選擇的比例，共 19 筆資料，計算平均、標準誤等數值，再與理論機率值比較，並以 Z 檢定進行統計分析。此外，也將 19 筆連續 2 次轉向選擇事件，分為前 10 次與後 9 次，分別計算平均、標準誤等數值，再與理論機率值比較，並以 Z 檢定進行統計分析。

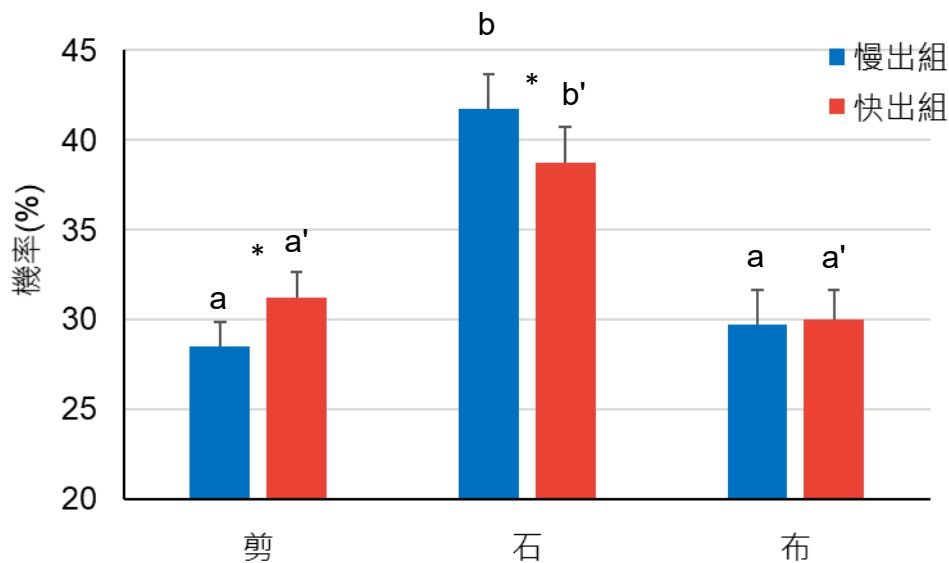
$$\begin{aligned} P_{左} &= a \\ P_{右} &= 1-a \\ P_{(左,右)} &= a \times (1-a) = a - a^2 \\ P_{(右,左)} &= (1-a) \times a = a - a^2 \\ P_{(右,右)} &= (1-a) \times (1-a) = 1 - 2a + a^2 \\ P_{(左,左)} &= a \times a = a^2 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} P_{(左,右)} \\ P_{(右,左)} \end{array} \right\} \text{反向}$$
$$\left. \begin{array}{l} P_{(右,右)} \\ P_{(左,左)} \end{array} \right\} \text{同向}$$
$$\begin{aligned} P_{(同向)} &= 1 - 2a + 2a^2 = 1 - (2a - 2a^2) \\ P_{(反向)} &= 2a - 2a^2 \end{aligned}$$

圖十一 隨機轉向選擇的機率計算過程。

肆、研究成果

一、人類在進行「剪刀石頭布」遊戲時，決策結果是否隨機？

分析 10 對受試者(共 20 人)分別在「慢出組」與「快出組」連續猜拳 20 回的出拳紀錄，無論在「慢出組」與「快出組」，出現「出石頭」的情形皆有較高的機率(圖十二)。當出拳時間間隔縮短後，「出剪刀」的機率增加而「出石頭」的機率減少，「出布」的機率不變。



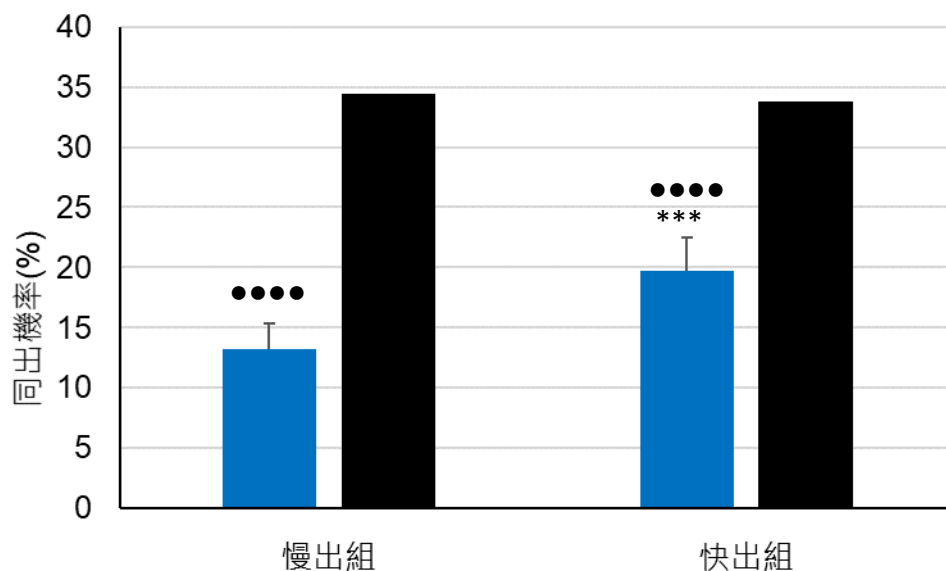
圖十二 進行「剪刀石頭布」遊戲時，「慢出組」與「快出組」的各種出拳情形機率(平均 ± 標準誤，n = 20)。

「出剪刀」、「出石頭」、「出布」間的比較：a 與 b 之間或 a' 與 b' 之間達統計上的顯著差異(one-way ANOVA、Tukey 事後檢定， $p < 0.001$)

「慢出組」與「快出組」間的比較：*： $p < 0.05$ (單尾配對 t 檢定)

二、人類在進行「剪刀石頭布」遊戲時，決策行為是否具決策經驗依賴性？

比較連續兩次出拳有同樣決策結果(同出)的實際值與理論值(圖十三)，可發現無論是「慢出組」與「快出組」，實際值皆小於理論值，代表具有負相關的決策經驗依賴性，也就是出拳情形會儘量避免與上次出拳的情形一樣；且「慢出組」的負相關的決策經驗依賴性較「快出組」明顯，代表負相關的決策經驗依賴性是與意識活動有關(由意識做的決策)，當出拳間隔時間縮短後，減少意識作用的機會後，負相關的決策經驗依賴性即會減弱。



