

國立政治大學資訊科學系
Department of Computer Science
National Chengchi University

碩士論文
Master's Thesis

用於減緩虛擬實境暈眩之輔助系統
An Auxiliary System of Alleviating Motion Sickness in Virtual
Environment

指導教授： 余能豪 博士

研究生： 王中璋 撰

中華民國一一一年四月
2022 April

摘要

虛擬實境技術在過去幾年越發成熟，從初期的硬體及軟體開發已經解決了部分技術難題來提升使用者對於虛擬實境的體驗。而最困難的問題其中之一——暈動症（cybersickness）仍未解決，它會導致頭痛、噁心、嘔吐、疲勞等症狀。

暈動症的主要原因是來自於視覺感知和前庭系統間的衝突。許多應用程式或遊戲會要求使用者在超出追蹤設備涵蓋面積的虛擬環境中移動，此時會使用到虛擬移動。許多使用者曾回報說，當他們在虛擬環境中使用虛擬搖桿進行移動，而身體保持靜止時，容易造成暈動症。

為了提供更高的沈浸感並減少不適感，本研究設計了一套應用於頭戴式裝置（HMD）上的震動穿戴裝置。透過 HMD 上四個位置的震動馬達，欲模擬出在連續的平面移動（如駕駛、滑行）上，四個方向所受到的慣性力回饋。

本系統總共徵集了 18 位受測者，欲了解使用者於不同情況下，各裝置降低暈眩的成效。此外，也對使用者的回饋進行了質化分析，討論目前裝置存在的問題及未來可改善的方向。

關鍵字：虛擬實境、暈動症、頭戴式裝置、360 影片、駕駛模擬、觸覺回饋

Abstract

Virtual reality technology has become more mature in the past few years, and some technical issues have been solved by early hardware and software development to improve the user experience of virtual reality. One of the most difficult issues remains: cybersickness, which causes headaches, nausea, vomiting and fatigue.

The main cause of motion sickness is a conflict between visual perception and the vestibular system. Many applications or games require the user to move in a virtual environment that exceeds the area covered by the tracking device. Many users have reported suffering from motion sickness when they use a virtual stick to move around in a virtual environment while their body remains still.

In order to provide a higher immersion sensation and reduce discomfort, a vibrating wearable device was designed for the head-mounted device (HMD). Through the vibration motor at four positions on the HMD, we want to simulate the inertial force feedback received in four directions in the continuous planar movement such as driving and sliding.

A total of 18 subjects were collected for this system to understand the effectiveness of each device in reducing dizziness for users under different conditions. In addition, a qualitative analysis of the user's feedback was conducted to discuss the current problems of the device and the direction for improvement in the future.

Keywords: Virtual reality, Motion sickness, Head mounted display, 360 videos, Driving simulations, Haptic feedback

目錄

摘要	i
Abstract	ii
目錄	iii
圖目錄	v
第一章、緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	2
第二章、文獻探討	4
2.1 減輕暈動症的方法	4
2.2 頭部周圍的震動回饋	8
第三章、研究方法	11
3.1 振動觸覺反饋的一般模型	11
3.2 設計理念	12
3.3 振觸覺設計細節	13
3.4 系統原型	15
第四章、系統評估	17
4.1 實驗設計	17
4.2 參與者	18
4.3 設備與實驗環境	19

4.4	流程	22
4.5	假設	23
4.6	實驗結果	24
	4.6.1VR 暈動症部分	24
	4.6.2 主觀回答部分	27
第五章、	結論與建議	32
參考文獻		34
附錄一	SSQ 問卷	44
附錄二	沉浸感問卷	45



圖目錄

圖 1-1 PhantomLegs 示意圖	3
圖 1-2 WalkingVibe 示意圖	3
圖 2-1 傳送示意圖	4
圖 2-2 縮小 FOV 示意圖	5
圖 2-3 休息框架示意圖	5
圖 2-4 主動的身體運動示意圖	6
圖 2-5 前庭電刺激 (GVS) 示意圖	7
圖 2-6 運動平台示意圖	8
圖 2-7 頭部振動回饋示意圖	9
圖 2-8 BCV 示意圖	10
圖 3-1 本研究設計裝置之馬達分配圖	13
圖 3-2 各施力情況對應馬達震動圖	14
圖 3-3 馬達置於 HMD 海綿俯瞰圖	16
圖 3-4 配戴者示意圖	16
圖 4-1 BCV 研究中的固定路徑圖	18
圖 4-2 Cinemachine 繪製的路線圖	19
圖 4-3 戴上頭盔在實驗開始前受測者所觀看之畫面	20
圖 4-4 整體路徑圖中時間與速度的對應圖	21
圖 4-5 兔子於實驗過程中的影像截圖	21
圖 4-6 抗暈眩輔助裝置與 BCV 給予觸覺刺激時機的差異	22

圖 4-7 各種情況中隨時間變化平均 DS 的值	25
圖 4-8 每個子量表中 SSQ 的平均分數和每個條件的總分	26
圖 4-9 定性結果的分層條形圖	28
圖 4-10 以堆疊條形圖來呈現排名偏好的定性結果	29
圖 4-11 改編自 Benson(1988)的暈動症模型	31



第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

虛擬實境（VR）技術已廣泛使用於娛樂、教育和技能培訓等多個領域。然而 VR 技術存在一些問題，阻礙了使用者融入 VR 世界。

當持續處在 VR 環境當中，會出現噁心、頭痛和疲勞等症狀，如果涉及到持續的運動，症狀會加重。隨著傳感和顯示技術的快速發展，軟硬體（如 Motion-to-Photon 延遲、低幀率等）的問題將最終得到解決。然而，VR 運動中出現的暈動病，又稱 cybersickness[32]、visual induced motion sickness（VIMS）[5]或 simulator sickness[29]，是由 VR 內容本身引起的，不能通過硬體升級輕易解決。VIMS 的症狀與傳統的暈動病非常相似，不同之處在於在 VIMS[31]期間，身體的運動通常受到限制。關於暈車的原因，最廣為接受的理論是感覺沖突理論[39]，該理論認為暈車是由視覺和前庭感知之間的沖突引起的。當在沒有實際身體運動的虛擬環境中駕駛時，使用者只接受視覺感知，而缺乏前庭感知。

在體驗虛擬實境運動時，如駕駛、飛行、騎行和滑動，由於物理空間有限，使用者通常使用控制器或操縱桿來啟動人工運動。這種沖突來自於他們的視覺，告訴他們的大腦他們在移動，而他們的本體感覺是靜止的。這種不匹配激活了人體的防禦機制，從而引起類似中毒的反應。[53]

1.2 研究目的

為了減少虛擬實境運動中的暈動病，已經提出了幾種不同方面的折衷方法。減少視場[17]、視點捕捉[45]和瞬間移動[26]的目的是減少視覺刺激，但三者都減少了沈浸感。添加像汽車框架這樣的休息框架[9]可以幫助使用者建立他們在汽車中保持靜止的內部心理模型，但有些場景沒有框架可以實現，如主動滑動或被動攝像機運動。人工休息框架很有效，但它也會極大地影響沈浸感。一些研究採用前庭刺激的方法來減少感覺不匹，如前庭電刺激（Galvanic vestibular stimulation，下簡稱 GVS）[10]和骨傳導振動（Bone-conducted vibration，下簡稱 BCV）[50]試圖通過分散使用者大腦的平衡部分來幹擾使用者的前庭系統。因此，使用者的大腦對前庭信號[30]的權重更小，感知到的感覺不匹配也更少。值得注意的是，GVS 對某些人群構成風險，長期暴露對身體的潛在風險尚不清楚。

主動的身體運動[40]，運動平台[2]提供一定程度的運動感覺來降低感覺不匹配。但身體運動容易引起疲勞，只適合主動運動，而運動平台占用空間較大，成本較高。PhantomLegs[34]和 WalkingVibe[24]提供不同類型的反饋來補償失去的前庭刺激，如圖 1-1、1-2 所示。他們使用微妙的觸覺提示來增強行走場景的真實感，同時減少暈動症。不過，對其有效性的解釋還需要研究。

本研究的目的是繼續 PhantomLegs[34]和 WalkingVibe[24]的概念，在頭戴式裝置上設計了帶有觸覺反饋的振動器，增加其震動模式以適應更多情境。震動模式對應在連續的平面運動中（如駕駛、騎自行車、滑行等），由加速、減速或轉彎引起的四個方向的慣性力，它們最容易引起暈動病。本研究進行了一項 18 名受試者的實驗，將新的方法與 BCV 和僅視覺（未經修改）的方法進行比較，然後討論了設計的影響以及背後

