

在虛擬實境中基於個人動暈敏感性 以客製化機制減輕暈眩之可行性探討

謝宜庭

政治大學數位內容碩士學程
臺北, 臺灣
107462001@g.nccu.edu.tw

陳宜秀

政治大學傳播學院
臺北, 臺灣
yihsiu@nccu.edu.tw

李蔡彥

政治大學資訊科學系
臺北, 臺灣
li@nccu.edu.tw

摘要

本研究以兩個階段的實驗探討 VR 客製化減暈的可行性。在第一階段的先導研究中，我們透過旋轉和平移情境各五種速度，分別找出能區分不同動暈敏感特性的臨界速度值，並依此結果設計一套前置測試系統，以程度區分受試者的動暈敏感組別。在第二階段的正式實驗中，我們藉由此系統作為預試，將受試者依照旋轉、平移敏感的高低，分成四種動暈敏感組別，並導入旋轉、平移減暈機制，以了解各組別在開啟或關閉不同減暈機制下的反應。從實驗結果的趨勢中，我們觀察到特定減暈模式對特定動暈敏感組別確實有助於減輕暈眩，且每個人對於旋轉和平移錯覺的動暈敏感性亦存在差異，證實了客製化減暈是有效且必要的。我們期望透過本研究，能為日後的 VR 暈眩領域提供新的發展方向和對客製化研究的相關建議與參考。

關鍵字

虛擬實境、動暈症、移動錯覺、減輕暈眩、動暈敏感性、客製化

緒論

一、研究動機與目標

近幾年來，虛擬實境（Virtual Reality, VR）市場日漸龐大、光明前景令人心生嚮往，可是在擁有建構新世界的力量同時也會伴隨著代價，例如其所帶來的暈眩現象，這亦是 VR 發展歷程中面臨的嚴峻挑戰之一。然而，暈眩問題一直以來都存在著，其造成的已不僅僅只是使用時間上的縮短，更可能大幅減少使用意願，如此就可惜了 VR 本身自帶的價值與潛能。

至今學界與業界已提出許多解決方案，不過目前最難以克服且尚未尋得最佳解法的動暈類型，應為虛擬角色在移動、但實際身體靜止而導致的暈眩，因此本研究希望針對此類情況進行探討。雖然目前已發明出了許多減緩暈眩的機制，但似乎多是普世通用的。然而，人與人之間都存在個體差異，每個人對於暈眩的敏感性（Susceptibility）不盡相同，倘若都採用一樣的機制類型，不敏感者可能需要犧牲良好的使用者體驗，而敏感者的暈眩情況則無法針對性地被緩解，所以我們認為，如果能基於不同的人們實施客製化的機制，是十分重要且必要的議題。

因此，本研究主要欲達成的目標為以下兩者：

1. 建構一套前置測試系統，來事前量測使用者在旋轉和平移錯覺方面可以承受的最高暈眩臨界值，以根據測試結果為不同動暈敏感族群進行分類。
2. 探討在同時有旋轉和平移的綜合情況下，是否能夠依照人們相異的動暈敏感特性，來給定旋轉減暈與平移減暈機制所構成的不同客製化方法，期望可以讓每位使用者都能在 VR 中降低暈眩感，並獲得良好的體驗。

二、研究範圍

由於我們尚處於前期的研究階段，所以研究場域將會以實驗室研究為基調，並著重於軟體層面的問題進行探討，且應用在現今擁有廣大使用群的遊戲領域。而在互動型態方面，將選定最常見且易造成較嚴重暈眩的情境[1]，亦即基於控制器（如手把、搖桿、鍵盤、滑鼠）來移動的靜態 VR 系統，玩家為第一人稱視角，並握有主動控制權。我們希望能將對此類導航方式施以個人化之調整。

相關研究

一、虛擬實境動暈症

VR 動暈症與一般傳統動暈症（Motion Sickness）的表現症狀十分相似，包含眼睛疲勞、頭痛、臉色蒼白、冒冷汗、口腔乾燥、腹脹、迷失方向、眩暈、運動失調、噁心、嘔吐等[2]。McCauley 和 Sharkey[3]將此類在虛擬環境中移動所造成的暈眩現象命名為「電腦網路動暈症（Cybersickness）」，是一種實質上靜止卻感知到自己在移動而產生的暈眩，Hettinger 和 Riccio[4]則將其稱之為「視覺誘發動暈症（Visually Induced Motion Sickness）」，時常發生在察覺自我運動卻缺乏實際身體位移的情況，而靜態 VR 系統便是其中一個典型案例。

然而，暈眩的發生原因至今尚未有完整且明確的解釋，其中有許多不同的學派與假說，而最被人們接受的理論主要有以下三者 [2]：Reason 和 Brand[5]提出的感知衝突理論（Sensory Conflict Theory）是最多人推崇、同時也是對於暈眩最為普遍的解釋，該理論主張，當不同感覺器官感知到的結果出現了不匹配的狀況，便會讓大腦不知所措、因而造成暈眩，其也解釋了靜態 VR 系統下大部分暈眩的形成過程，主要著重於視覺和前庭覺之間所產生的不一致。Riccio 和 Stoffregen[6]提出的姿勢不

穩定理論 (Postural Instability Theory)，則認為暈眩是因為動物在環境中無法有效的保持姿勢的穩定性而造成，其更進一步補充了感覺系統無法應對的情況，並且被認為是較為客觀的指標。至於 Treisman[7]提出的毒物理論 (Poison Theory)，指出動暈症是當身體接受到不合理的刺激時，以為自己中毒所產生的反應，嘔吐則是其協助排除毒素的機制、以保護自身不受到傷害，其站在生物學角度闡述了症狀的來源與作用。

二、動暈敏感性

儘管 VR 動暈症屢見不鮮，卻不是所有人都曾經歷此狀況，McIntosh[8]曾提到，在常態母體中只有 5% 的人會承受嚴重暈眩、5% 的人不易被影響、其餘 90% 的人則為一般性症狀，顯示每個人的動暈敏感性並不相同。

然而，目前大部分的研究主軸還是較聚焦於動暈敏感性的關聯探討，包含種族、年齡、性別、身高與體重、動暈症病史、過往經驗等[9][10][11][12]，以及如何創建更有效的 VR 暈眩預測模型[13][14]。不過由於影響因素十分複雜，其中隱含的不確定性仍然很大，預測力可能較為不足。此外，這些預測結果應該如何被使用，以及 VR 系統中的機制應該如何進行調整，目前依舊沒有一個明確的研究方向。