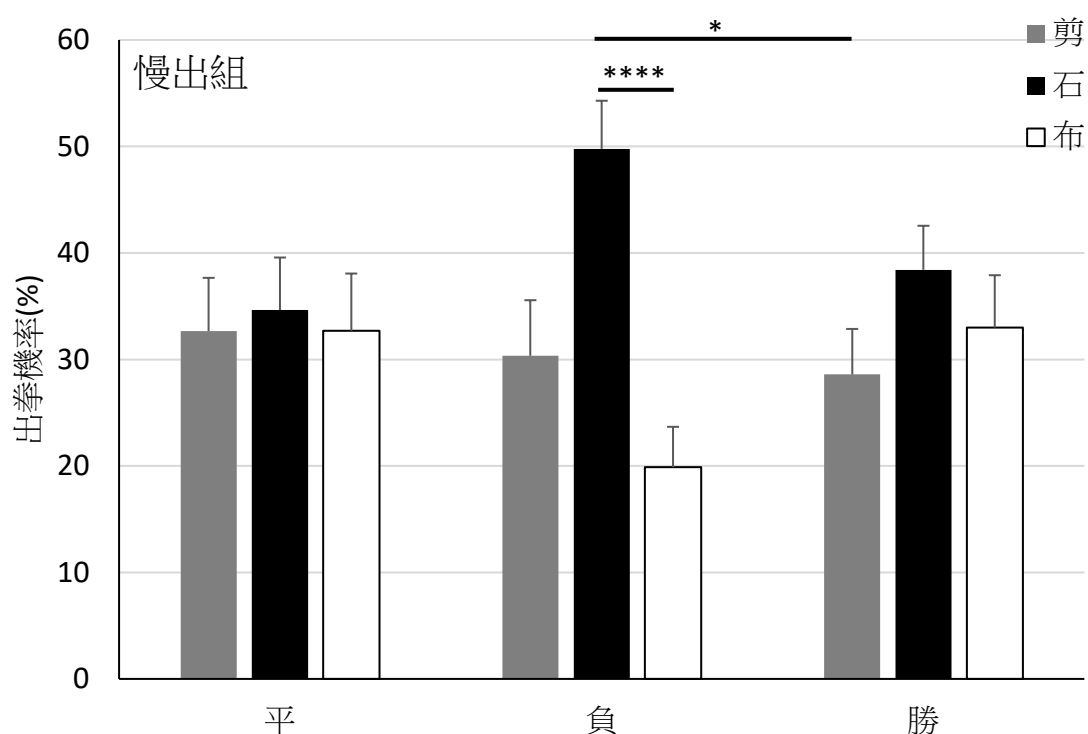
圖十三 人類在「慢出組」與「快出組」，連續 2 次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率(藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 20$)。

與理論值相比：●●●●： $p < 0.001$ (Z 檢定)

與「慢出組」比較：***： $p < 0.005$ (單尾配對 t 檢定)

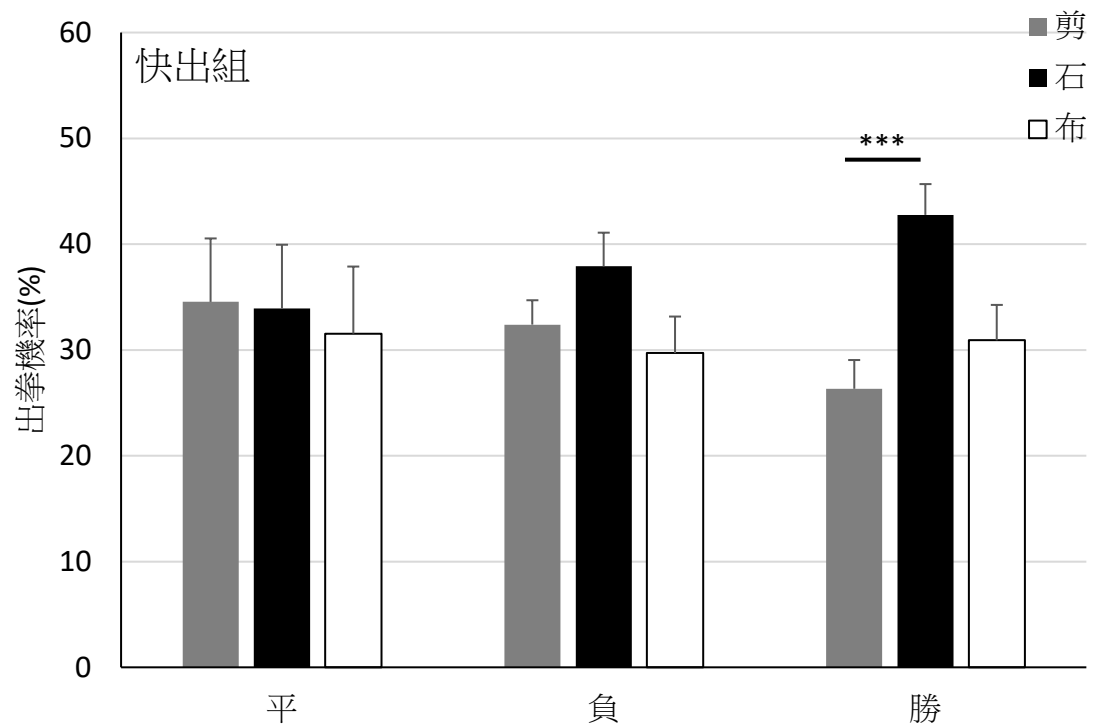
三、遊戲的勝負經驗是否會影響出拳決策？

比較「剪刀石頭布」遊戲的勝負經驗對下一次出拳情形的影響。圖十四為「慢出組」在上一局出拳結果為平局、負或勝等情形下，各種出拳情形機率。結果發現在「慢出組」中，若上一局輸了，出石頭機率增加，而出布的機率下降。圖十五為「快出組」在出拳結果為平局、負或勝等情形下，各種出拳情形機率。結果發現在「快出組」中，若上一局勝了，出石頭機率增加，而出剪刀的機率下降。這些結果證明遊戲的勝負經驗確實會影響出拳決策，且意識的參與程度對此調節作用亦具影響。



圖十四 進行「剪刀石頭布」遊戲時，上次出拳為平局、負或勝等情形下，「慢出組」的各種出拳情形機率(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 20$)。