可能的機制。



圖 1-1 PhantomLegs 示意圖(IEEE VR' 19)



圖 1-2 WalkingVibe 示意圖(CHI' 20)

第二章、 文獻探討

2.1 減輕暈動症的方法

在 VR 軟體中，傳送[26][7][23]和縮小 FOV (field-of-view) [8][17]方法通常用於緩解暈動症，如圖 2-1、2-2 所示。瞬間傳送可以移除或縮短運動的過程。沒有動態光流後，感覺沖突被消除，但沈浸感也降低了。視場縮小技術目的在減少周邊視覺周圍的視覺刺激，但同時體驗也有所減少。例如：FPS 遊戲需要關注周圍的敵人，減少的 FOV 可能會阻礙玩家獵殺敵人的表現。



圖 2-1 傳送示意圖(UIST' 18)



圖 2-2 縮小 FOV 示意圖(IEEE 3DUI' 16)

休息框架[9][41][55]技術如圖 2-3 所示，改變了使用者的心理模型，讓使用者的大腦將場景的某些部分理解為車輛的運動，而不是身體的運動。這種方法可以有效地減弱感覺不匹配，但泛化能力不佳。例如，當坐火車或飛機時，我們可以有一個窗戶作為框架，但滑冰或滑雪沒有自然框架對應。主動的身體運動[48][25][47]，比如原地行走[40]如圖 2-4 所示，則可以通過引入一些身體運動來減輕暈動症，然而它們很快就會引起身體疲勞。



圖 2-3 休息框架示意圖(GDC' 15)

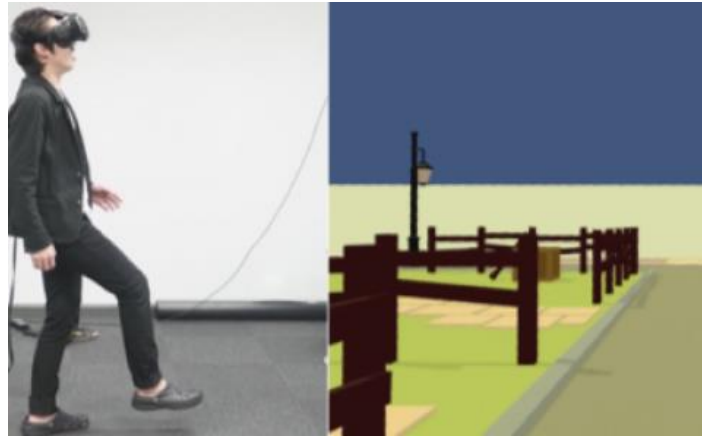


圖 2-4 主動的身體運動示意圖(MUM' 15)

感官再耦合的方法有許多種[10][50][51][12][35][2][18][36]，強調利用多感官信號來補償視覺信號。前庭電刺激（GVS）如圖 2-5 所示，通過放置在使用者耳後乳突上的電極施加電流，電子信號直接傳入使用者的前庭系統，並誘導身體搖擺。無論是有噪聲的 GVS[51]還是與在虛擬運動中的偏航方向同步的 GVS[18]都可以減少暈動症。然而，GVS 對某些人群構成健康風險，且長期暴露可能會對身體造成未知的風險。Sarah D'Amour 等人[12]在播放騎自行車的影片時，使用兩個風扇在使用者前方產生氣流。他們討論了這種效果可能來自於皮膚觸覺，這與使用者的心理模型一致，或者新鮮空氣降低體溫，進而緩解疾病[38]。



圖 2-5 前庭電刺激（GVS）示意圖(Space.com Aug 27, 2010)

運動平台[35][2]如圖 2-6 所示，提供更生動的運動體驗，已用於減少虛擬實境產生的暈動症，但這種方法可能會引起傳統的暈動病，並且它的設置不易、價格昂貴。一些研究試圖簡化運動平台，在座椅[12][35]上安裝振動器，其中一些對較低的 SSQ（sickness susceptibility questionnaire）分數有影響，但另一些沒有。Sarah D'Amour 等人認為，頭部振動可能起作用，因為頭部的靈敏度更高。PhantomLegs[34]和 WalkingVibe[24]使用與腳步同步的敲擊和震動，以減少暈動症病增加沉浸感。



圖 2-6 運動平台示意圖(Elsevier Vol.68 Jan 2020)

2.2 頭部周圍的震動回饋

之前的大多數文獻都採用了振動觸覺反饋來增加沈浸感。FaceHaptics[52]使用了一個附著在頭戴式裝置 (HMD) 上的機器人手臂，它可以旋轉和移動，為臉部提供風、溫暖或噴水等觸覺提示。

Masque[49]在 HMD 上設計了四個定制的牽引器，以提供面部皮膚拉伸，可用於賽車，物體碰撞，或觀看影片。VaiR[43]利用兩套旋轉空氣噴嘴進行了精確而逼真的氣流模擬。Headblastor[33]使用了 6 個頭裝空氣推進噴氣機噴射壓縮空氣，以迫使頭部移動，橫向加速度的感知改善了 VR 中的使用者體驗、沉浸感和主觀回答。MotionRing[56]使用了環繞在頭部的震動馬達，透過具方向性的間隔馬達震動，提高了使用者在運動事件上的方向性感知和趣味性。一些研究將頭部振動回饋 [19][3][28][16][42][15][14] 作為導航線索，Oliver Beren Kaul 等人[27]利用分布在頭部周圍三個同心橢圓上的多個振動器進行定向引導。他們使用同樣的振動回饋裝置[28]如

圖 2-7 所示，進一步研究了頭部的漏鬥狀錯覺。



圖 2-7 頭部振動回饋示意圖(CHI' 17)

Jelte Bos[4]在偏縱軸旋轉研究中對傳統的暈動症進行了研究，發現通過對頭部施加高頻振動和精神分散可以減少暈動症的程度。WalkingVibe[24]使用輕微的頭部震動來減緩走路時的暈動症。與 Weech 等人[50]在角加速度時應用 BCV 不同，WalkingVibe 在聽到腳步聲時應用頭部振動，從而增加行走的真實感。

Séamas Weech 等人[50][51]使用隨機和角度對應的骨傳導振動（BCV），放置在乳突骨上模擬 GVS 的影響，如圖 2-8 所示。他們發現，BCV 可能像 GVS 方法一樣干擾前庭系統。在他們的研究中，諸如在場和沉浸感等主觀體驗並未得到評估。BCV 的頻率範圍為 200-500Hz[50]，使用者在聽到振動頻率的聲音時可能會感到不適，感到厭煩。



圖 2-8 BCV 示意圖(Multisens Res Jan 2017)

在 WalkingVibe 中，得知了震動模式能有效減緩暈動症，但其應用情境僅限於走路。這次研究中，擴展了 WalkingVibe 的理念，將原有的裝置改善，並增加了震動的模式以適應更多的應用環境，如持續運動的環境（如搭乘交通工具）。

第三章、 研究方法

因為整體使用體驗是吸引人們進入 VR 的關鍵。我認為，減少暈動症的技術不應該帶來其他副作用，如額外的不適或較低的沈浸感。本研究的目標是利用頭部振動來減緩暈動症，同時增強 VR 體驗。本研究選擇頭部振動有兩個原因：一是頭部對振動[51]比較敏感。Walkingvibe 和 BCV 都顯示了其有效性，它們都表明頭部的振動很可能被傳導到前庭系統，從而達到減少感覺不匹配的效果。其次，頭部的振動也可以被視為一種觸覺提示，幫助使用者在現實生活體驗和虛擬實境之間建立聯系。只要建立了心理模型，就有可能進一步減緩暈動症和增加沈浸感。

3.1 振動觸覺反饋的一般模型

為了推廣該設計，本研究將振動模式參數化為三個組件：事件、映射和閾值。

事件是裝置刺激的選擇時機，一個好的時機可以幫助使用者連接觸覺提示和觸發時機，進而建立心理模型。如果大腦無法理解事件發生的時機，它就會將震動視為幹擾，從而降低使用者的沈浸感。

映射是指從事件發生後對應的振動強度和頭部受刺激位置。映射可以進一步

增強連接，振動模式需與事件本身相對應。

由於對振動的敏感性因人而異，本研究讓使用者設置他們能感受到的最低強度 (*mini*) 和他們能忍受的最高強度 (*maxi*)，然後將事件的強度映射到這個範圍。設置閾值是為了防止對大腦的過度刺激。當皮膚受到長期持續的刺激時，大腦傾向於將其視為噪音並忽略它，從而抵消之後刺激的效果。