三、減少暈眩之機制

當使用者在靜態 VR 系統中移動時，視覺光流 (Optical Flow) 讓我們感知到周遭環境的運動變化，也讓人更加有臨場感，但同時其所產生的移動錯覺 (vection)，時常被認為跟暈眩息息相關，不是唯一卻可能是必要的先決條件[15]，這類錯覺又包含常見的環形 (旋轉) 和線性 (平移) 型態，而其中旋轉比起平移情境所引發的暈眩感更為強烈[16]。此外，移動錯覺伴隨的暈眩也會極大地受速度的影響，So 等人[17]整理了過去在環形錯覺方面的三個案例，在第一個實驗中[18]，當旋轉速度從 15°/s 加快到 90°/s 時，暈眩程度會先上升、在 60°/s 到達高峰、而後下降，在第二、三個實驗中[19][20]則是隨著旋轉速度變快，移動錯覺發生的時間會先變短、趨於平緩、甚至再變長；而 So 等人[17]則著重在線性錯覺方面，在 Z 軸方向不同的導航速度下，當速度介於 3 至 10m/s 之間時，暈眩程度會隨著速度增加而升高，但在超過 10m/s 後就會形成穩定的狀態。以上結果均說明，在個別旋轉和平移的情境中，當速度變快，暈眩值會呈現快速上升、最後趨於平緩之現象。由此可知，移動錯覺對於暈眩扮演了至關重要的角色，也是許多學者們認為能夠作為減暈切入點的要素之一。因此，過去的研究紛紛對旋轉和平移情境提出了不同的減暈方法，希望能透過減少移動錯覺來減緩症狀的發生。

在旋轉方面，Fernandesc 和 Feiner[21]提出動態視野限制器，當使用者在移動時，FOV (Field of View) 會根據角速度的變化調整大小，不僅使得遊玩時間變長，也讓使用者感到更為舒適，但較小的視野可能會屏蔽掉周遭

的重要物件。Kemeny 等人[16]則提出 Head Lock，使用者需透過眨眼來主動啟用，其運作原理為旋轉時場景會隨之旋轉、宛如畫面定格在眼前，但缺點是機制的觸發行為較不自然，也不適合步調快速的情境。其他還有 Budhiraja 等人[22]提出的 Rotation Blurring，在 FPS (First-Person Shooter) 遊戲中，當滑鼠旋轉時會啟用高斯模糊，旋轉速度愈快則模糊的愈多，實驗結果顯示其延遲了暈眩的發生，不過只有實際經歷動暈症的受試者才從中獲益，其餘的則不受影響或甚至使暈眩上升。除此之外，Farmani 和 Teather[23]提出的 Viewpoint Snapping，同樣為 FPS 情境，當滑鼠轉速低於閾值時，攝影機維持連續旋轉，當超過時則會以固定角度跳躍至下一個畫面，實驗結果顯示減少了 40% 的暈眩程度，可是其啟動門檻也較低，可能會進而擾亂視線。

在平移方面，市面上許多 VR 遊戲採用瞬間移動 (Teleportation) 的方式，由於其缺乏位移過程，所以較不會感受到移動錯覺，也因而能減少暈眩發生。例如在遊戲 Vanishing Realms 中所使用的立即傳送 (Instant Teleport)，藉由手把打出射線指向目標點後點擊觸發，而 Bozgeyikli 等人[24]也提出類似的 Point & Teleport。不過上述兩者容易在過程中失去空間方向，所以有些遊戲例如 Raw Data 採用了改良型的衝刺傳送 (Dash Teleport)，以極快速度衝刺至目標，讓使用者在移動中仍能觀察到自身與環境的相對關係。另外，Farmani 和 Teather[25]暨旋轉之後又提出了新的離散平移方法 Translation Snapping，為一次移動固定距離，實驗結果也表明降低了約 50% 的暈眩程度。

過去的旋轉與平移減暈機制，儘管都指出能有效減少動暈症，但相對代價便是會降低存在感、迷失方向等，並且大部分機制較無法進行個人化的減暈設計，而只有對於純粹旋轉或是平移情境的處理，也可能會大幅限縮應用的可能性。然而，在客製化減暈的研究議題上，僅有少數學者嘗試針對不同個體量身訂做一套方案，例如 Plouzeau 等人[26]在基於搖桿操控的 VR 情境中，提出創新的自適應導航方法，透過偵測使用者的生理訊號—膚電活動 (Electrodermal Activity) 來即時改變導航速度。此研究雖然達到了即時性的動態修正，但缺點為需要在 VR 中全程配戴測量儀器，除了會造成實際使用上的不便，一般使用者也較難取得相關儀器。

根據前述的相關研究，我們發現很少人關注系統設計應該如何因應不同的敏感族群去調整，而現有的眾多減暈方法也無法因人而異，且大多限制在單一情境中使用，目前亦只有少數施行客製化機制以減輕暈眩之案例。因此，本研究將針對個人動暈敏感性、客製化的減暈機制類型、旋轉和平移並行之情境等三個面向提出一個整合性的研究，探討在綜合情境下，是否能夠依照人們不同的動暈敏感程度，給定客製化的機制以降低其不適感。

研究方法

本研究與以往研究所用方法的不同之處，為先提出一套前置測試系統，透過事前量測使用者的動暈敏感狀態，在其進入正式遊戲後再直接給定適合的減暈機制，以減少過程中的可能干擾，而我們主要會著重的客製化部分，則為藉由開啟或關閉旋轉、平移減暈機制之不同組合的配置來達到減暈效果。因此從中將延伸出以下兩個問題：

1. 如何設計一套前置測試系統，以區分不同的動暈敏感族群？
2. 針對不同的動暈敏感族群，何種類型的減暈機制可能較為合適？

為了尋找上述問題的解答，我們將使用實驗法來研究，然而暈眩牽涉的問題較為複雜，也容易受到諸多因素所影響，所以本研究在因子的控制上，選擇以更為簡化的方式來進行，以真正看到實驗操弄造成的效果，並且只針對移動錯覺的部分，亦即造成靜態 VR 系統發生動暈症的主因作為整體切入點。共分為兩個階段的實驗。

在第一階段的先導研究中，我們希望透過實驗來擬定前置測試系統的設計方向，以測量使用者的動暈敏感特性。而在第二階段的正式實驗中，我們希望了解不同動暈敏感族群在不同減暈模式下的反應，所以在分組方面，將使用先前開發的前置測試系統，作為配對組設計之預試；而在減暈模式方面，將分別導入前人發明的旋轉和平移減暈方法，作為基本的機制雛型。

第一階段：先導研究

場景運動包含旋轉和平移帶來的強烈移動錯覺，都會讓使用者產生動暈症[15][16]，且每個人在旋轉情境下的暈眩程度有所不同[27]，所以本研究亦合理推測，在平移情境下的暈眩反應同樣會在個體間產生差異。而研究顯示隨著速度變快，暈眩值會呈現上升而後平緩之狀況[17][18]，但在極低速和極高速的情況，人們對於暈眩的感受將不會有太明顯的差別。