「出剪刀」、「出石頭」、「出布」間的比較(one-way ANOVA、Tukey 事後檢定)：*： $p < 0.05$ 、****： $p < 0.001$

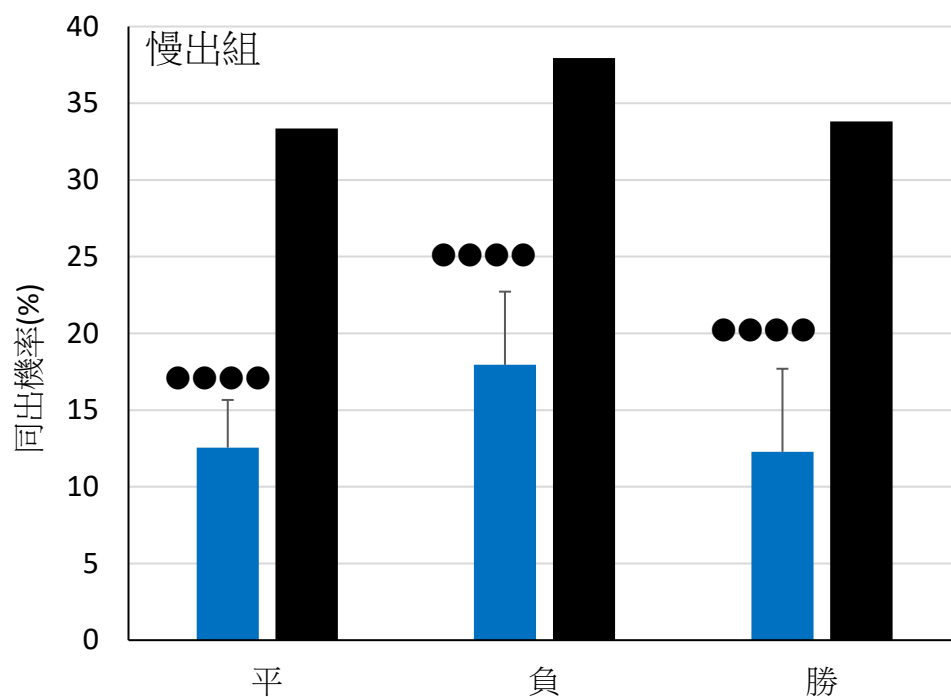


圖十五 進行「剪刀石頭布」遊戲時，上次出拳為平局、負或勝等情形下，「快出組」的各種出拳情形機率(平均 ± 標準誤，n = 20)。

「出剪刀」、「出石頭」、「出布」間的比較(one-way ANOVA、Games-Howell 事後檢定)：***： $p < 0.005$

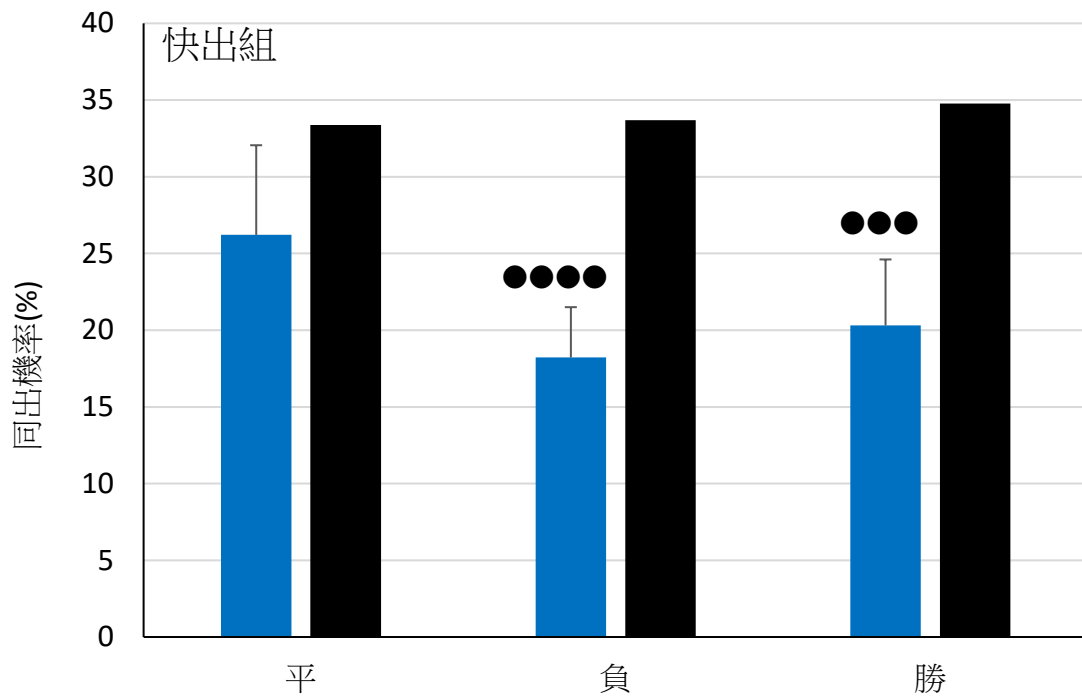
四、遊戲的勝負經驗是否會影響決策經驗依賴性？

比較「剪刀石頭布」遊戲的勝負經驗，並比較連續兩次出拳有同樣決策結果(同出)的實際值與理論值，可發現在「慢出組」中(圖十六)，無論上一局是平局、輸或贏，2次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率皆比理論值低，代表選手會避免與上次出一樣的拳。而在「快出組」中(圖十七)，若上一局是平局，2次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率與理論值相同，換句話說，只有在輸了或是贏了之後，才會避免再出一樣的拳。



圖十六 進行「剪刀石頭布」遊戲時，上次出拳為平局、負或勝等情形下，「慢出組」連續2次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率(藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 ± 標準誤， $n = 20$)。

與理論值相比：●●●●: $p < 0.001$ (Z 檢定)



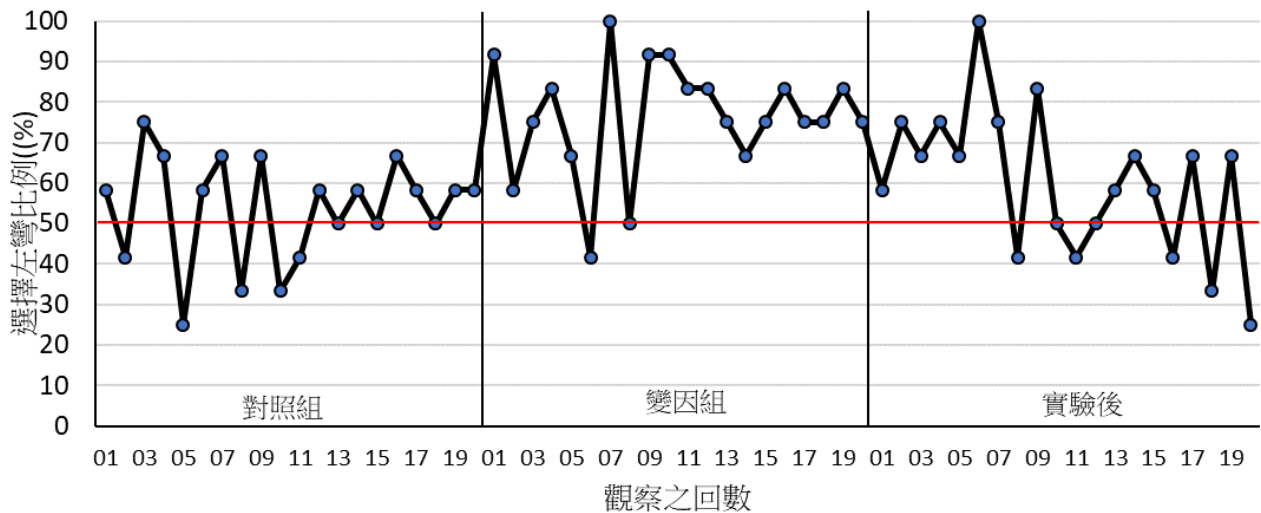
圖十七 進行「剪刀石頭布」遊戲時，上次出拳為平局、負或勝等情形下，「快出組」連續 2 次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率(藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 20$)。