3.2 設計理念

在現實中，所有的運動，除了行走和奔跑外，幾乎可以視作是身體乘載於一些移動的交通工具上。這種交通工具可以是自行車、汽車、天空或滑板，取決於運動環境本身。

本研究目前只考慮二維運動，在運動中，對人體影響最大的事件是慣性力或向心力的產生。例如，當公車或汽車等車輛突然加速或急轉彎時，我們的身體會立即向相反的方向傾斜，這些情況也會導致最嚴重的暈動病。前庭感覺系統由半規管和耳石器官兩部分組成。半規管的作用是感知旋轉，而耳石器官則對線性加速度[20]作出反應。在虛擬實境運動過程中，兩個前庭信號均丟失，會導致強烈的不匹配。因此，選擇慣性力作為反饋事件可以潛在地減少感覺沖突。然後，本研究選擇在運動中最常見的加速、減速、左轉彎和右轉彎時施加振動，其模式對應於慣性力的四個方向。

3.3 振觸覺設計細節

振動器在頭部的位位置參照 Oliver[3]的裝置，選擇前額兩側和頭後下部，如圖 3-1 所示。這四種姿勢距離耳朵足夠遠，可以減少振動帶來的不適，產生的振動在頭部四邊則可以清楚地分辨出來。當慣性力向後傾斜（例如加速）時，背部的兩個振動器（LB, RB）被激活。當慣性力前傾（例如減速）時，激活前面兩個（LF, RF）；當慣性力向左移動（如右轉）時，激活左邊兩個（LF, LB）；當慣性力右移（如左轉）時，激活右邊兩個（RF, RB），如圖 3-2 所示。



圖 3-1 本研究設計裝置之馬達分配圖

Inertial force	Scenario	Position
↑	Deceleration	LF, RF
↓	Acceleration	LB, RB
→	Turn left	RF, RB
←	Turn right	LF, LB

圖 3-2 各施力情況對應馬達震動圖

當使用者頭部轉動時，振動位置會發生變化。例如，當車體加速時，如果使用者將頭部轉向右側，加速度產生的慣性力會轉移到頭部的右側。因此，RF 和 RB 被激活。

為了增加沈浸感，本研究將振動強度映射到事件中慣性力的大小。本研究用重力來衡量人們如何感知慣性力，因此，前面定義的*mini*和*maxi*分別對應於人類可感知的下限和人類可忍受的上限。根據人類所能感受到的最低重力在 0.005G 至 0.1G 之間。在前導研究中，發現當下限閾值低於 0.15G 時，振動會過於頻繁，所以本研究將最終的下限閾值設為 0.15G。對於上限的部分，觀察到在正常的汽車行駛中，重力皆小於 1G，因為超過 1G 的慣性力很可能導致翻車。此外，在 1G 加速的情況下，從 0 到 100 公里／小時需要 2.8 秒，這超過了一輛普通汽車的動力，因此，本研究將上限閾值設置為 1G。綜上所述，在虛擬環境中導航時，當重

力低於0.15G時振動馬達處於非活動狀態，當重力大於1G時振動棒不斷輸出*maxi*。如果重力在這兩個值之間，將對振動器強度進行線性插值，這樣使用者就可以感覺到力的變化。

3.4 系統原型

為了佩戴方便，本研究將4個ERM振動器（品牌：parallax，12mm硬幣型，3.3V, 90ma, 9000 rpm）插入HMD的面墊海綿，如圖3-3所示，並將Arduino Nano連接到HMD的前端，連接到HTC Vive Pro的USB type-c端口，如圖3-4所示。VR內容是使用Unity v2019開發。觀看者的運動加速度是按照畫面的幀數計算。當幅度超過下限閾值時，調用Arduino輸出前面提到的相應的振動模式。振動馬達由100~240的PWM信號控制，可產生90Hz~185Hz的振動頻率。



圖 3-3 馬達置於 HMD 海綿俯瞰圖



圖 3-4 配戴者示意圖

第四章、系統評估

4.1 實驗設計

本研究進行了一個為期三天的受試者內設計實驗，測試在三種情況下減少暈動病的有效性，以及對真實性、沈浸感和享受感的主觀測量：(1)未修改的情況，(2)應用骨導振動，(3)輔助頭部振動裝置。本研究將這些情況稱為純視覺、骨傳導振動(BCV)和抗暈眩輔助裝置。除了純視覺作為基準，本研究加入了 BCV，因為它也適用於持續運動的情況，並試圖通過提供額外的感官信號來解決暈動症。

在最初使用 BCV[50]的實驗中，他們只對特定的路線進行了測試，如圖 4-1 所示，所以也想測試在更一般的環境中是否仍然有效果。此外，由於骨傳導的頻率與人類的可聽性範圍有關，本研究欲了解這種額外的音頻是否會影響使用者體驗，如沈浸感。以及，抗暈眩輔助裝置是通過分心（如 BCV），還是通過一致的自我運動心理模型作為框架來達到減緩暈動症的目的，所以對於專注度的測試是在每一種情況結束時測量的。該實驗由研究倫理委員會批准。

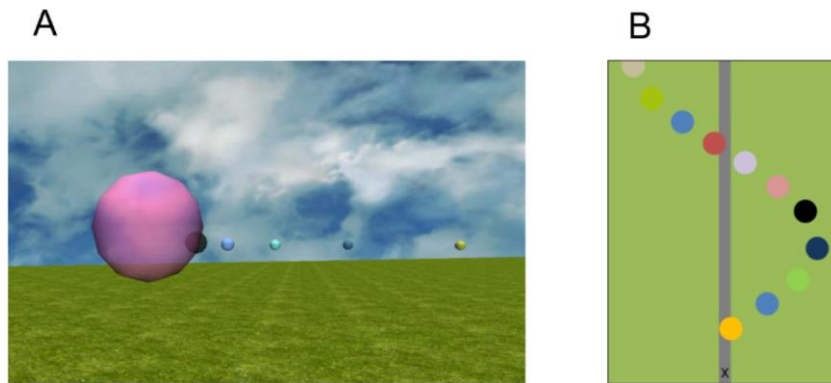


圖 4-1 BCV 研究中的固定路徑圖(PLOS ONE Mar 2018)

4.2 參與者

本研究招募了 18 名受試者，年齡在 20 - 28 歲之間(11 名男性和 7 名女性)，暈動症易感性問卷(MSSQ)得分在 10 - 90 之間，即第 10 百分位數和第 90 百分位數[21]。所有受測者皆視力正常或矯正至正常，且在過去四個月內體驗 VR 的次數不超過三次。

參與者被隨機分配到六個完全平衡組中的一個。每個參與者都參加了為期三天的實驗，每次 30 分鐘。由於該實驗是在 COVID-19 流行期間進行的，每次實驗前會確保所有參與者都處於健康狀態，並在實驗結束後使用 75% 的酒精消毒 HMD 海綿。

4.3 設備與實驗環境

實驗在一個安靜的房間里進行，空調溫度恒定為攝氏 24 度。實驗使用的是 HTC Vive Pro HMD，連接到一台帶有 i7-8700K CPU、Nvidia 1080Ti 顯卡和 16G RAM 的桌機。賽道場景是賽車賽道模型制作(Assetto corsa)遊戲[54]與 Unity 3D ver 2019.3.3。由 Unity 內建的 cinemachine 制作的路徑如圖 4-2 所示，總長度 5703 米，28 個轉彎。