因此，本研究參考文獻中的實驗[17][18]，透過不同速度的旋轉和平移兩種情境作為測試內容，以此了解旋轉錯覺、平移錯覺與動暈敏感性間的關聯，並從中驗證人們在這兩種類型的錯覺上確實存在相異的敏感程度。另外，也希望藉此找到足以造成關鍵影響的臨界速度值，作為有鑑別度的測試標準。本研究最後將依照實驗結果，製作一套可以量測動暈敏感性的前置測試系統。

一、實驗對象

我們將目標對象鎖定為 VR 的潛在客群，以 18 至 30 歲，且本身無經常性頭暈、頭痛症狀或前庭相關病史作為篩選標準。總共招收了 8 人，為 22 至 28 歲（平均 24 歲）的 3 位男性和 5 位女性，且視力或矯正後視力均為正常，而其 MSSQ-Short（Motion Sickness Susceptibility Questionnaire Short-Form）問卷[28]分數分布廣泛，介於 8.63 和 35.84 分之間（滿分 54，平均 21.35，Q1=18.84，

Q2=21.75，Q3=23.36），顯示樣本數間個別差異大，有利於本實驗在區別動暈敏感族群時具備較高的代表性。

二、實驗器材

為確保能有效控制變因，地點選擇在實驗室中進行模擬。硬體使用桌上型電腦（CPU：AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor 3.59 GHz，GPU：NVIDIA GeForce GTX 1650 SUPER，RAM：16 GB）搭配 HTC VIVE Pro 頭戴式顯示器（雙眼解析度：2880 x 1600，螢幕更新率：90 Hz，視野：110 度）。軟體則使用開源遊戲引擎 Unity 作為主要實作平台，以第三方套件 Steam VR 和 VRTK 輔助開發，並選擇風格較為寫實的維京人村莊地圖「Viking Village」作為虛擬場景，在其之上改良製作。

三、實驗設計

本實驗採用受試者內設計，每位受試者將分別接受 10 種（5 種旋轉速度 + 5 種平移速度）實驗組合之操弄。旋轉速度（度/秒）為 20、40、60、80、100 五種水準，而平移速度（公尺/秒）為 2、4、6、8、10 五種水準。同時，以兩種指標測量受試者的暈眩程度：

- (1) SSQ（Simulator Sickness Questionnaire）問卷：由 Kennedy 等人[29]提出，為衡量暈眩最常用的主觀標準量表[30]，以 0-3 級測量 16 種暈眩症狀的嚴重程度，總分為實驗前後相減而得。
- (2) 不適程度之 0-10 級量表：參考自[13]所使用的評分機制，0 代表「完全沉浸在場景中」，10 代表「想停下來」，作為短時間內能夠快速了解受試者當下之相對暈眩等級。

四、實驗流程

每位受試者會進行 10 次實驗，1 天共做 2 次，每次時長約 5-10 分鐘，而每次需間隔 3 小時以上，使其身體能緩慢回復至原來狀態以防止暈眩疊加，實驗全程共 5 天。

首先會請受試者簽署實驗同意書，並填寫個人基本資料，接著與之說明實驗內容。隨機將受試者分成先旋轉後平移之 a 組（1 男 3 女）和先平移後旋轉之 b 組（2 男 2 女），以前者為例，每次將隨機選定一個速度水準，而每一次的實驗都遵循一樣的流程。

實驗前需填寫前測 SSQ 問卷來檢測受試者的身體狀況，若任一症狀程度為中度以上則請其在旁稍作休息。實驗全程受試者都會坐在椅子上，並且身體不能移動，頭部需保持靜止、望向前方。當實驗開始時，場景會以設定的速度水準自動繞著受試者（Y 軸）等速旋轉，時長 3 分鐘，且每隔 1 分鐘畫面上會跳出不適程度量表，受試者需口頭回報分數，若等級為 10 則直接中止此次實驗，而遺漏資料均以 10 補足，接著會將受試者在虛擬實境中的位置隨機切換至另一個定點，以平衡場景複雜度造成的差異。實驗結束後需再次填寫後測 SSQ 問卷。後續的平移實驗亦是承襲上述步驟，但場景將改為以該速度水準自動向受試者方向（Z 軸）等速前進和後退。

五、結果與討論

單因子相依樣本變異數分析顯示，在SSQ問卷總分方面，不同旋轉速度 ($F_{(4,28)}=2.909$, $p=.098$) 無顯著影響，而不同平移速度之間有明顯暈眩症狀的差異 ($F_{(4,28)}=2.979$, $p=.036$)。而在不適程度量表平均分數方面，旋轉速度 ($F_{(4,28)}=15.668$, $p=.00$) 和平移速度 ($F_{(4,28)}=6.030$, $p=.001$) 都有極為顯著的差異，顯示速度的快慢對其存在影響力，因此後續的討論將以此變項作為主要的衡量方式。

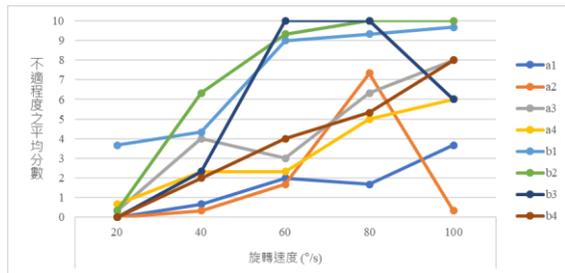


圖 1 不同旋轉速度下之不適程度折線圖

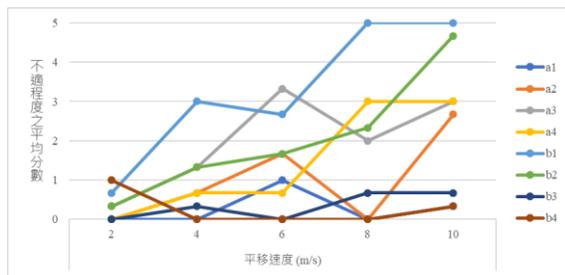


圖 2 不同平移速度下之不適程度折線圖

從單一旋轉和平移情境而言，參見圖 1、圖 2，如同過去的研究結果[15][17][18]，兩種類型的移動錯覺確實都會使人產生暈眩，而當速度愈快，人們的暈眩程度也會愈高、之後維持穩定，旋轉的高峰同樣出現於 60°/s，平移則發生在 8m/s 時，相較於學者提出的 10m/s 再稍早一些，且整體旋轉情境帶來的不適感比平移情境更加嚴重，和學者們提出的論點[16]亦相互吻合。

此外，每位受試者能承受的最高臨界速度彼此不同，個體差異造成暈眩發生的時機有早有晚、不適感有高有低，顯示了每個人在 VR 中不一樣的動暈敏感特性，在旋轉情境方面與文獻相符[27]，在平移情境中亦是如此。而在相同速度之下，有些受試者例如 b1、b2 對於兩種情境都有較高的暈眩指數，a1、a2 是兩者皆低，其餘則只有在單一情境下才會感到不適，亦說明了人們在旋轉錯覺和平移錯覺下的動暈敏感程度存在差異。