與理論值相比：●●●： $p < 0.005$ ；●●●●： $p < 0.001$ (Z 檢定)

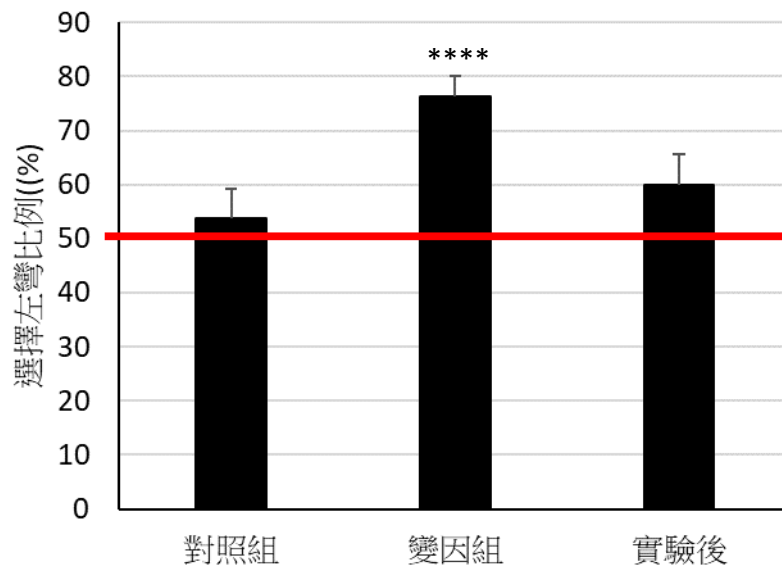
五、鼠婦負趨光性後是否建立轉向習慣？(大尺度的觀察分析)

計算 12 隻鼠婦在 60 回中向左轉的比例，製作折線圖(圖十八)，以觀察比較質性上的趨勢，50%的紅線代表隨機轉向。分成三大部份：對照組、變因組、實驗後，對照組趨近於在 50%起伏擺盪，趨近於隨機轉向；變因組比例幾乎都明顯高於 50%，明顯呈現鼠婦具有負趨光性；而實驗後會由高於 50%逐漸下降，漸漸趨於隨機分布。

從圖十九的數據與統計結果來看，當單向光線(右側照光)刺激發生時，鼠婦會發生負趨光行為反應(左彎)，且發生頻率與對照組達統計上的顯著差異，證明鼠婦具有明顯的負趨光性，當負趨光性的刺激消失後，鼠婦左彎頻率就會下降至與對照組一致。

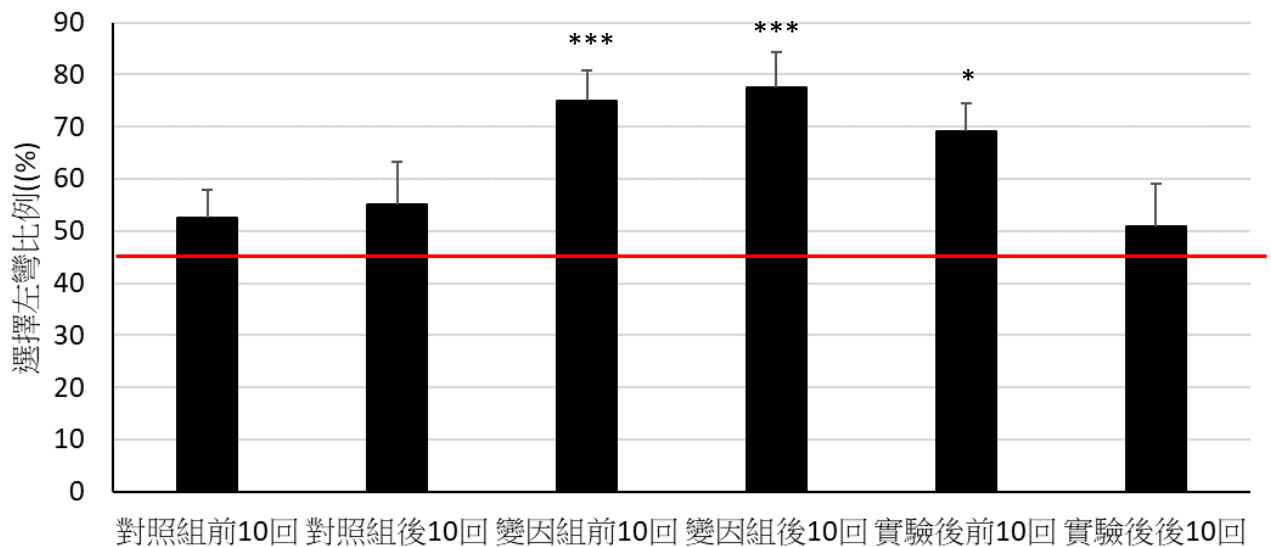


圖十八 鼠婦在每回選擇左彎比例示意圖(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。



圖十九 鼠婦對照組、變因組、實驗後選擇左彎比例(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。
與對照組相比：****: $p < 0.001$ (單尾配對 t 檢定)

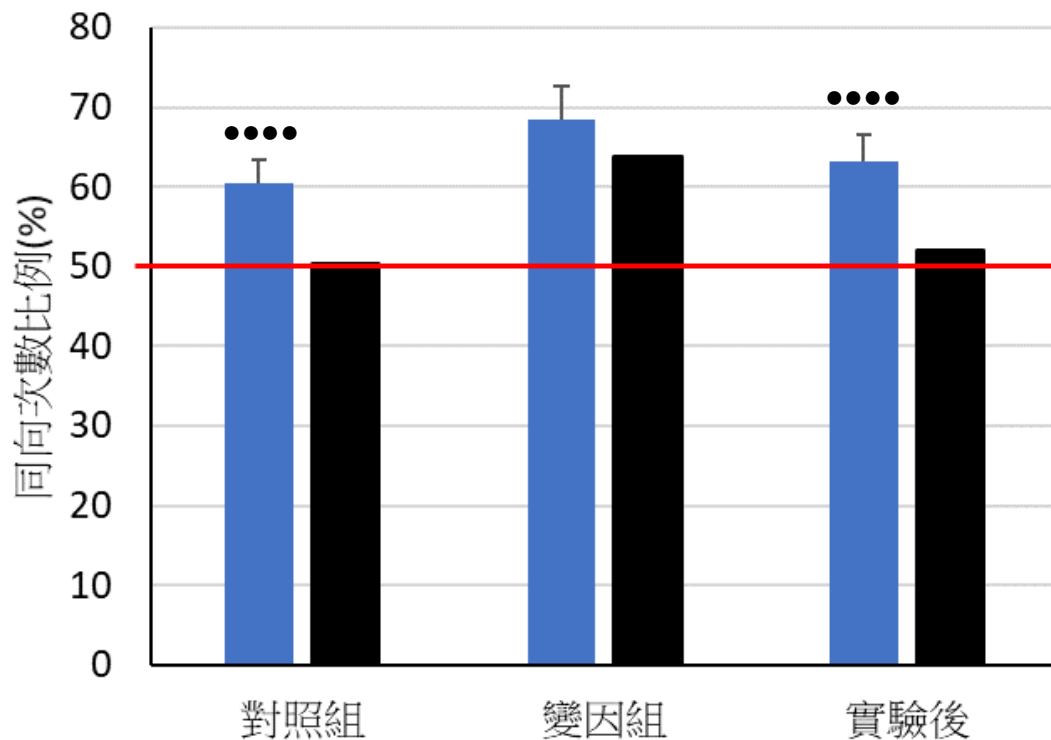
若將時間尺度再縮小一點進行比較，分析每 10 回的選擇左彎比例(圖二十)。鼠婦在對照組的前 10 回與後 10 回中，選擇左彎比例接近 50%，呈現出隨機選擇方向。而發生負趨光性刺激時(變因組)的前、後 10 回相比，鼠婦左彎比例上升，此時呈現明顯的負趨光行為，但在負趨光刺激消失後(實驗後)的前 10 回，向左轉比例仍明顯高於 50%，且與對照組達到統計上的顯著差異，雖後在實驗後的後 10 回，才下降至接近 50%(與對照組一致)。



