

濃霧中前車緊急煞車時道路駕駛人對 前車相對速度感知與反應時間不確性 之關聯—以海森堡不確定性原理觀點

UNCERTAINTIES OF PERCEIVED RELATIVE SPEED AND REACTION TIME UNDER FOGGY AND EMERGENCY BRAKING CONDITIONS—IN A PERSPECTIVE IMITATING HEISENBERG UNCERTAINTY PRINCIPLE

陳穆臻 Mu-Chen Chen¹

吳熙仁 Hsi-Jen Wu²

(105年8月10日收稿，105年11月22日第1次修改，
105年12月27日第2次修改，106年5月26日定稿)

摘 要

濃霧影響道路駕駛人對速度和距離感知的判斷；然而，在濃霧中前車緊急煞車時，駕駛人對前車相對速度感知與反應時間不確性是複雜的，需要進一步探討。本研究嘗試以海森堡不確定性原理觀點出發，除探討前述特殊環境與路況下，兩者不確性之權衡關聯性外，亦設計1個二階段實驗，依序驗證兩項假說：(1) 假設濃霧中，本車駕駛人對前車相對速度感知所產生之心理物能動能的不確定性，與其反應時間不確定性之間，存在權衡關聯性；(2) 假設濃霧中，在駕駛心理負荷和相對速度感知平均值條件下，相對速度感知與反應時間不確性存在權衡關聯性。實驗結果顯示兩項權衡關

-
1. 國立交通大學運輸與物流管理學系教授。
 2. 交通部運輸研究所研究員 (聯絡地址：10548 臺北市松山區敦化北路 240 號 7F 交通部運輸研究所運輸安全組；電話：02-23496857；E-mail：henrywu@iot.gov.tw)。

聯性均存在。另外，比較其結果與附加晴朗天候條件之實驗結果，發現濃霧和晴朗天候之 2 個動作常數無明顯差異。本研究結果有助於解釋濃霧中跟車現象，激發新的駕駛人感知車流理論之發展。

關鍵詞：濃霧；前車相對速度感知；量子光流；反應時間；不確定性

ABSTRACT

Foggy weather conditions affect uncertainties of driver perceptual judgments of speed and distance. However, in a heavy foggy condition and a leading vehicle braking condition uncertainties of perceived relative speed and reaction time are complicated and need to be identified. If those uncertainties in a foggy weather condition exist in a perspective imitating Heisenberg Uncertainty Principle, then some phenomena for the following driver behaviors can be explained. The purpose of the research aimed to test the first hypothesis that explained a trade-off relationship between uncertainties of perceived psychological energy and uncertainties of reaction time of following vehicle drivers, and the second hypothesis that stated a trade-off relation between uncertainties of reaction time and uncertainties of perceived relative speed in regard to averages of perceived relative speed and mental workload. One additional experiment have conducted, giving comparisons with those uncertainties exist in a clear weather condition having been tested in Sheu's two-stage experiment based on a quantum optical flow-based model. The findings of this study not only show that those uncertainties also exist in foggy and braking conditions but also indicate the statistical significant no-difference between the two action constants in foggy and clear weather conditions. The results may help to characterize car following phenomena in foggy conditions under driver perception uncertainties and to stimulate new ideas for the development of dynamic, stochastic and time-varying driver perception model and theories.

Key Words: *Foggy condition; Perceived relative speed; Quantum optical flow; Reaction time; uncertainty*

一、前言

濃霧天候條件影響道路駕駛人對速度和距離感知的判斷^[1-8]，部分學者^[1,5,6]發現在濃霧中駕駛人趨向降低車速，以減少其駕駛風險。甚至考量安全，駕駛人除降低車速外^[2]，亦加大與前車之間距 (spacing)^[7]。然而，在濃霧中前車緊急煞車時，本車 (或目標車) 駕駛人對前車相對速度感知不確性與反應時間不確性 (以下簡稱兩者不確定性) 是複雜的^[9]，而且兩者不確定性亦需要進一步探討。

再者，道路駕駛人經由眼睛接受外在環境光線刺激，作為同車道內判斷跟車距離的重要參考依據。但目前跟車理論多以前車與本車之物理距離量作為重要依據，鮮少將視覺的感知納入跟車理論中，更遑論於車流理論中探討濃霧中前車緊急煞車時兩者不確性。由於真實的跟車現象較為複雜，已有先驅研究者^[10-13]運用量子光流理論 (quantum optical flow theory)^[11-13]，以及模擬道路駕駛視覺環境的駕駛模擬器，分析並驗證晴朗天候中前車緊急煞車時，道路駕駛人對前車相對速度感知標準差與反應時間標準差之權衡 (trade off) 關聯性^[11,13]。