由前述可知，本實驗之測試方式的確能有效區別出不同敏感類型，故我們將沿用此方法作為後續建立前置測試系統之基礎測試內容。然而，在何種臨界速度下能最大化人們的差異是本實驗想尋求的解答，因此我們基於最

能區隔不同敏感類型、但同時也最早讓受試者產生暈眩極限之速度，將其設定為前置測試系統的測試標準。

如圖 1 所示，在旋轉情境下，本研究選擇 60°/s 作為門檻，因為在該速度時，受試者的不適程度開始出現極高和極低的分歧反應，且其也是最早有受試者承受不住，並已達到暈眩巔峰、之後呈現穩定持平的速度。如圖 2 所示，在平移情境下，由於分界線沒有旋轉情境那麼明顯，但還是能從中發現在 8m/s 時，分化出了三個清晰的類群，其亦顯示出多數受試者能忍受的最高閾值，所以本研究也將選擇此速度作為平移測試的門檻。

六、建置前置測試系統

基於先前的實驗結果，我們取得了旋轉和平移的臨界速度值，並依此參數建立了一套前置測試系統，整體採用被動模式，測試情境分為旋轉和平移兩種類型，而測試時長各 3 分鐘。

在旋轉測試中，場景會以每秒 60 度等速旋轉，而在平移測試中，場景則會以每秒 8 公尺等速前後移動。兩種情境下各有三個測試地點，且每個地點將連續測試 1 分鐘，待測試完畢後，畫面上會出現不適程度量表，接著系統會隨機切換至下一個地點，進行下一輪的測試。

測試結果以三分鐘內的平均不適程度分數做計算，而本研究根據結果定義了四種動暈敏感類型，分別為對旋轉和平移皆敏感的 Bs (Both sensitive)、只有對旋轉敏感的 Rs (Rotation sensitive)、只有對平移敏感的 Ts (Translation sensitive)，以及對旋轉和平移皆不敏感的 Ns (None sensitive) 組別。

第二階段：正式實驗

正式實驗由預試和正式測試兩個部分所組成。預試的作用在於將受試者分成相異的動暈敏感族群，正式測試則是希望探討在旋轉和平移並行的情境下，透過這些不同的動暈敏感族群，了解其在不同減暈模式下的反應。

一、實驗對象

受試者與先導研究之受試者不互相重疊，總共招收了 40 人，為 18 至 28 歲 (平均約 22 歲) 的 15 位男性和 25 位女性，且視力或矯正後視力均為正常。

本實驗使用前述的前置測試系統為受試者測量旋轉、平移的動暈敏感特性，結果顯現出相異的個體表現。而根據旋轉和平移情境中由低至高的不適程度分數，如圖 3 所示，我們以前 12 位 (小於 P_{30}) 和後 12 位 (大於 P_{70}) 受試者群為界線，共劃分出了四個象限，並從中依照旋轉、平移的高度敏感或不敏感，各篩選 6 位受試者，將其分進 Bs、Rs、Ts、Ns 四組動暈敏感組別中，而人數不足者將從臨近的受試者進行補充。

最終接受正式測試的 24 位受試者，為 19 至 28 歲 (平均約 22 歲) 的 7 位男性和 17 位女性，MSSQ-Short 問卷分數介於 3.25 和 31.71 分之間 (滿分 54，平均 15.09，

Q1=7.78, Q2=13.25, Q3=22.71)。而在詢問平均每週玩遊戲的總時數上，有 4 人表示平常不玩遊戲、14 人為輕度玩家（1-5 小時）、5 人為中度玩家（6-10 小時）、1 人為重度玩家（10 小時以上），至於過去體驗 VR 的次數，只有 1 人完全沒有使用過，有 15 人為 1-5 次、3 人為 6-10 次、5 人為 10 次以上。

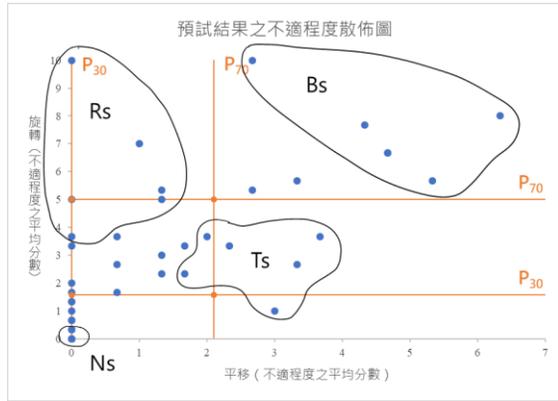


圖 3 四組動暈敏感組別之篩選結果

二、實驗器材

本實驗一樣在實驗室中進行，且硬體設備使用同一台桌上型電腦和頭戴式顯示器，以確保系統效能不受影響，並搭配了一對 HTC VIVE Pro 控制器，讓受試者藉由觸控左右手把的圓盤來操控虛擬角色的移動和旋轉。觸控的位置決定速度的大小，而圓盤由內而外則代表速度從慢到快，我們保守採用市面上遊戲的常見速度，將平移速度的最大值設為 2m/s、旋轉速度設為 30°/s。虛擬場景同樣為維京人村莊地圖，並加入吃金幣的遊戲關卡，來引導受試者在場景中移動。

另一方面，我們基於開發成本較低、參數容易調控、減暈效果顯著、但又較不影響沉浸感的綜合理由，選擇導入 Farmani 和 Teather 提出的 Viewpoint Snapping[23]和 Translation Snapping[25]，分別作為旋轉和平移的基本減暈機制，並微調參數讓體驗更加自然，詳情參見表 1。

減暈機制	軸向限制	條件判斷
旋轉減暈	作用於 Y 軸的左右旋轉	速度 < 25°/s：攝影機連續旋轉 速度 ≥ 25°/s：啟動 Viewpoint Snapping 效果，一次固定旋轉 22.5 度，且過程中有 0.8 秒的淡入淡出轉場，觸發間格為 1 秒
平移減暈	作用於 Z 軸的前後移動	速度 < 1.5m/s：攝影機連續移動 速度 ≥ 1.5m/s：啟動 Translation Snapping 效果，一次固定移動 1 公尺，且過程中不進行轉場以免擾亂視線，觸發間格為 0.5 秒

表 1 減暈機制說明

三、實驗設計

本實驗採用混合設計，受試者共會分成組間 4 種（2 種旋轉敏感 x 2 種平移敏感）動暈敏感類型，分別為 Bs、

Rs、Ts、Ns 組別；而每組受試者都將接受組內 4 種（2 種旋轉減暈 x 2 種平移減暈）實驗組合之操弄，分別為 Bo（Both on）、Ro（Rotation on）、To（Translation on）、No（None on）模式。實驗變項如下：