圖二十 鼠婦於對照組的前 10 回與後 10 回、實驗組的前 10 回與後 10 回、實驗後的前 10 回與後 10 回，每 10 回選擇左彎的比例(平均 ± 標準誤， $n = 12$)。
與對照組前 10 回相比：*: $p < 0.01$ ；***: $p < 0.005$ (單尾配對 t 檢定)

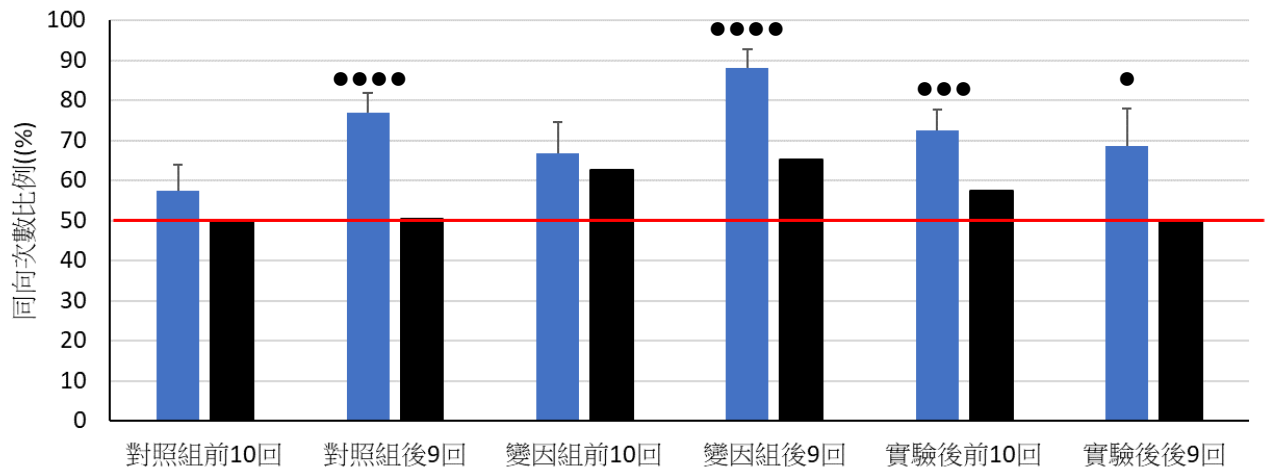
六、轉向選擇是否會受前一次選擇影響？(小尺度的觀察分析)

若分別比較對照組、實驗組(變因組)、實驗後三區段期間，每 2 次選擇事件的理論發生的實際機率與隨機理論值(圖二十一)，發現鼠婦在一般情形(對照組)下，連續發生同向轉向選擇的機率大於理論值，代表轉向選擇有較高的機率會與前一次的轉向相同。在發生負趨光性行為期間(實驗組)，連續發生同向轉向選擇的機率與理論值未達統計上的顯著差異，代表轉向選擇與前一次的轉向選擇互為獨立事件。在負趨光性的環境性質消失後，連續發生同向轉向選擇的機率又大於理論值。



圖二十一 鼠婦於對照組、變因組、實驗後連續 2 次轉彎選擇，屬於同向選擇的次數比例（藍色柱狀圖）與隨機理論值（黑色柱狀圖）（平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$ ）。
與理論值相比：●●●●: $p < 0.001$ (Z 檢定)

若將對照組、實驗組與實驗後各 20 回的轉向事件，分為前 10 次與後 9 次的連續轉向選擇，以更小的時間尺度觀察（圖二十二），發現對照組前 10 次的同向轉則機率與理論值一致，但對照組後 9 次的同向轉則機率則與理論值達統計上的顯著關係，代表鼠婦雖然一開始進行轉向選擇時，轉向選擇與前一次轉向互為獨立事件，但隨著轉向行為的次數累積，則開始出現轉向選擇與前一次轉向為同向的相關性。在進行負趨光性行為的期間亦有類似的現象，變因組前 10 回的同向轉則機率與理論值一致，但變因組後 9 回的同向轉則機率則高於理論值。在負趨光性的環境性質消失後，前 10 回與後 9 回的同向轉則機率仍高於理論值。由以上的實驗結果，可知鼠婦在連續進行方向選擇決策後，會逐漸出現選擇同向的相關性，但在現負趨光性刺激時會暫時干擾同向選擇的現象，但隨後又慢慢出現同向選擇的行為。



圖二十二 鼠婦於對照組的前 10 回與後 10 回、實驗組的前 10 回與後 10 回、實驗後的的前 10 回與後 10 回，連續 2 次轉彎選擇，屬於同向選擇的次數比例(藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 ± 標準誤， $n = 12$)。

與理論值相比：●: $p < 0.05$ 、●●●: $p < 0.005$ ；●●●●: $p < 0.001$ (Z 檢定)

本研究發現因負趨光性影響鼠婦的轉向選擇，但在負趨光性的環境性質消失後，仍能維持一段時間的轉向習慣，在大尺度的轉向選擇中，具有維持原轉向選擇的偏好。而在小尺度的轉向選擇中，我們也發現在一般情形與因負趨光性影響鼠婦的轉向選擇時，只要隨著轉向行為的次數累積，就會出現轉向選擇與前一次轉向為同向的相關性。