本研究嘗試以海森堡不確性原理觀點，除探討特殊環境 (如濃霧) 與路況 (如前車緊急煞車) 下，前述兩者不確性之權衡關聯性外，亦參考先驅研究者之實驗^[13]，設計 1 個適用於濃霧中前車緊急煞車之二階段實驗，依序驗證兩項假說。第 1 項假說：假設濃霧中，本車駕駛人對前車相對速度感知所產生之心理物能動能的不確性與其反應時間不確性之間，存在權衡關聯性；第 2 項假說：假設在濃霧中，兩者不確性在本車駕駛人心理負荷和前車相對速度感知平均值條件下，存在權衡關聯性。另外，比較濃霧與附加晴朗天候條件之實驗結果，檢測濃霧中模仿海森堡不確性原理之動作常數 (h_f)，和晴朗天候之動作常數 (h_c) 有無明顯差異。

本研究成果可作為分析當前道路安全中有關特殊環境 (如濃霧) 與路況 (如前車緊急煞車) 下，駕駛之人因工程與行為之基礎，以及車流模擬中參數之應用。未來可進一步提供駕駛人管理其駕駛行為，增加濃霧中行車安全之參考，並作為未來納入視覺感知跟車理論之基礎研究。

本研究其餘部分安排如下：第二節說明相關文獻回顧；第三節闡述濃霧中量子光流跟車模型；第四節說明二階段實驗的流程與實驗結果；最後則為結論與建議。

二、文獻回顧

為凸顯本研究之構想係受到國內學者與研究單位開創性之啟發，先回顧國內相關文獻，再以國外相關文獻輔助支持本研究之方法與實驗架構。

2.1 國內相關文獻

國內有關前車緊急煞車時，道路駕駛人對前車相對速度感知與反應時間不確性之關聯研究，首見於交通部運輸研究所「應用駕駛模擬器與光流理論於道路駕駛者對前車相對速度感知之標準差與反應時間標準差關聯性之初探」^[14]。該研究以刺激－反應 (stimuli-response) 理論出發，除結合光流理論 (optical flow theory) 外，亦應用運輸研究所模擬道路駕駛視覺環境的駕駛模擬器，分析晴朗天候下，道路駕駛人對前車相對速度感知 (perceived relative speed) 標準差與反應時間 (reaction time) 標準差之關聯性。該結果呈現

跟車行為中於駕駛人感知的不確定下，可能存在反應時間的標準差與知覺相對速度標準差之間的權衡 (trade-off) 關係，即當相對速度感知的標準差增加時，伴隨著其反應時間的標準差減小；反之亦然。

國內應用駕駛模擬器模擬，研究有霧天候下駕駛行為之相關文獻亦具有參考價值。例如陳彥承^[15]利用駕駛模擬器，分析道路環境(晴天、霧天等)、分心任務、事件型態等數種因子，發現霧天所導致的視線不良，駕駛人會加大與前車的安全距離；石裕川^[16]則模擬不同天候下(例如雨、晴、霧)道路施工時駕駛的腦波(β 波)及心率變異量(heart rate variability, HRV)的變化，發現天候對腦波及心率變異量無顯著影響。

為擴充國內研究之適用層面，實有必要考慮濃霧中前車緊急煞車時，本車駕駛人對前車相對速度感知與反應時間兩者不確性之關聯性。

2.2 國外相關文獻

國外直接探討有關前車緊急煞車時，道路駕駛人對前車相對速度感知與反應時間不確性之研究，首推學者 Sheu 與 Wu^[11,13]，其基於量子力學 (quantum mechanics) 觀點的心理物理動量 (psychological momentum) 與心理物理動能 (psychological energy)，描述駕駛人視野之外界刺激(如晴朗天候之光流、前車與本車之相對速度)，並說明駕駛人遇到刺激時直覺地調整車速之駕駛反應(如反應時間)。另模仿海森堡不確定性原理，設計 1 個二階段實驗，驗證在晴朗天候下，本車駕駛人對前車相對速度感知之心理動能與其反應時間之不確定性，存在權衡關聯性，並闡明其反應時間與相對速度感知兩者不確定性，亦具有權衡的關係^[13]。