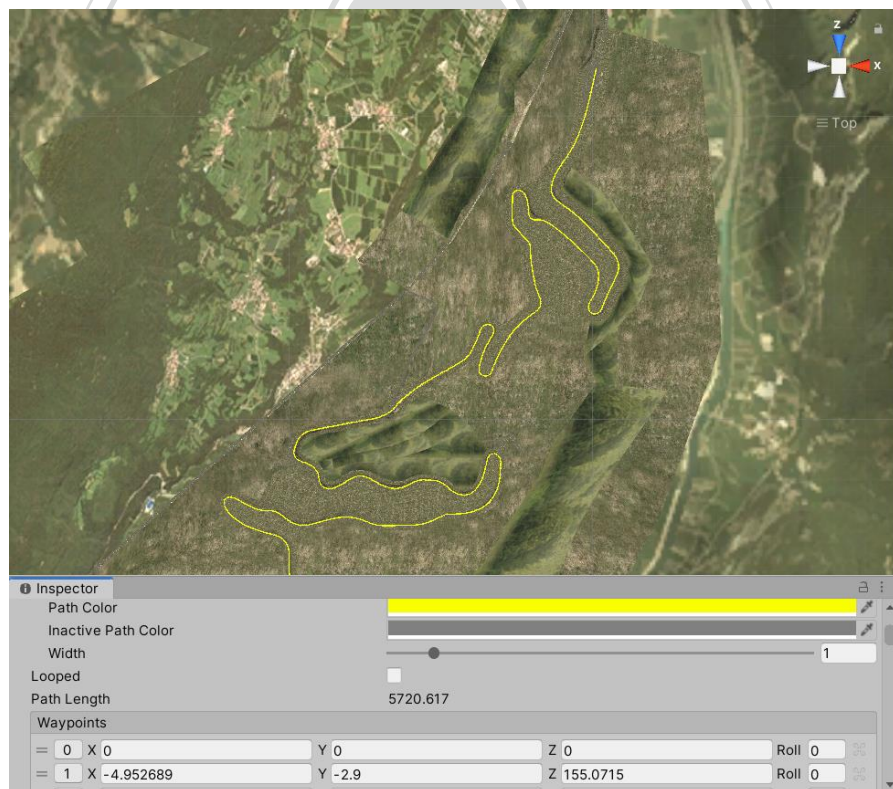


圖 4-2 Cinemachine 繪製的路線圖

在戴上頭盔實驗開始前，會讓受測者看到車體框架，如同坐在副駕駛座，如

圖 4-3 所示。為了控制純粹通過休息框架的方法減少暈車，在實驗開始後便會去掉車架。在主動駕駛中，由於駕駛習慣的不同，每個人的加速、剎車、轉彎等動作的時機也不同，因此實驗中的刺激不能很好地控制。不過，先前的研究[46]表明，乘客比司機更容易暈車，因為他們不能很好地預測汽車的狀況，比如剎車的時機，因此，我們在這個實驗中只考慮了被動駕駛的情況。



圖 4-3 戴上頭盔在實驗開始前受測者所觀看之畫面

我們模擬了一個類似於真實遊戲的賽車遊戲場景。速度範圍為 0~130 km/h，跑完整條跑道花費 5 分鐘，如圖 4-4 所示。實驗過程中，有 3 個地方會讓使用者被迫留下，設計了讓一只兔子在這些路徑上跳過去，如圖 4-5 所示。圖 4-6 顯示了抗暈眩輔助裝置和 BCV 給予觸覺刺激時機的差異。

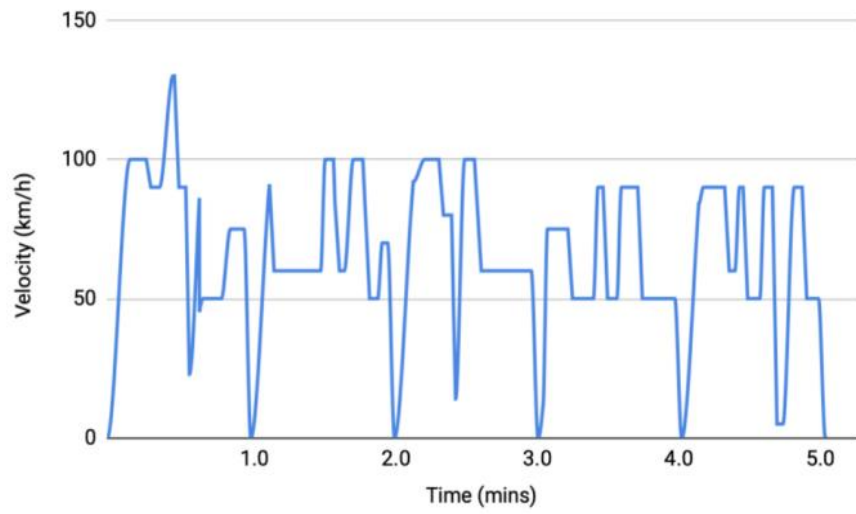


圖 4-4 整體路徑圖中時間與速度的對應圖



圖 4-5 兔子於實驗過程中的影像截圖



圖 4-6 抗暈眩輔助裝置與 BCV 給予觸覺刺激時機的差異

(a)BCV 反應的時機 (b)抗暈眩輔助裝置反應的時機，四種顏色對應不同的觸發事件，飽和度則對應其震動強度

4.4 流程

為了確保暈動症不會累積到下一種情況，我們在不同的日子裡舉行了三次實驗，每兩個實驗中會分出休息日做間隔。第一次實驗時，受測者填寫了同意書，並由實驗者測量他們的瞳孔間距離(IPD)，以確保他們在虛擬環境中的視力是清晰的。每個受測者先休息 5 - 10 分鐘，如果沒有不適就開始測試。

實驗過程根據任務的情況進行不同的設定。如果是 BCV 的情況，會提供幫助在參與者的耳後佩戴兩個 B71 耳機，並將音量設置到他/她所能忍受的最高音量。對於抗暈眩輔助裝置的條件，由於不同的髮量會影響對振動[37]的感知，首先會確保受試者在 LF、RF、LB、RB 振動器中感受到相同的強度，然後在設置 *mini*和*maxi*時請受試者保持閉著眼睛。在實驗過程中，受試者還會戴著播放白噪音的耳機，以忽略外界的干擾。

每節測試總時長為 5 分鐘。在每分鐘一個循環時，受試者會被迫剎車，並聽到耳機里傳來的聲音，要求他們回答不適評分[17][34]，從 0 到 10，然後受試者通過口頭回答。記錄完分數後，汽車將再次出發。一次測試共收集 6 個不適評分（包括開始出發前）。如果參與者回答了 10，將會立即終止實驗。在每一個測試結束後，受試者將完成一份 SSQ[44]，以及一份李克特 7 分問卷，內容包括真實感、沈浸感、樂趣和注意力。過後會進一步採訪了他們感到最不適的時間，每個偏好得分背後的原因，以及他們在 VR 體驗中的心理模型。在所有 3 個階段之後，他們會陳述這三種情況之間的偏好排名。最後，在實驗結束後，會要求參與者提供更多的評論。

4.5 假設

基於希望減緩暈動症的同時也能提升沉浸感，本實驗的假設主要圍繞暈動症、現實感、沈浸感和趣味性上：

1. 抗暈眩輔助裝置和 BCV 在 SSQ-TS 和 SSQ-N 方面比純視覺做得更好。假設本研究的裝置可以像 BCV 一樣減少暈動症。
2. 在 SSQ-D 方面，抗暈眩輔助裝置比純視覺做得更好。假設與慣性力方向相關的振動可以改善定向力障礙。因為輔助裝置的震動回饋比 BCV 更具方向性，因此假設本系統的在這方面的結果不會比 BCV 差。
3. 抗暈眩輔助裝置在現實感、沈浸性、趣味性和關注度方面比 BCV 做得更

好。假設，本研究的技術可以改善整體 VR 體驗，因為更自然的映射到心理模型。不比較輔助裝置與純視覺之間的原因，是因為我們希望改善 VR 體驗的前提是也能降低暈動症。

4.6 實驗結果

為了驗證上述假設，我們分析了研究中參與者的反應數據。在實驗過程中，我們每 1 分鐘記錄一次不適評分，並在實驗結束後編寫每個參與者的 VR 暈眩指數、現實感、沈浸感、注意力、享受度等數據。在經歷了所有三種情況後，收集每個參與者在每種情況下的偏好排名。對於所有統計數據，本研究使用 IBM SPSS Statistics 進行分析，並在下面分別報告每個方面的發現。

4.6.1 VR 暈動症部分

採用不適評分(DS)和 SSQ 評分兩種測量方法觀察患者的 VR 暈眩程度。圖 4-7 給出了報告的每種情況的平均 DS 隨時間的變化趨勢。由於每個受測者的平均 DS 是用順序量表測量的，所以選擇了無母數檢定(Friedman)，發現刺激條件的影響顯著， $\chi^2 = 7.841$ ， $N = 18$ ， $df = 2$ ， $p = .02$ 。成對比較(Wilcoxon)顯示，與純視覺條件相比，抗暈眩輔助裝置條件下的不舒適度明顯更少， $Z = -2.474$ ， $p = .013$ 。在純視覺條件和 BCV 條件之間沒有觀察到差異， $Z = -1.865$ ， $p = .062$ ，在 BCV 和