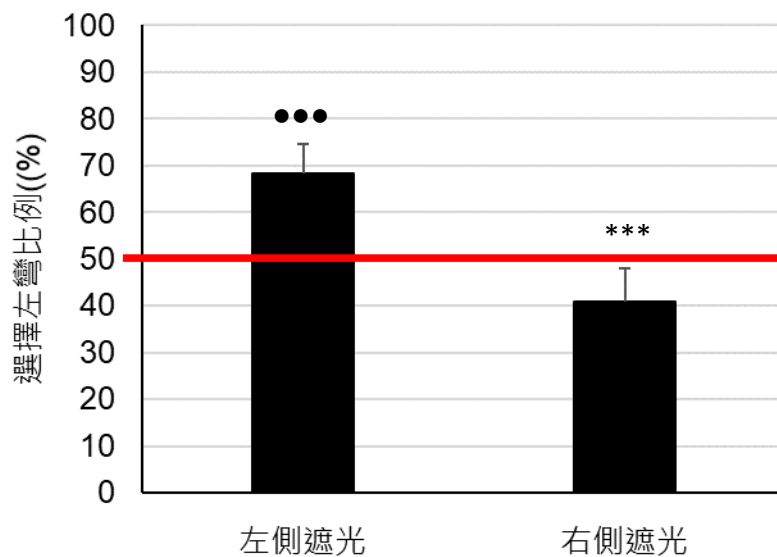
七、負趨光性所建立的習慣是否會干擾新的負趨光行為？(大尺度的觀察分析)

當鼠婦建立的負趨光行為後，在負趨光刺激的方向改變後，並不會呈現新的負趨光性方向選擇，而是不再表現出方向選擇的偏好(圖二十三、圖二十四)。

若將時間尺度再縮小一點進行比較，分析每 10 回的轉向選擇比率(圖二十五)。鼠婦在負趨光刺激方向改變前(左側遮光)的前 10 回與後 10 回，皆表現明顯的負趨光行為，但在負趨光刺激方向改變後(右側遮光)的前 10 回與後 10 回，鼠婦選擇左彎比例皆已接近 50%。代表負趨光行為所建立的習慣性，會干擾新的趨光行為。



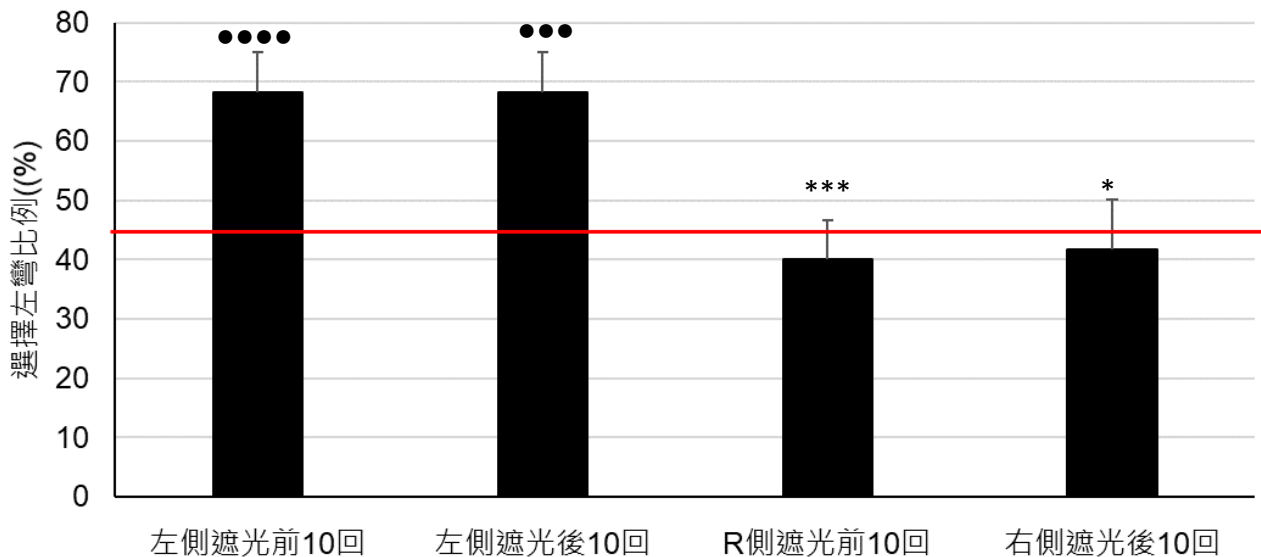
圖二十三 鼠婦在負趨光刺激方向改變(從左側遮光轉變成右側遮光)，每回選擇左彎比例示意圖(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。



圖二十四 負趨光刺激方向改變(從左側遮光轉變成右側遮光)，鼠婦選擇左彎比例(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。

與左側遮光組相比：**： $p < 0.01$ (單尾配對 t 檢定)

與 50%相比：•••： $p < 0.005$ (Z 檢定)



圖二十五 負趨光刺激方向改變前(左側遮光)的前 10 回與後 10 回，與負趨光刺激方向改變後(右側遮光) 的前 10 回與後 10 回，鼠婦選擇左彎比例(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。

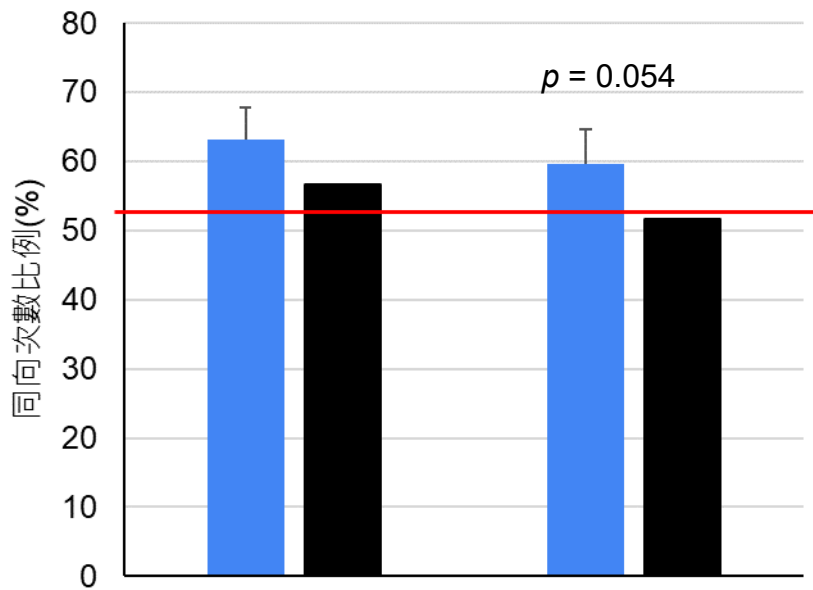
與左側遮光前 10 回組相比：*: $p < 0.05$ ；***: $p < 0.005$ (單尾配對 t 檢定)

與 50% 相比：●●●: $p < 0.005$ ；●●●●: $p < 0.001$ (Z 檢定)