1. 自變項：如表 2 所示

組間因子 (組別)	旋轉敏感		組內因子 (模式)		旋轉減暈		
	高	低	開	關	開	關	
平移 敏感	高	Bs	Ts	平移 減暈	開	Bo	To
	低	Rs	Ns		關	Ro	No

表 2 正式實驗之混合設計因子

2. 依變項

- 暈眩的增加程度：SSQ 問卷總分、不適程度量表平均分數。
- 沉浸感：改良版的 7 點式 IPQ (Igroup Presence Questionnaire) [31] 問卷之平均分數，1 分代表完全不同意、7 分代表完全同意。
- 操作性：衡量控制器操作順暢度和容易度之平均分數，1 分代表完全不同意、7 分代表完全同意。
- 完成率：實驗結束後吃到的金幣數除以總金幣數之百分比，最高為 100%。

四、實驗假設

本實驗主要希望探討特定組別在特定模式下對於暈眩程度和沉浸感的影響，而在個別情況下，使用任一旋轉或平移減暈機制都能有效減緩不適[23][25]。因此，我們亦猜測，若同時開啟兩種減暈機制是否能減少更大程度的暈眩值；同理，任一減暈機制或多或少都會降低沉浸感，若同時開啟兩種是否會更嚴重地影響體驗，故提出了以下假設：

1. 暈眩程度

- H1_a：Bs 組為 No 模式 > Ro/To 模式 > Bo 模式
- H2_a：Rs 組為 No/To 模式 > Ro/Bo 模式
- H3_a：Ts 組為 No/Ro 模式 > To/Bo 模式
- H4_a：Ns 組為 Bo 模式 > Ro/To 模式 > No 模式

2. 沉浸感

- H1_b：Bs 組為 No 模式 > Ro/To 模式 > Bo 模式
- H2_b：Rs 組為 No 模式 > Ro 模式 > Bo 模式
- H3_b：Ts 組為 No 模式 > To 模式 > Bo 模式
- H4_b：Ns 組為 No 模式 > Ro/To 模式 > Bo 模式

五、實驗流程

在預試中，每位受試者會於 1 天內進行 2 次實驗，每次實驗時長約 5-10 分鐘，且需間隔 3 小時以上，實驗全程共 1 天。而在正式測試中，每位受試者會分別進行 4 次實驗，每次時長約 15-20 分鐘，且每次同樣需間隔 3 小時以上，實驗全程至多為 4 天。

首先會請受試者簽署實驗同意書，並填寫個人基本資料，接著與之說明實驗內容。實驗前需先填寫前測 SSQ 問卷，

之後會請受試者戴上頭戴式顯示器，一樣為坐下狀態，並保持頭部靜止、看向前方，全程均透過 HTC VIVE Pro 控制器來移動角色和旋轉視角。實驗過程包含 2 分鐘的練習關卡和 5 分鐘的遊戲關卡，受試者需沿著金幣的路線移動，任務目標為在時限內吃完地圖上出現的所有金幣，參見圖 4、圖 5，而為了消除相同場景產生的練習效果，四次的金幣路線將有所不同。在遊戲過程中，每隔 1 分鐘畫面上會跳出不適程度量表，當等級為 10 則即刻中止此場實驗，待該場實驗結束後，受試者需填寫後測 SSQ 問卷，以及包含沉浸感、操作性問項的遊戲體驗問卷，並進行簡單的訪談。



圖 4 移動路線俯視圖



圖 5 遊戲關卡畫面示意圖

研究結果及討論

一、暈眩程度

組別	Bo 模式		Ro 模式		To 模式		No 模式	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Bs	9.35	11.03	4.99	7.35	6.23	6.55	2.49	3.05
Rs	16.21	19.60	16.21	18.42	23.69	19.74	11.22	14.58
Ts	3.12	2.82	3.12	3.68	4.99	7.73	2.49	3.86
Ns	2.49	3.05	.62	1.53	7.48	16.56	.00	.00

表 3SSQ 總分之描述性統計

組別	Bo 模式		Ro 模式		To 模式		No 模式	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Bs	1.87	1.38	1.50	0.49	1.93	1.17	2.13	0.67
Rs	1.70	1.76	1.87	1.91	2.30	0.95	1.40	1.18
Ts	1.13	1.20	0.90	1.34	0.67	0.85	0.93	1.09
Ns	0.50	0.94	0.13	0.33	0.20	0.40	0.00	0.00

表 4 不適程度平均分數之描述性統計

df=(1, 5)		SSQ 總分			平均不適程度		
		旋轉減暈	平移減暈	交互作用	旋轉減暈	平移減暈	交互作用
Bs	F 值	1.063	2.315	.008	.989	.041	.493
	p 值	.350	.189	.932	.366	.848	.514
Rs	F 值	.055	.577	1.359	.035	.751	1.256
	p 值	.823	.482	.296	.859	.426	.313
Ts	F 值	.172	.204	.526	.215	.003	2.698
	p 值	.695	.670	.501	.662	.961	.161
Ns	F 值	.546	1.404	.971	.910	1.597	.142
	p 值	.493	.289	.370	.384	.262	.722

表 5 暈眩程度之雙因子相依樣本變異數分析摘要表

組間之雙因子多變量變異數分析顯示，無論是旋轉敏感 (Wilks'Λ=.640, p=.091)、平移敏感 (Wilks'Λ=.791, p=.378) 或交互作用 (Wilks'Λ=.754, p=.281) 因子，

在整體的 SSQ 總分上都沒有出現顯著差異。而在平均不適程度方面，只有旋轉敏感 (Wilks'Λ=.422, p=.004) 因子有造成顯著影響，經由成對比較發現，在 Ro (F(1,20)=5.627, p=.028)、To (F(1,20)=21.458, p=.000)、No (F(1,20)=13.389, p=.002) 模式下，高旋轉敏感者都顯著比低旋轉敏感者來得暈。

而組內之雙因子相依樣本變異數分析則顯示，不管是 SSQ 總分或平均不適程度，在四組內的各模式間均沒有顯著差異 (表 5)，說明本研究在減暈機制的操弄上，其效果並未達到顯著水準。儘管我們沒有在統計上得到有利的支持，但從平均數的比較上，本研究仍然發現了一些趨勢與預期假設相符。由於 SSQ 總分 (表 3) 與平均不適程度分數 (表 4) 沒有在模式間呈現一致的排序，而我們認為過程中量測的不適程度較能忠實反應受試者真正的暈眩感受，故將以其五分鐘內的平均值，針對各組在各減暈模式下的結果進行討論。