抗暈眩輔助裝置條件之間， $Z=-1.396$ ， $p=.163$ 。

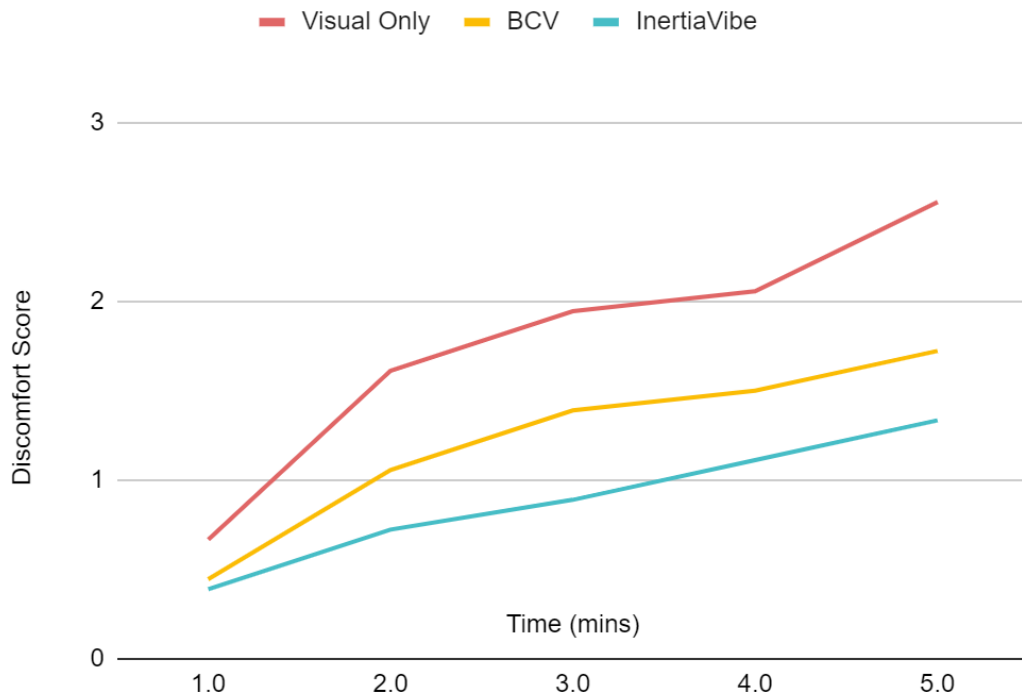


圖 4-7 各種情況中隨時間變化平均 DS 的值

每種情況的平均 SSQ 總分和三個子量表得分(惡心、眼顫、定向障礙)如圖 4-8 所示。我們進行了重複測量變異數分析($\alpha=.05$)，包括 SSQ-TS 的受試者內變量純視覺、BCV 和抗暈眩輔助裝置。刺激條件影響顯著， $F(2,34)=4.23$ ， $p=.023$ ， $\eta^2p=0.199$ 。然後使用帶 Bonferroni 修正的兩兩 t 檢定進行事後檢驗。

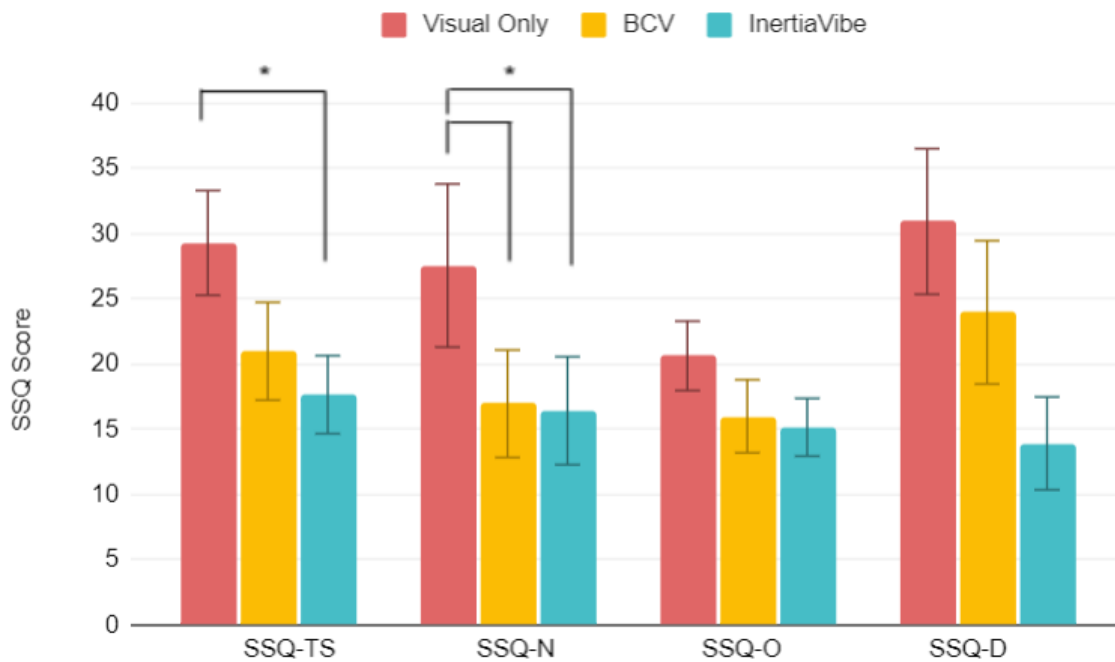


圖 4-8 每個子量表中 SSQ 的平均分數和每個條件的總分，誤差條代表標準誤差

通過簡單的對比比較發現，與純視覺條件相比，抗暈眩輔助裝置條件下的平均 SSQ-TS 評分較低， $p = 0.036$ ，但與 BCV 條件相比，沒有差異， $p = 0.964$ 。由於三個子量表不是常態分布，所以使用無母數檢定(Friedman)用來顯示在 SSQ 子分數惡心下有顯著影響， $\chi^2 = 6.982, N = 18, df = 2, p = .03$ ，眼球運動的， $\chi^2 = 3.93, N = 18, df = 2, p = .14$ ，以及定向障礙， $\chi^2 = 4.508, N = 18, df = 2, p = .105$ 。在三個分量表中，只有惡心表現出顯著影響。成對比較(Wilcoxon)顯示，與純視覺條件相比，抗暈眩輔助裝置條件下的惡心程度顯著降低， $Z = -2.558, p = .011$ ，而與純視覺條件相比，BCV 條件下的惡心程度顯著降低， $Z = -2.288, p = .022$ 。結果表示，當出現頭部振動時，VR 暈動症明顯減輕，尤其是惡心症狀，應證了假設 1。但是假設 2 失敗了，因為即使抗暈眩輔助裝置中 SSQ-D 的平均值最低，SSQ-

D 也不顯著，這可能是因為 SSQ-D 抗暈眩輔助裝置條件中的兩個異常值引起的，由於 SSQ 總分呈常態分佈並且沒有異常值，而 SSQ-D 的資料為非常態分佈，因此不考慮將 SSQ-D 的兩個異常值刪除。

4.6.2 主觀回答部分

在實驗結束後，每個參與者用 7 分的李克特量表(Likert scale)對現實感、沈浸感、享受度和注意力進行評分。結果顯示為一個發散條形圖，如圖 4-9 所示。對所有主觀測量進行了無母數檢定(Friedman)。主觀條件下現實感具有顯著影響， $\chi^2 = 11.179, N = 18, df = 2, p = .04$ ，沈浸感部分， $\chi^2 = 20.211, N = 18, df = 2, p < .001$ ，享受度部分， $\chi^2 = 12.764, N = 18, df = 2, p = .002$ 和注意力部分， $\chi^2 = 11.474, N = 18, df = 2, p = .003$ 。配對比較(Wilcoxon)顯示，與 BCV 條件相比，抗暈眩輔助裝置條件下的現實感一致性顯著更高， $Z = -3.081, p = .002$;與純視覺條件相比，抗暈眩輔助裝置條件下的沈浸感顯著更高， $Z = -2.232, p = .026$, BCV， $Z = -3.314, p = .001$ 。與純視覺條件相比， $Z = -2.417, p = .016$, BCV， $Z = -2.801, p = .005$ ，抗暈眩輔助裝置的享受度顯著更高。與 BCV 相比，抗暈眩輔助裝置的注意力顯著更高， $Z = -3.08, p = .002$ 。基本上，假設 3 是成立的。