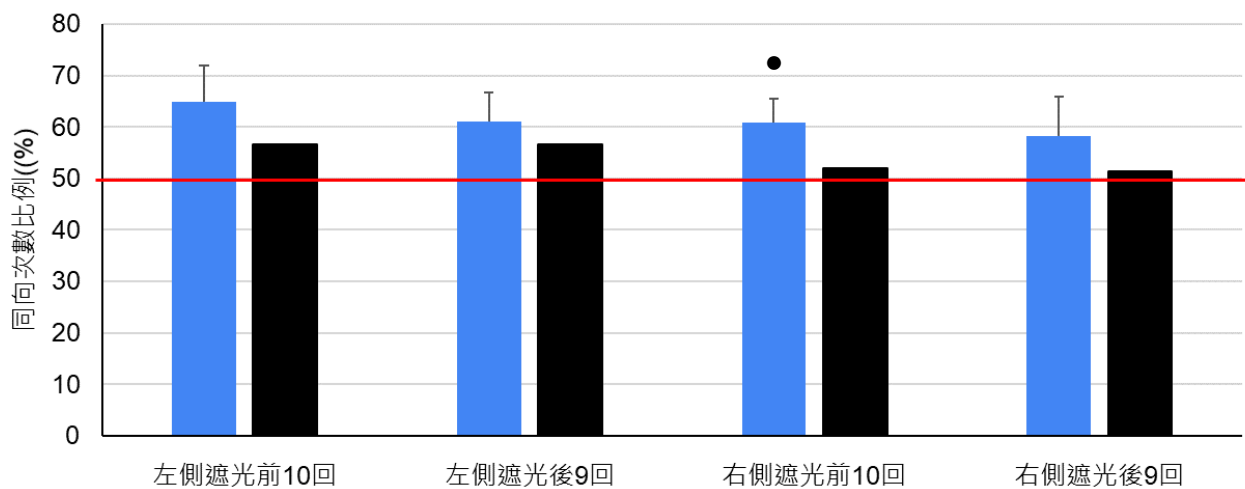
八、同向選擇的相關性是否會受負趨光刺激改變的影響？(小尺度的觀察分析)

若分別比較鼠婦在負趨光刺激方向改變前後(從左側遮光轉變成右側遮光)，每 2 次選擇事件的理論發生的實際機率與隨機理論值(圖二十六)，發現建立負趨光行為期間沒有呈現同向選擇的相關性(與理論值一致)，但在負趨光刺激方向改變後，同向選擇的比例大於理論值 ($p = 0.054$ ，Z 檢定)。

若將負趨光刺激方向改變前後各 20 回的轉向事件，分為前 10 次與後 9 次的「連續轉向選擇」，以更小的時間尺度觀察(圖二十七)，發現僅有在改變負趨光刺激的前 10 回期間，同向選擇的比例大於理論值。這可能是因為在習慣性與的負趨光刺激等相反的決策趨動力同時作用下，鼠婦不易作決策，故會較依賴前次的決策。



圖二十六 負趨光刺激方向改變(從左側遮光轉變成右側遮光)，連續 2 次轉彎選擇，屬於同向選擇的次數比例(藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。
 p 值：與理論值相比(Z 檢定)。



圖二十七 負趨光刺激方向改變前(左側遮光)的前 10 回與後 9 回，與負趨光刺激方向改變後(右側遮光) 的前 10 回與後 9 回連續 2 次轉彎選擇，屬於同向選擇的次數比例 (藍色柱狀圖)與隨機理論值(黑色柱狀圖)(平均 $\pm$ 標準誤， $n = 12$)。
 與理論值相比：●: $p < 0.05$ (Z 檢定)

伍、討論

本研究探討人類與鼠婦的決策行為特性，在探討人類進行「剪刀石頭布」遊戲過程的連續決策行為，發現無論在「慢出組」與「快出組」，出現「出石頭」的情形皆有較高的機率，代表探討人類在進行連續決策行為時，會表現出特定的決策偏好，這可能是因為「出石頭」的情形是接近手部放鬆的姿勢，在「出石頭」時所動用的肌肉最少，且施力最小。

當出拳時間間隔縮短後，「出剪刀」的機率增加而「出石頭」的機率減少，「出布」的機率不變，我們認為是因為在時間壓力下，出拳的速度增加，引發特定肌肉的收縮的程度增加，連帶著讓控制特定手指的肌肉收縮力增加，而「出剪刀」是不同肌肉間收縮程度差異最大的出拳情形，因此發生的機率增加。

我們也發現人類在進行「剪刀石頭布」的連續決策行為，具有負相關的決策經驗依賴性，也就是出拳情形會儘量避免與上次出拳的情形一樣，這應該與遊戲的輸贏動機有關，若與上次出拳的情形不同，較不易被對手預測自己的出拳情形。我們也發現「慢出組」的負相關的決策經驗依賴性較「快出組」明顯，可佐證決策經驗依賴性是與意識活動有關，因此當決策時間縮短，讓意識來不及進行決策，負相關的決策經驗依賴性即會減弱。

若同時考慮上一次出拳的輸贏情形，我們發現在「慢出組」中，只有上一局輸了，會增加出石頭而減少出布的機率，若是平局或勝利，下一次三種出拳結果的機率是一致的；在「快出組」中，只有上一局贏了，會增加出石頭而減少出剪刀的機率。換句話說，「慢出組」只受失敗經驗的影響，「快出組」只受勝利經驗的影響，代表失敗經驗較容易影響意識性的決策，而勝利的經驗應是透過影響情緒而快速地影響決策(意識來不及干預)。

我們也發現，無論輸贏經驗為何，「慢出組」皆會避免與上次出一樣的拳。但「快出組」只有在輸了或是贏了之後，才會避免再出一樣的拳，而平局之後的出拳情形則偏向隨機。這代表意識性的決策或是情緒的干擾，皆會避免出同樣的拳，若兩種機制皆不作用，出拳情形就會呈現隨機分布。

本研究也以鼠婦趨光性的性質，探討鼠婦的轉向行為決策是否受趨光性的影響，我們以T形迷宮觀察鼠婦交替性轉向行為，探討他們是否具有學習行為，以及建立習慣與否。在實驗中，鼠婦會傾向轉向遮光側，證實其具有負趨光性。經過實驗組的左轉訓練，鼠婦在實驗後向左轉機率提升，顯示牠們應具有學習行為，並且鼠婦走了一定次數的迷宮後，便會建立習慣性。

本研究發現鼠婦具有負趨光性，且負趨光性刺激剛消失後，仍呈現負趨光性的選擇方向，顯示行走方向具有習慣性。鼠婦在選擇行走方向多次後，會呈現與前次選擇的相關性(同向次數比例較大)。在負趨光性的環境刺激後，上述的現象會先消失，而後再現。負趨光性的環境刺激消失後，與前次選擇的相關(同向次數比例較大)仍會維持。