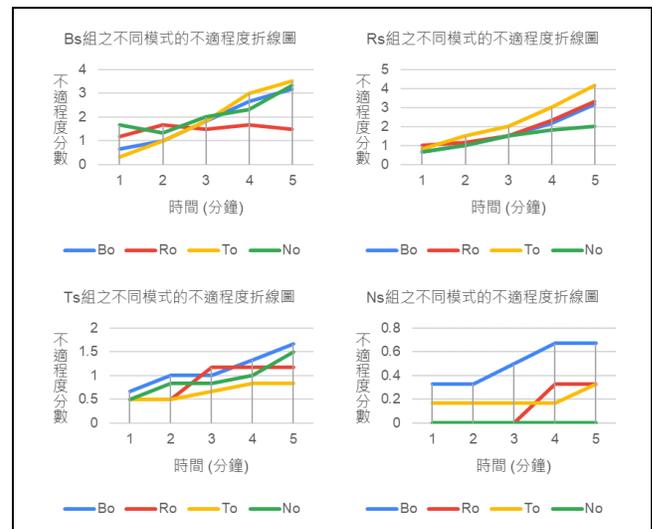


圖 6 不同組別之不同模式的不適程度折線圖

Bs 組：No > To > Bo > Ro 模式

只要有開啟減暈機制都會比完全沒有開啟之暈眩程度低。然而，Ro 模式卻為暈眩最低者，從五分鐘內的不適程度變化來看 (圖 6)，可以發現其暈眩程度一直都處於穩定較低的數值，隨著遊玩時間更長，我們甚至能保守預估其減暈效果將會更好。而對於 Bo 模式無法更有效減暈的結果，我們根據實驗中的觀察和事後訪談，得出以下兩種可能的解釋：一為減暈機制本身畫面卡頓所帶來的雙倍不合理刺激，其在視覺上造成的過大阻礙，會導致受試者產生反效果；二為和預期行為不同所產生的過度頻繁操作，其大量重複的跳格和閃現刺激，同樣會讓受試者不堪負荷。

1. Rs 組：To > Ro > Bo > No 模式

開啟不必要的平移減暈機制的確會導致較高的不適感，而只要有開啟旋轉減暈機制，便能稍微減緩其旋轉方面

的暈眩程度，但 No 模式為暈眩值最低的模式，與假設完全相反。根據受試者的訪談回應，有些表示大幅度的轉彎會造成其極度不適，所以在 No 模式中每次只會轉動很小的角度，可能間接導致了暈眩程度沒有預期來得高，但整體而言，他們其實更偏好有跳格的 Ro 模式來協助減暈。因此，本研究尚不能妄下定論，以此推斷 No 模式就是此組最佳的暈眩解法。

2. Ts 組：Bo > No > Ro > To 模式

完全無開啟與開啟不必要減暈機制之暈眩程度較高，而 To 模式則有最低的暈眩表現，顯示開啟平移減暈機制對於平移敏感的受試者有助於降低不適，且從趨勢變化來看（圖 6），隨著時間拉長，我們認為其效果將能讓受試者之感受繼續維持在較低暈眩的情形。不過，Bo 模式雖然同樣包含平移減暈機制，卻反而有最高的暈眩程度，我們發現個別啟用減暈機制都還是能達到一定的減暈作用，但是當兩者同時啟用時，交互作用之下造成的強烈卡頓其實會產生負面效果。

3. Ns 組：Bo > To > Ro > No 模式

實際排序完全符合假設，儘管在平均數上我們可以觀察到差異，但所有模式的不適程度均不超過 1 分，從此也反應出了對於此組受試者，無論給予何種操弄都不會明顯影響暈眩之結果。

以上結果顯示，不同動暈敏感組別、在特定減暈模式下的效果符合原先預測的趨勢，且每個人對於旋轉和平移錯覺的敏感性也存在差別，所以仍然具有因人而異的客製化必要，只是很遺憾我們無法提供統計上顯著的證據來支持。而對於組內在相同模式間沒有顯著性，以及部分排序與假設不相符的可能原因如下：一為實驗的總樣本數較小，結果容易受到個體差異的影響；二為遊戲時長太短、導航機制之最大前進速度太慢，不足以產生較嚴重的暈眩；三為受限於抽樣誤差、較難取得極端樣本；四為受試者不受控的操作行為，使得減暈效果不如預期。

二、沉浸感

組別	Bo 模式		Ro 模式		To 模式		No 模式	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Bs	4.71	1.21	4.92	1.23	5.36	1.22	5.62	0.73
Rs	4.96	0.60	5.43	0.93	4.72	1.07	5.06	1.06
Ts	5.05	0.74	5.81	0.83	5.39	0.68	5.45	0.96
Ns	5.79	1.37	6.51	0.45	5.66	0.94	6.38	0.42

表 6 沉浸感平均分數之描述性統計

組間之雙因子多變量變異數分析顯示，無論是旋轉敏感（Wilks'Λ=.707, p=.184）、平移敏感（Wilks'Λ=.664, p=.119）或交互作用（Wilks'Λ=.710, p=.188）因子都沒有顯著差異，各組間並沒有在四種模式的平均數中產生明顯不同的沉浸感。

而組內之雙因子相依樣本變異數分析則顯示，在 Bs、Rs、Ns 組的各模式間，沉浸感均沒有達到顯著水準，但 Ts 組在旋轉減暈*平移減暈（ $F_{(1,5)}=19.442, p=.007$ ）

的交互作用下有顯著差異，只是任一的單純主要效果都不明顯，顯示其統計檢定力不足。因此從結果上看，各組內之不同模式在沉浸感方面似乎沒有非常明顯的不同，儘管我們可以樂觀地認為，各減暈模式不會造成太大的體驗損失，但依然不能斷定其完全沒有任何影響，所以我們將分別比較各組在各減暈模式間的平均數來了解潛在的趨勢（表 6，圖 7）。

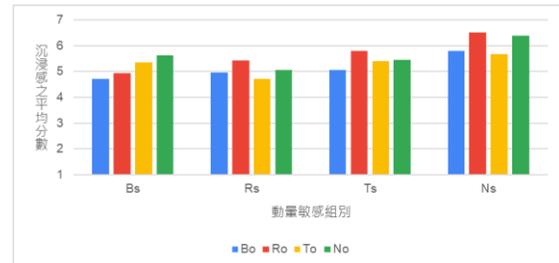


圖 7 不同組別之不同模式的沉浸感長條圖

1. Bs 組：No > To > Ro > Bo 模式

實際排序與假設完全相符，顯示開啟任一減暈機制的確造成了沉浸感的喪失，且同時開啟旋轉減暈與平移減暈造成的代價將會更大、更影響體驗。

2. Rs 組：Ro > No > Bo > To 模式

只開啟單一的旋轉減暈確實比開啟兩種減暈之沉浸感高，且完全不開啟者則大於完全開啟者，顯示了沉浸感在減暈機制下仍然有受到影響。只是關於 Ro 模式較 No 模式來得高之結果卻與常理不太相符，不過由於整體平均差異其實不大，所以可能來自於每次實驗的外界環境音不太相同，亦或是個人主觀感受差異而造成的偏差。