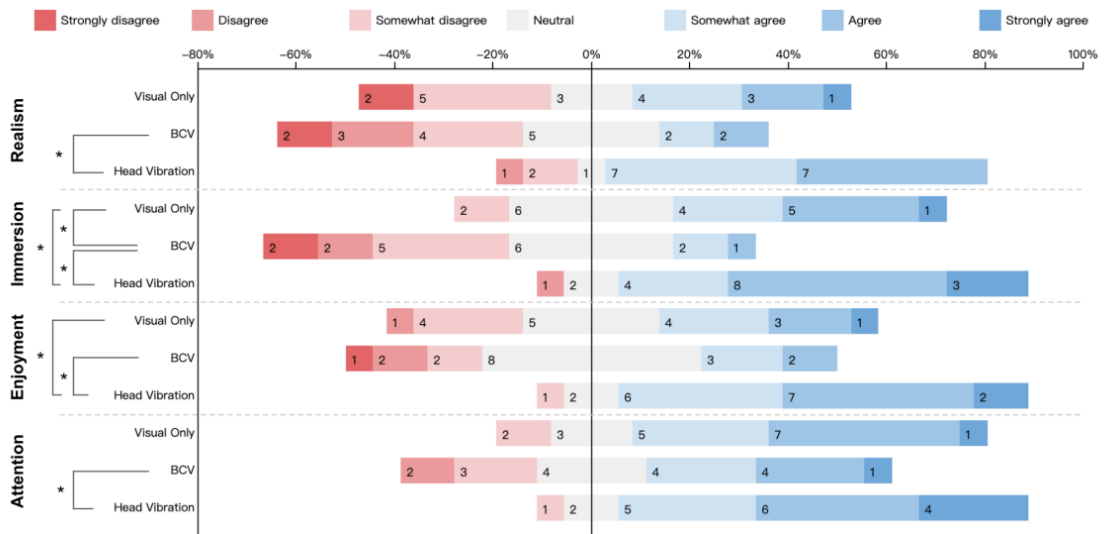


圖 4-9 依據不同條件的問卷調查，將現實感(realism), 沈浸感(immersion), 享受度(enjoyment) 和注意力(attention)的定性結果進行分層條形圖

實驗結束後，受測者被要求對三種條件的偏好進行排序。偏好排序的定性結果如圖 4-10 所示。為分析排序數據，為每個訂單分配權重值。以 n 為基準，第 r 位的權值為 $n-r+1$ ，即第 1 位的權值為 3，第 2 位的權值為 2，第 3 位的權值為 1。由於排序權重採用順序量表測量，因此採用無母數檢定(Friedman)，顯示條件中有顯著的差異， $\chi^2 = 24.111$ ， $N = 18$ ， $df = 2$ ， $p < .001$ 。成對比較(Wilcoxon)顯示，與純視覺條件相比，抗暈眩輔助裝置條件的偏好顯著更高， $Z = -3.61$ ， $p < .001$ ，也比 BCV 條件顯著更高， $Z = -3.839$ ， $p < .001$ 。

Ranking for Preference

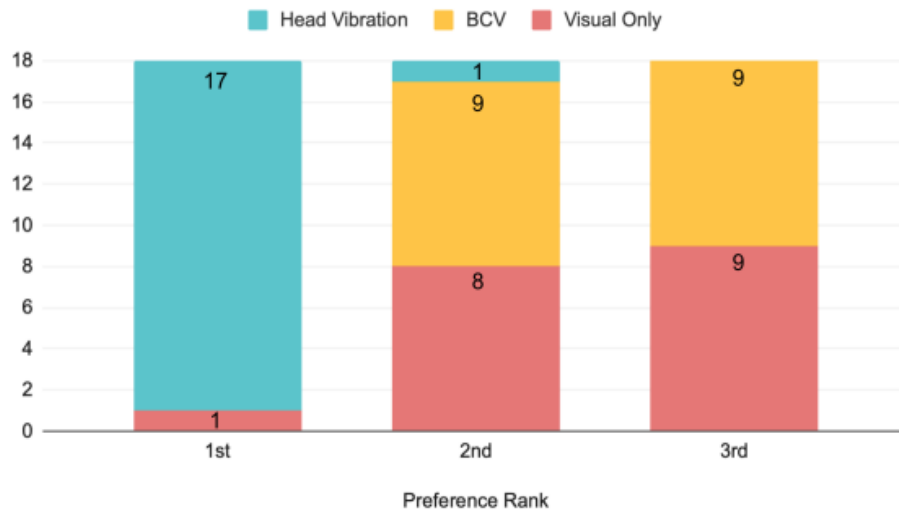


圖 4-10 以堆疊條形圖來呈現排名偏好的定性結果

正如預期的那樣，BCV 和抗暈眩輔助裝置都可以減少暈動病，而抗暈眩輔助裝置的減少量比 BCV 多 30%，其背後的機制可能有所不同。從注意力得分來看，超過 25% 的參與者在 BCV 條件評判中感到分心。

另外，在採訪中，18 人中有 7 人將 BCV 列為外部幹擾。引用自 P5 和 P8：“BCV 的音頻是獨特的，就像來自外部(虛擬世界)的聲音。這與駕駛體驗不同”。抗暈眩輔助裝置組的注意力和沈浸感得分顯著高於 BCV 組。

抗暈眩輔助裝置的受測者報告說，他們的分心程度較低，在現實感和沈浸感方面得分較高。大多數使用者(10 / 18)同意加速度、減速和轉彎的振動反饋是可區分的。引用 P1、P4 和 P10 的話：“因為抗暈眩輔助裝置的聲音聽起來像汽車引擎，所以沈浸感得到了增強。”引用自 P5, P10, P11, P16 和 P17：“抗暈眩輔助裝置與現實世界的體驗非常相似，因此具有很高的真實感。”有趣的是，一名參與者(P11)報告說，她可以將 BCV 聲音與轉彎聯繫起來，但她不相信抗暈眩輔助裝置

代表慣力，因為慣力應該作用於整個身體，而不是頭部。因此，她的 SSQ 評分 BCV(11.22)低於抗暈眩輔助裝置(18.70)。P2 提到：“振動時，我的頭會向同一個方向傾斜。”在對錄影記錄的分析中，我們發現 18 個使用者中有 7 個在轉身時也會傾斜他們的頭，顯示出強烈的傾向。

儘管 Fabien[13]認為每個人對觸覺線索有不同的認知，但沒有人報告說他們對振動模式有不同意見。從主觀測量結果和受測者的反饋來看，抗暈眩輔助裝置在現實性、沈浸性和注意力方面的一致性較高。這意味著慣性思維很容易與現實生活中的體驗相聯系，並且通過匹配的思維模式很有可能減少暈動症。

基於 Benson[1]提出的模型，結合我們的實驗結果，本研究提出了一個修正的暈動症模型，如圖 4-11 所示。來自虛擬現實世界的外部觸覺信號和普通傳感器信號都會進入大腦，因為觸覺提示類似於心理模型，或者更容易與過去的經驗聯系，它增加了視覺和觸覺信號對大腦的權重，從而增強了權重，進一步減少了 VIMS。在偏好排名中，18 名參與者中有 7 人將抗暈眩輔助裝置排名為第 1，主要原因是抗暈眩輔助裝置更舒適，擁有更好的 VR 體驗。有趣的是，有 4 名參與者在抗暈眩輔助裝置上的 SSQ 分數高於純視覺，但仍然給予抗暈眩輔助裝置排名 1，這可能是因為沈浸感的好處勝過了不舒適本身。一名參與者將抗暈眩輔助裝置排名第 2，將純視覺排名第 1。雖然即使在純視覺的情況下，他也對暈動症免疫，但他認為抗暈眩輔助裝置和 BCV 都是幹擾，並回報說振動過於強烈。因此應該記住，需要用不同的個體正確地初始化，確保它不會讓使用者感到不適，從而不會引起相反的效果。

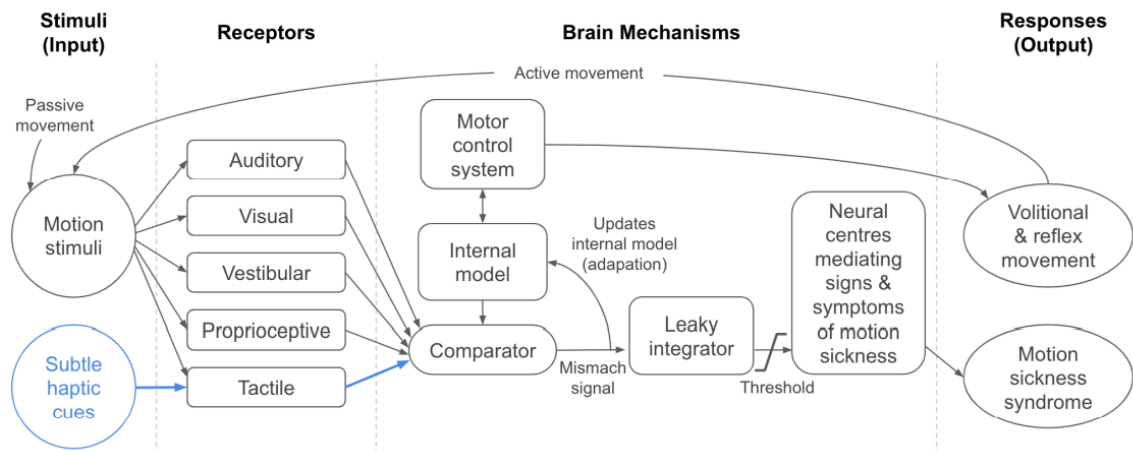


圖 4-11 改編自 Benson(1988)的暈動症模型



第五章、 結論與建議

本研究提出了一種基於觸覺反饋設計的 VR 運動暈動病緩解方法，該方法根據虛擬實境環境中的慣性力事件給出頭部振動回饋。本研究進行了一個實驗來檢驗有效性，並與 BCV 和純視覺條件進行比較。結果發現振動觸覺反饋設計確實減緩暈動症，同時也增強了 VR 乘車體驗的沈浸感和趣味性。本研究進一步介紹了針對暈動症的修正模型，並闡述了設計背後的機制。雖然本研究只含括特定的運動，相信它仍然適用於大多數場景。未來的研究方向可以朝自旋轉和三維運動的反饋設計發展。