若負趨光性的環境刺激方向相反，則原先的趨光性行為消失，應是因方向選擇的習慣性干擾了負趨光性的選擇。若無「方向選擇的行為經驗」，而直接進行負趨光性的方向選擇，雖仍呈現負趨光性行為，但不會呈現與前次選擇的相關性(同向次數比例與理論值一致)，但若負趨光性刺激方向轉換，會呈現與前次選擇的相關性(同向次數比例較大)。這可能是趨光性消失的原因，也可能是因為在習慣性與負趨光刺激等相反的決策趨動力同時作用時，鼠婦在不易作決策的情形下，會較依賴前次的決策。

我們最初設計的迷宮較寬，但讓鼠婦試走幾次後，便注意到鼠婦似乎傾向於沿著自己較靠近的牆面轉彎。查閱資料發現 Hughes (1989)曾對此現象做過實驗，結果顯示鼠婦與牆面的距離會影響牠們轉向的決策，推測觸覺感知與鼠婦轉向有關。所以我們修改迷宮設計，讓其寬度與鼠婦體寬接近，以減少此變因對實驗結果的干擾。

前人曾以蚯蚓作為研究對象，探討給予蚯蚓負面刺激(用針戳)後，牠們的交替性轉向是否會受影響(Nakashima, *et. al*, 2018)。在受到刺激後，多數蚯蚓仍表現出交替性轉向行為，顯示受刺激前、後的行為之間沒有相關性。我們實驗的鼠婦則會短暫維持習慣，之後再恢復成原本的轉向行為模式。Nakashima 等人以「交替性轉向是經過長久演化、與生俱來的習慣，不應被單一經驗改變」解釋他們的實驗結果。然而，有別於上述研究，我們給予鼠婦正向誘因而非負向刺激，因此 Nakashima 等人的推論能否適用於本實驗，有待進一步確認。

實驗過程中，我們發現鼠婦的任一端觸角若碰到牆，皆會沿著該側牆轉彎。實驗時觸角哪邊先碰到牆可能為影響因素之一，但並未有文獻支持此想法。實驗過程中可以發現，轉彎前直行時，如果鼠婦頭部稍微偏左，左邊觸角先碰牆，則鼠婦左彎比例較高。轉向反應與貼牆行為是否有關連有待後續進一步證明。

陸、結論

一、探討人類在進行「剪刀石頭布」遊戲時的決策行為特性

(一)、決策結果是否隨機？

- 1.無論在「慢出組」與「快出組」，出現「出石頭」的情形皆有較高的機率
- 2.出拳時間間隔縮短後，「出剪刀」的機率增加，而「出石頭」的機率減少

(二)、決策是否具決策經驗依賴性？

- 1.無論是「慢出組」與「快出組」，皆表現出負相關的決策經驗依賴性，也就是出拳情形會儘量避免與上次出拳的情形一樣
- 2.「慢出組」的負相關的決策經驗依賴性較「快出組」明顯，代表負相關的決策經驗依賴性與意識活動有關
- 3.在「慢出組」中，若上一局輸了，出石頭機率增加，而出布的機率下降；在「快出組」中，若上一局勝了，出石頭機率增加，而出剪刀的機率下降
- 4.在「慢出組」中，無論上一局是平局、輸或贏，2次出拳屬於同樣決策結果(同出)的機率皆比理論值低，代表選手會避免與上次出一樣的拳；在「快出組」中，只有在輸了或是贏了之後，會避免再出一樣的拳

二、探討鼠婦的決策行為特性

(一)、分析「選擇左彎比例」

- 1.證明鼠婦具有負趨光性，鼠婦在左邊軌道遮光時，左彎比例明顯提高
- 2.在經過訓練後，可以使鼠婦轉向特定方向的比例提高，鼠婦具有學習行為
- 3.負趨光性刺激消失後，左彎比例仍偏高，但隨著選擇次數的累積而慢慢下降至接近對照組
- 4.若負趨光性的環境刺激方向相反，則原先的趨光性行為消失，應是因方向選擇的習慣性干擾了負趨光性的選擇

(二)、分析「同向次數比例」

- 1.以「選擇左彎比例」算出兩次轉向同向機率的理論值，再與實際同向轉向比例相比較

2.在「兩次轉向選擇事件」的小尺度的轉向選擇中，在一般情形與因負趨光性影響鼠婦的轉向選擇時，只要隨著轉向行為的次數累積，就會出現轉向選擇與前一次轉向為同向的正相關性

3.當環境改變，會使鼠婦原建立的同向選擇相關性消失

4.若負趨光性刺激方向轉換，會呈現與前次選擇的相關性(同向次數比例較大)，可能是因為習慣性與負趨光刺激等相反的決策趨動力同時作用，使鼠婦在不易作決策的情形下，會較依賴前次的決策

(三)、大尺度與小尺度選擇事件可同時建立習慣性

1.大尺度：負趨光性的轉向選擇可建立轉向習慣性

2.小尺度：累積轉向行為次數而建立兩次轉向選擇事件的同向習慣性

3.大尺度與小尺度的選擇習慣性可同時建立

柒、參考文獻

- Fukai, K., Ogai, Y., Shinohara, S. and Moriyama, T. (2022). Evaluation of turn alternation in pill bugs using omnidirectional motion compensator ANTAM. *Artif. Life Robotics*. 27(4): 770-776.
- Hughes, R. N. (1985). Mechanisms for turn alternation in woodlice (*Porcellio scaber*): The role of bilaterally asymmetrical leg movements. *Anirn. Learn. Behau.* 13: 253-260.
- Hughes, R. N. (1990). Mechanisms for turn alternation in the tunnelling mud crab *Helice crassa*. *New Zealand Journal of Zoology*. 17(2): 185-189
- Moriyama, T., Migita, M. and Mitsuishi, M. (2016). Self-corrective behavior for turn alternation in pill bugs (*Armadillidium vulgare*). *Behavioural processes*, 122, 98–103.
- Nakashima, T., Mushiake, H. and Sakamoto, K. (2018). Earthworm individualities when facing a conflict between turn alternation and aversive learning. *Biophys. Physicobiol.*15: 159–164.
- Shokaku, T., Moriyama, T., Murakami, H., Shinohara, S., Manome, N. and Morioka, K. (2020). Development of an automatic turntable-type multiple T-maze device and observation of pill bug behavior. *The Review of scientific instruments*. 91(10): 104104.
- 方誌鈞、許韶恩、黃名禎，民 111。多霜蠟鼠婦、光滑鼠婦的交替性轉向反應行為。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會國中組生物科第二名。(指導老師：江宏惟、黃錦鴻)
- 李泓儒、賴岑妃、黃子芩，民 112。Thigmokinesis 對多霜蠟鼠婦及光滑鼠婦交替性轉向反應的影響。中華民國第 63 屆中小學科學展覽會國中組生物科。(指導老師：江宏惟)