3. Ts 組：Ro > No > To > Bo 模式

趨勢與假設完全相符，顯示減暈機制在降低暈眩的過程中的確還是會犧牲部分的沉浸感，且兩者都開啟時將損失得更多。

4. Ns 組：Ro > No > Bo > To 模式

開啟減暈機制確實會讓沉浸感降低，而兩種減暈機制同時開啟，也造成了更大程度的體驗受損。至於其他不相符之排序，因為整體平均差異同樣不大，本研究認為原因與前述所提及之類似。

以上結果顯示，統計上的不顯著性，並非真的表示沉浸感沒有在不同減暈模式間產生差異，本研究仍然發現，對於任一動暈敏感組別來說，開啟減暈機制還是有造成沉浸感的下降。不過，有些易暈的受試者表示，若暈眩能被減少、部分體驗被破壞也無妨，不易暈的受試者則更希望能有順暢的體驗，此亦是本研究想達到的最終目標，並從中再次反應出了客製化減暈的必要性。對於不同的族群而言，給定適合的減暈模式，才能讓每一組都可以在暈眩和沉浸感中尋求自己的平衡。

三、操作性

組間之雙因子多變量變異數分析顯示，只有旋轉敏感 (Wilks' $\Lambda=0.580$, $p=0.045$) 因子有達到顯著水準，又以旋轉減暈關、平移減暈開之 To ($F_{(1,20)}=13.893$, $p=0.001$) 模式最為顯著，其中低旋轉敏感者的操作率明顯高於高旋轉敏感者。

而組內之雙因子相依樣本變異數分析則顯示，在 Rs ($F_{(1,5)}=24.492$, $p=0.004$) 和 Ns ($F_{(1,5)}=7.793$, $p=0.038$) 組中，均是開啟平移減暈機制會顯著比關閉時的操作性低，在 Ts ($F_{(1,5)}=11.926$, $p=0.018$) 組中，則是開啟旋轉減暈機制會顯著低於關閉，從各組的模式排序亦發現 (圖 8)，No 模式在所有組別中都有最高的操作性，說明了任一減暈機制的開啟，都會使操作容易度、順暢度降低。有許多受試者也表示，旋轉或平移的跳格會不好控制方向，而在整體模式間亦顯現出了這樣的情況，操作性由高至低排列為 No > Ro > To > Bo 模式。

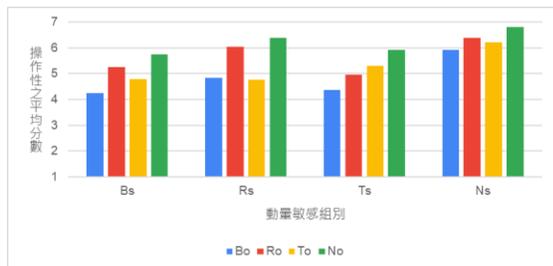


圖 8 不同組別之不同模式的操作性長條圖

四、完成率

組間之雙因子多變量變異數分析同樣也顯示旋轉敏感 (Wilks' $\Lambda=0.631$, $p=0.037$) 因子有顯著差異，且在 To ($F_{(1,20)}=6.045$, $p=0.023$) 模式下低旋轉敏感者的完成率顯著高於高旋轉敏感者。

而組內之雙因子相依樣本變異數分析則顯示，在 Ts ($F_{(1,5)}=7.046$, $p=0.045$) 和 Ns ($F_{(1,5)}=8.125$, $p=0.036$) 組中，旋轉減暈機制開啟之完成率均顯著低於關閉，從各組的模式排序亦發現 (圖 9)，No 模式在所有組別中都有最高的完成率且均為 100%，但開啟了任一減暈機制，都會造成完成率的下降。有很多受試者表示，減暈機制之固定幅度的移動，有時會導致沒看到金幣而失誤的情況，其也可以在整體模式間的比較觀察到此現象，完成率由高至低排列為 No > To > Ro > Bo 模式。

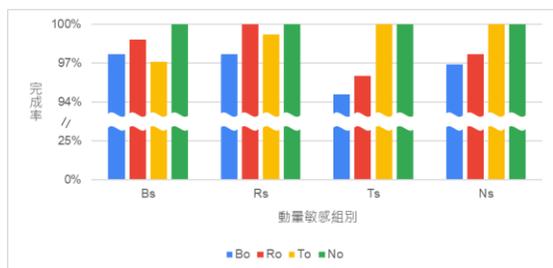


圖 9 不同組別之不同模式的完成率長條圖

結論

根據實驗結果，我們將重點結論統整如下：

1. 以 Bs 組而言，只要有開啟減暈機制都會比完全無開啟之暈眩程度低，又以只開啟旋轉減暈之 Ro 模式有最低的暈眩值
2. 以 Rs 組而言，開啟不必要的平移減暈機制會導致較高的不適感，但完全無開啟減暈機制之 No 模式卻有最低的暈眩值
3. 以 Ts 組而言，完全無開啟與開啟不必要的旋轉減暈機制都會有較高的暈眩程度，只開啟平移減暈之 To 模式則有最低的暈眩值
4. 以 Ns 組而言，同時開啟兩種不必要的減暈機制會有最高的暈眩值，任一開啟者次之，完全無開啟者之 No 模式有最低的暈眩值
5. 在綜合情境下，開啟任一減暈機制仍然可以降低暈眩程度，符合文獻在單一情境下的結果[23][25]，但同時開啟兩種減暈機制，不僅無法更有效減輕暈眩，反而還會導致暈眩程度上升
6. 對於任一動暈敏感組別，雖然沉浸感沒有在減暈模式間有顯著差異，但開啟減暈機制還是會使沉浸感下降，且操作性和完成率亦會變低。

在本研究中，儘管部分實驗結果沒有在統計上達到顯著，部分也與預期假設不符，但我們還是從趨勢中觀察到，特定動暈敏感組別、在特定減暈模式下確實有助於減少不適，且每個人對於旋轉錯覺和平移錯覺的動暈敏感程度亦存在差異，說明了客製化減暈的確有其需求，並且也具備了有效性。而另一方面，減暈機制的開啟雖會降低沉浸感，但從受試者的實驗表現和肯定答覆中，我們亦得知，對於需要減暈的人而言、喪失部分體驗仍是可以被接受的，反之，對於不需要者，不破壞其沉浸感才是最為舒適的狀態，此同樣亦符合本研究最初的期望，更再次呈現出了客製化減暈的必要性。

因此，本研究之貢獻如下：其一是我們設計了一套前置測試系統，能有效量測使用者對於移動錯覺的動暈敏感特性，以進行事前的分類；其二是透過嚴謹的實驗控制，我們探索了不同動暈敏感族群、在不同減暈模式下的反應，並從趨勢中證實了客製化減暈的可行性；其三是我們提出了各類動暈敏感族群可能適用的減暈模式，以在未來的研究發展上提供一些建議；其四則是我們嘗試在旋轉和平移並行的情境下，同時套用旋轉和平移減暈機制，而最後得出了單一開啟仍能降低不適感，但雙重開啟反而會提高暈眩程度的結果。