由於休息框架的適用性比較有限，本研究沒有將其納入，因此慣性系和靜止系在減少疾病方面的差異尚不清楚。它們目的都在提供更好的心智模型，如果能把慣性系統和休息架結合起來，相信會看到更好的效果。

基於研究結果，個人對未來研究的建議有以下幾點：

- 本研究目前只考慮慣性力的四個方向，僅適用於 2D 運動。可以考慮使用 Oliver[3]的方法來實現三維力的映射，甚至實現力的傳遞過程。
- 基於前一點，同時要考慮在增加更多震動裝置的情況下，是否反而會讓使用者覺得是種干擾，這也是需要考量的。
- 目前，只測試了被動場景。主動模式下的有效性有待進一步的試驗。
- 視角的旋轉可以分為移動旋轉和自旋轉（位置固定，視角主動旋轉）。本研究

只包括前者，因為它在 2D 運動中最常見。後者在相機運動中較為常見，但如何設計相應的觸覺線索仍有待進一步研究。



參考文獻

- [1] Benson AJ. 1988. Motion sickness. In *Aviation medicine*, 2nd edn, King P Ernsting J (Ed.). Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford.
- [2] Baris Aykent, Frederic Merienne, Christophe Guillet, Damien Paillot, and Andras Kemeny. 2014. Motion sickness evaluation and comparison for a static driving simulator and a dynamic driving simulator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 228, 7 (jun 2014), 818–829.
<https://doi.org/10.1177/0954407013516101>
- [3] Oliver Beren Kaul, Michael Rohs, Benjamin Simon, Kerem Can Demir, and Kamillo Ferry. 2020. Vibrotactile Funneling Illusion and Localization Performance on the Head. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, New York, NY, USA. <http://dx.doi.org/10.1145/3313831.3376335>
- [4] Jelte E. Bos. 2015. Less sickness with more motion and/or mental distraction. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation* 25, 1 (jan 2015), 23–33.
<https://doi.org/10.3233/VES-150541>
- [5] Jelte E. Bos, Willem Bles, and Eric L. Groen. 2008. A theory on visually induced motion sickness. *Displays* 29, 2 (mar 2008), 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.002>
- [7] Evren Bozgeyikli, Andrew Raij, Srinivas Katkoori, and Rajiv 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*. Association for Computing Machinery, Inc, New York, NY, USA, 205–216.
<https://doi.org/10.1145/2967934.2968105>

- [8] Helmut Buhler, Sebastian Misztal, and Jonas Schild. 2018. Reducing VR Sickness Through Peripheral Visual Effects. In 25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 517–519. <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446346>
- [9] Zekun Cao. 2017. The effect of rest frames on simulator sickness reduction. (2017). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14954.98240>
- [10] Michael J. Cevette, Jan Stepanek, Daniela Cocco, Anna M. Galea, Gaurav N. Pradhan, Linsey S. Wagner, Sarah R. Oakley, Benn E. Smith, David A. Zapala, and Kenneth H. Brookler. 2012. Oculo-Vestibular Recoupling Using Galvanic Vestibular Stimulation to Mitigate Simulator Sickness. *Aviation Space and Environmental Medicine* 83, 6 (2012), 549–555. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3239.2012>
- [11] B. Cheung. 2004. Nonvisual spatial orientation mechanisms. In *Spatial Disorientation in Aviation. Progress in Astronautics and Aeronautics*, W.R. Ercoline F.H. Previc (Ed.), Vol. 203. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, Virginia, 37–94.
- [12] Sarah D’Amour, Jelte E. Bos, and Behrang Keshavarz. 2017. The efficacy of airflow and seat vibration on reducing visually induced motion sickness. *Experimental Brain Research* 235, 9 (sep 2017), 2811–2820. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5009-1>
- [13] Fabien Danieau, Julien Fleureau, Philippe Guillotel, Nicolas Mollet, Anatole Lécuyer, and Marc Christie. 2012. HapSeat: Producing Motion Sensation with Multiple Force-Feedback Devices Embedded in a Seat. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST ’12)*. Association for

Computing Machinery, New York, NY, USA, 69–76.

<https://doi.org/10.1145/2407336.2407350>

[14] Victor Adriel De Jesus Oliveira, Luca Brayda, Luciana Nedel, and Anderson Maciel. 2017. Designing a Vibrotactile Head-Mounted Display for Spatial Awareness in 3D Spaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23, 4 (apr 2017), 1340–1348. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2657238>

[15] Victor Adriel De Jesus Oliveira, Luciana Nedel, Anderson Maciel, and Luca Brayda. 2016. Localized magnification in vibrotactile HMDs for accurate spatial awareness. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 9775. Springer Verlag, 55–64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42324-1_6

[16] Victor Adriel De Jesus Oliveira, Luciana Nedel, Anderson Maciel, and Luca Brayda. 2016. Spatial discrimination of vibrotactile stimuli around the head. In *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, Vol. 2016-April. IEEE Computer Society, 1–6. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2016.7463147>

[17] Ajoy S. Fernandes and Steven K. Feiner. 2016. Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI 2016 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 201–210. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460053>

[18] Germán Gálvez-García, Marion Hay, and Catherine Gabaude. 2015. Alleviating simulator sickness with galvanic cutaneous stimulation. *Human Factors* 57, 4 (jun 2015), 649–657. <https://doi.org/10.1177/0018720814554948>

[19] Kirby Gilliland and Robert E. Schlegel. 1994. Tactile Stimulation of the Human Head for Information Display. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and*

Ergonomics Society 36, 4 (dec 1994), 700–717.

<https://doi.org/10.1177/001872089403600410>

[20] J. M. Goldberg and C. Fernandez. 1975. Responses Of Peripheral Vestibular Neurons To Angular And Linear Accelerations In The Squirrel Monkey. *Acta Oto-Laryngologica* 80, 1-6 (1975), 101–110. <https://doi.org/10.3109/00016487509121307>
arXiv:<https://doi.org/10.3109/00016487509121307>

[21] John F Golding. 1998. Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. *Brain Research Bulletin* 47, 5 (1998), 507 – 516.
[https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00091-4)

[22] J. F. Golding, W. Bles, J. E. Bos, T. Haynes, and M. A. Gresty. 2003. Motion Sickness and Tilts of the Inertial Force Environment: Active Suspension Systems vs. Active Passengers. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 74, 3 (2003), 220–227. <https://www.ingentaconnect.com/content/asma/asem/2003/00000074/00000003/art00004>

[23] M Hirose, D Schmalstieg, C A Wingrave, K Nishimura, Daniel Cliburn, Stacy Rilea, David Parsons, Prakash Surya, and Jessica Semler. 2009. EUROGRAPHICS EUROGRAPHICS DIGITAL LIBRARY Short Paper: The Effects of Teleportation on Recollection of the Structure of a Virtual World. *Joint Virtual Reality Conference of EGVE-ICAT* (2009). <https://doi.org/10.2312/EGVE/JVRC09/117-120>

[24] H I Honolulu and Usa Chi. [n.d.]. WalkingVibe: Reducing Virtual Reality Sickness and Improving Realism while Walking in VR using Unobtrusive Head-mounted Vibrotactile Feedback. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vol. 20. ACM, New York, NY, USA.

<http://dx.doi.org/10.1145/3313831.3376847>

- [25] H. Iwata. 1999. The Torus Treadmill: realizing locomotion in VEs. *IEEE Computer Graphics and Applications* 19, 6 (1999), 30–35.
- [26] M. P. Jacob Habgood, David Moore, David Wilson, and Sergio Alapont. 2018. Rapid, Continuous Movement between Nodes as an Accessible Virtual Reality Locomotion Technique. In *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 371–378. <https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446130>
- [27] Oliver Beren Kaul and Michael Rohs. 2016. HapticHead: 3D Guidance and Target Acquisition through a Vibrotactile Grid. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2533–2539. <https://doi.org/10.1145/2851581.2892355>
- [28] Oliver Beren Kaul and Michael Rohs. 2017. HapticHead: A spherical vibrotactile grid around the head for 3D guidance in virtual and augmented reality. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, Vol. 2017-January*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3729–3740. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025684>
- [29] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology* 3, 3 (1993), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- [30] Behrang Keshavarz, Bernhard E. Riecke, Lawrence J. Hettinger, and Jennifer L. Campos. 2015. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Frontiers in Psychology* 6 (2015), 472. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00472>

- [31] H. Keshavarz, B. Hecht and B. D. Lawson. 2014a. Visually induced motion sickness: characteristics, causes, and countermeasures,. In Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications, K. S. Hale and K. M. Stanney (Eds.). CRC Press, Boca Raton, FL, 648–697.
- [32] Joseph J. LaViola. 2000. A discussion of cybersickness in virtual environments. ACM SIGCHI Bulletin 32, 1 (jan 2000), 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- [33] Shi-Hong Liu, Pai-Chien Yen, Yi-Hsuan Mao, Yu-Hsin Lin, Erick Chandra, and Mike Y. Chen. 2020. HeadBlaster : a wearable approach to simulating motion perception using head-mounted air propulsion jets. ACM Transactions on Graphics 39, 4 (aug 2020), 12. <https://doi.org/10.1145/3386569.3392482>
- [34] Shi Hong Liu, Neng Hao Yu, Liwei Chan, Yi Hao Peng, Wei Zen Sun, and Mike Y. Chen. 2019. PhantomLegs: Reducing virtual reality sickness using head-worn haptic devices. In 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2019 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 817–826. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8798158>
- [35] Guillaume Lucas, Andras Kemeny, Damien Paillot, and Florent Colombet. 2020. A simulation sickness study on a driving simulator equipped with a vibration platform. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 68 (jan 2020), 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.11.011>
- [36] T. Maeda, H. Ando, and M. Sugimoto. [n.d.]. Virtual acceleration with galvanic vestibular stimulation in a virtual reality environment. In IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005. IEEE, 289–290. <https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492799>

- [37] Kimberly Myles, Joel T. Kalb, Janea Lowery, and Bheem P. Kattel. 2015. The effect of hair density on the coupling between the tactor and the skin of the human head. *Applied Ergonomics* 48 (2015), 177 – 185. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.11.007>
- [38] Eugene Nalivaiko, John A Rudd, and Richard HY So. 2014. Motion sickness, nausea and thermoregulation: The “toxic” hypothesis. *Temperature* 1, 3 (2014), 164–171. <https://doi.org/10.4161/23328940.2014.982047>
- [39] Charles M. Oman. 1990. Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 68, 2 (feb 1990), 294–303. <https://doi.org/10.1139/y90-044>
- [40] Yun Suen Pai and Kai Kunze. 2017. Armswing: Using Arm Swings for Accessible and Immersive Navigation in AR/VR Spaces. In 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. Association for Computing Machinery, Inc, New York, NY, USA, 189–198.
- [41] Jerrold D. Prothero. 1998. The Role of Rest Frames in Vection, Presence and Motion Sickness (Doctoral Thesis). Technical Report. University of Washington, HIT-Lab. 1–169 pages.
- [42] CE Rash, MB Russo, TR Letowski, and ET Schmeisser. 2009. Helmet-mounted displays: Sensation, perception and cognition issues. Technical Report. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord{\&}metadataPrefix=html{\&}identifier=ADA522022>
- [43] Michael Rietzler, Katrin Plaumann, Taras Kr "aenzle, Marcel Erath, Alexander Stahl, and Enrico Rukzio. [n.d.]. VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, New York, NY, USA. <http://dx.doi.org/10.1145/3025453.3026009>

- [44] Kevin S. Berbaum & Michael G. Lilienthal Robert S. Kennedy, Norman E. Lane. 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology* 3:3 (1993), 203–220.
- [45] Katja Rogers, Maria Aufheimer, Michael Weber, and Lennart E. Nacke. 2018. Towards the Visual Design of Non-Player Characters for Narrative Roles. In *Proceedings of Graphics Interface 2018 (GI 2018)*. Canadian Human-Computer Communications Society / Société canadienne du dialogue humain-machine, 154 – 161. <https://doi.org/10.20380/GI2018.21>
- [46] ARNON ROLNICK and R. E. LUBOW. 1991. Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness. *Ergonomics* 34, 7 (1991), 867–879. <https://doi.org/10.1080/00140139108964831>
arXiv:<https://doi.org/10.1080/00140139108964831> PMID: 1915252.
- [47] J. L. Souman, P. Robuffo Giordano, M. Schwaiger, I. Frissen, T. Thümmel, H. Ulbrich, A. De Luca, H. H. Bühlhoff, and M. O. Ernst. 2008. CyberWalk: Enabling Unconstrained Omnidirectional Walking through Virtual Environments. *ACM Trans. Appl. Percept.* 8, 4, Article 25 (Dec. 2008), 22 pages. <https://doi.org/10.1145/2043603.2043607>
- [48] D. Swapp, J. Williams, and A. Steed. 2010. The implementation of a novel walking interface within an immersive display. In *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. 71–74.
- [49] Chi Wang, Da Yuan Huang, Shuo Wen Hsu, Chu En Hou, Yeu Luen Chiu, Ruei Che Chang, Jo Yu Lo, and Bing Yu Chen. 2019. Masque: Exploring lateral skin stretch feedback on the face with head-mounted displays. In *UIST 2019 - Proceedings of the*

32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology.

Association for Computing Machinery, Inc, New York, NY, USA, 439–451.

<https://doi.org/10.1145/3332165.3347898>

[50] Séamas Weech, Jae Moon, and Nikolaus F. Troje. 2018. Influence of bone-conducted vibration on simulator sickness in virtual reality. *PLOS ONE* 13, 3 (mar 2018), e0194137. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194137>

[51] Séamas Weech and Nikolaus F. Troje. 2017. Vection Latency Is Reduced by Bone-Conducted Vibration and Noisy Galvanic Vestibular Stimulation. *Multisensory Research* 30, 1 (jan 2017), 65–90. <https://doi.org/10.1163/22134808-00002545>

[52] Alexander Wilberz, Dominik Leschtschow, Christina Trepkowski, Jens Maiero, Ernst Kruijff, and Bernhard Riecke. 2020. FaceHaptics: Robot Arm based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments, Vol. 20. Association for Computing Machinery (ACM), 1–14. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376481>

[53] B.J Yates, A.D Miller, and J.B Lucot. 1998. Physiological basis and pharmacology of motion sickness: an update. *Brain Research Bulletin* 47, 5 (1998), 395 – 406. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00092-6)

[54] Mods for Assetto Corsa <https://assettocorsa.club/mods>

[55] Dr. David Whittinghill, Technical Artist Bootcamp: Nasum Virtualis: A Simple Technique for Reducing Simulator Sickness in Head Mounted VR, GDC' 15, <https://www.gdcvault.com/play/1022287/Technical-Artist-Bootcamp-Nasum-Virtualis>

[56] Shi-Hong Liu, Pai-Chien Yen, Yi-Hsuan Mao, Yu-Hsin Lin, Erick Chandra, Mike Y. Chen. 2021. MotionRing: Creating Illusory Tactile Motion around the Head using 360° Vibrotactile Headbands. In *UIST 2021 - The 34th Annual ACM Symposium on*

User Interface Software and Technology. Association for Computing Machinery, Inc,
New York, NY, USA, 724-731. <https://doi.org/10.1145/3472749.3474781>



附錄一 SSQ 問卷

SSQ 量表

評分方式：0-3 (0 完全沒有，1 輕微，2 中等，3 嚴重)

1. 一般不適	16. 眼花 (睜開眼)
2. 疲倦	17. 眼花 (閉上眼)
3. 沉悶	18. 眩暈
4. 想睡	19. 幻覺
5. 頭痛	20. 昏厥
6. 眼痛	21. 呼吸異樣
7. 很難集中視力	22. 胃感覺異樣
8. 口水分泌增加	23. 沒有胃口
9. 口水分泌減少	24. 胃口增加
10. 出汗	25. 想去洗手間
11. 作嘔	26. 迷惘
12. 很難集中精神	27. 打嗝
13. 精神壓抑	28. 嘔吐
14. 頭脹	29. 其他
15. 視野模糊	

附錄二 沉浸感問卷

Presence 量表

1. 我在 VR 世界中乘車跟真實世界中乘車的經驗有多相似 (7-Point)
2. 我覺得我沉浸在 VR 體驗的程度有多高 (7-Point)
3. 我覺得整個體驗的趣味程度有多高 (7-Point)
4. 我覺得我專注在 VR 體驗的程度有多高 (7-Point)