研究限制與未來建議

本研究為了能有效控制變因，所以在應用場域上較為侷限，在因子的選擇上也較為簡化。目前僅針對靜態 VR 系統作處理，且限縮於第一人稱視角，鎖定在 Y 軸和 Z 軸，並只使用在吃金幣的遊戲類型；此外，我們亦只有針對受試者在旋轉、平移兩種敏感類型的高低進行分類，

給定的減暈機制同樣也只有旋轉、平移兩種減暈機制的開關，而當前的客製化調整更只有透過移動錯覺之單一影響要素來減輕暈眩，可能會使得整體結果較為狹隘。

未來可以考慮操弄不同的自變項，例如加入視角、軸向、情境、暈眩要素、甚至其他類型的減暈機制等更多因子，或可以在現有的基礎上增加水準、使用連續而非類別變數來控制，也可以評估不同的依變項，例如完成時間，亦可以透過不同的資料分析方式，例如以減暈機制而非敏感組別作為切入點，來探討更為複雜的影響。期望藉由本研究，能為日後相關的學者開拓更多的可能性。

致謝

本研究在科技部計畫 (MOST 108-2221-E-004-007-MY3) 資助下完成，特此致謝。

參考文獻

- [1] C. Boletsis and J. E. Cedergren. 2019. VR Locomotion in the New Era of Virtual Reality: An Empirical Comparison of Prevalent Techniques. *Adv. Human-Computer Interact.*, vol. 2019.
- [2] J. J. LaViola. 2000. A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bull.*, 32, 1, 47–56.
- [3] M. E. McCauley and T. J. Sharkey. 1992. Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments. *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, 1, 3, 311–318.
- [4] L. J. Hettinger and G. E. Riccio. 1992. Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments. *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, 1, 3, 306–310.
- [5] J. Reason and J. Brand. 1975. *Motion sickness*.
- [6] G. E. Riccio and T. A. Stoffregen. 1991. An ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability. *Ecol. Psychol.*, 3, 3, 195–240.
- [7] M. Treisman. 1977. Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science (80-)*, 197, 4302, 493–495.
- [8] I. B. McIntosh. 1998. Motion Sickness—Questions and Answers. *J. Travel Med.*, 5, 2, 89–91.
- [9] S. Klosterhalfen, S. Kellermann, F. Pan, U. Stockhorst, G. Hall, and P. Enck. 2005. Effects of ethnicity and gender on motion sickness susceptibility. *Aviat. Space. Environ. Med.*, 76, 11, 1051–1057.
- [10] L. L. Arns and M. M. Cerney. 2005. The relationship between age and incidence of cybersickness among immersive environment users. In *IEEE Proc. of VR 2005*, 267–268.
- [11] Z. H. Taha, Y. H. Jen, R. A. R. Gadzila, and A. P. T. Chai. 2009. The effect of body weight and height on incidence of cyber sickness among immersive environment malaysian users. In *Proc. of 17th World Congress on Ergonomics*.
- [12] K. M. Stanney, K. S. Hale, I. Nahmens, and R. S. Kennedy. 2003. What to expect from immersive virtual environment exposure: influences of gender, body mass index, and past experience. *Hum. Factors*, 45, 3, 504–20.
- [13] L. Rebenitsch and C. Owen. Individual variation in susceptibility to cybersickness. 2014. In *Proc. of UIST 2014 - Proc. 27th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, 309–318.
- [14] S. Weech, J. P. Varghese, and M. Barnett-Cowan. 2018. Estimating the sensorimotor components of cybersickness. *J. Neurophysiol.*, 120, 5, 2201–2217.
- [15] B. Keshavarz, B. E. Riecke, L. J. Hettinger, and J. L. Campos. 2015. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Front. Psychol.*, 6.
- [16] A. Kemeny, P. George, F. Mérienne, and F. Colombet. 2017. New VR navigation techniques to reduce cybersickness. In *Proc. of IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology*, 48–53.
- [17] R. H. Y. So, W. T. Lo, and A. T. K. Ho. 2001. Effects of Navigation Speed on Motion Sickness Caused by an Immersive Virtual Environment. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, 43, 3, 452–461.
- [18] S. Hu, R. M. Stern, M. W. Vasey, and K. L. Koch. 1989. Motion sickness and gastric myoelectric activity as a function of speed of rotation of a circularvection drum. *Aviat. Space. Environ. Med.*, 60, 5, 411–414.
- [19] C. Mueller, G. Wiest, and L. Deecke. 1990. Vertically moving visual stimuli and verticalvection: A tool against space motion sickness. In *ESA, Fourth European Symposium on Life Sciences Research in Space p 157-161(SEE N 91-19572 11-51)*.
- [20] R. S. Kennedy, L. J. Hettinger, D. L. Harm, J. M. Ordy, and W. P. Dunlap. 1996. Psychophysical Scaling of Circular Vection (CV) Produced by Optokinetic (OKN) Motion: Individual Differences and Effects of Practice. *J. Vestib. Res.*, 6, 5, 331–341.
- [21] A. S. Fernandes and S. K. Feiner. 2016. Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI 2016 - Proceedings*. 201–210.
- [22] P. Budhiraja, M. R. Miller, A. K. Modi, and D. Forsyth. 2017. Rotation Blurring: Use of Artificial Blurring to Reduce Cybersickness in Virtual Reality First Person Shooters. arXiv:1710.02599.
- [23] Y. Farmani and R. J. Teather. 2018. Viewpoint snapping to reduce cybersickness in virtual reality. In *Proc. of Graph. Interface*, 159–166.
- [24] E. Bozgeyikli, A. Raij, S. Katkooori, and R. Dubey. 2016. Point & Teleport locomotion technique for virtual

reality. In *CHI PLAY 2016 - Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 205–216.

- [25] Y. Farmani and R. J. Teather. 2020. Evaluating discrete viewpoint control to reduce cybersickness in virtual reality. *Virtual Real.*
- [26] J. Plouzeau, J.-R. Chardonnet, and F. Merienne. 2018. Using Cybersickness Indicators to Adapt Navigation in Virtual Reality: A Pre-Study. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 14, 661–662.
- [27] W. T. Lo and R. H. Y. So. 2001. Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Appl. Ergon.*, 32, 1, 1–14.
- [28] J. F. Golding. 2006. Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Pers. Individ. Dif.*, 41, 2, 237–248.
- [29] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal. 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.*, 3, 3, 203–220.
- [30] L. Rebenitsch and C. Owen. 2016. Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Real.*, 20, 2, 101–125.
- [31] T. Schubert, F. Friedmann, and H. Regenbrecht. 2001. The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 10, 3, 266–281.