應用駕駛模擬器模擬霧天駕駛行為文獻眾多^[1-8]，例如 Hoogendoorn 等學者^[5,7]指出霧天前本車時間間距增加，又如 Mueller 等學者^[6]說明霧天新手駕駛人反應時間有較高的危害，控制車速變化較大，較易發生碰撞。再者，Hoogendoorn 等學者^[5,7]以相對速度 (relative speed) 和前車與本車間之間隔 (space)，分析有霧天候下的行動點 (action point) 特性，發現明確感知閾值的假設是不現實的，具有隨機性；王嘉宇等學者^[8]指出霧天之安全距離、安全車頭時距、期望速度等，均比晴天情況顯著減小，霧天交通衝突風險顯著增大；涂輝招^[17]說明駕駛人在濃霧中減速行為顯著。

其他間接相關文獻部分，Robinson 等學者^[18]指出駕駛是 1 個視覺化且複雜的任務，在駕駛當中，約有 90% 駕駛訊息是透過眼睛來傳遞。Dewar^[19]也指出在駕駛中有幾個重要的視覺因素，如動態視力 (dynamic visual acuity)、周邊視野 (peripheral vision)、顏色、適應性 (adaptation) 以及深層動作 (movement in depth) 等，這些視覺因素會影響駕駛行為，特別是駕駛人在反應刺激的駕駛過程中。其次，有許多關於量子光流理論研究之文獻^[20-22]，這些研究主要處理與駕駛人運動感知有關現象的傳遞，以及透過計算判斷理論 (computational judgment theories) 或生態視覺理論 (ecological optic theories) 所引起的駕駛反應。另外，Sheu^[10]建議的刺激反應駕駛人行為模式 (stimulus-response driver behavior

model)，包括兩時間順序階段：(1) 視覺刺激 (visual stimulus) 與 (2) 概似速度調整，以重現當感知到外在交通環境狀況改變時，內車道 (intra-lane) 駕駛人的決策過程。

有關前車相對速度感知部分，首先在感知的心理物理 (psychophysics) 刺激方面，Baker^[20] 討論量子光流與在不確定環境下駕駛的應用。當視覺焦點 (focal point) 與心理物理動量 (psychological momentum) 的不確定性，相當等於一個基於時間基礎的動作常數 h 時，會考慮類似海森堡不確定性原理 (Heisenberg uncertainty principle) 的權衡形式。再者，為考量心理物理學中的心理價值，Sheu^[10] 深入了解當面對不尋常的交通狀況時心理因素的差異，例如車道阻塞時可能對駕駛行為的影響，會導致現有跟車模型在解釋車道交通現象時立場比較薄弱。Sheu^[10,13] 也延伸研究有關量子光流為基礎的駕駛刺激反應模型來描述跟車模型。

有關反應時間部分，反應時間不僅是感知的心理物理刺激因素之一，亦是感官接受刺激到能產生行為反應的一段時間。Mehmood 與 Easa^[23] 提到，煞車反應時間是指當前車煞車時煞車燈亮，實驗車輛的駕駛 (target driver) 看到前車煞車燈亮後踩腳踏板經過的時間。他們也提出不管是在正常或突發的情境下，其煞車反應時間均有顯著差異，亦即在緊急、預期的狀況下，都對煞車反應時間有顯著的影響。其次，有研究^[24] 指出大多數車尾碰撞的兩個主要因素，為駕駛人無法感知或反應前車的發生狀況，以及跟車時太靠近前車。最後，每當不確定因素增加時，反應時間也會增加^[25]。

2.3 小結

綜合以上所述，在濃霧和晴朗天候條件下的交通現象是複雜的，而且取決於許多車輛的相互作用和駕駛人的個別反應。但透過量子力學性質，或許能對本研究嘗試了解濃霧中前車相對速度感知 (perceived relative speed, PRS) 的不確定性與反應時間 (reaction time) 的不確定性，可以釐清駕駛感知與行為之間不確定性的關係，進而理解跟車時的動態駕駛行為。另外，檢測濃霧中之動作常數 (模仿海森堡不確定性原理之 h_f) 和晴朗天候之動作常數 (h_c) 部分，則未見國外相關文獻有所著墨。因此，本研究嘗試模擬海森堡不確定性原理 (Heisenberg uncertainty principle, HUP)，針對濃霧中駕駛感知的不確定，探討其知覺相對速度與反應時間兩者不確定性的權衡關係。

三、研究方法

在方法論中，先說明刺激 (stimuli)、駕駛人感知和反應 (response) 模式架構，再將已驗證可應用於晴朗天候之量子視覺流駕駛行為模式^[10-13] 予以擴充，並應用於濃霧天候下駕駛感知與反應的不確定性。最後，利用量子力學之不確定性特性，推導出濃霧天候下的 2 項假設。

3.1 刺激、駕駛人感知和反應

根據刺激反應 (stimuli-response) 之人類行為模型^[26,27]，刺激、駕駛人感知和反應，是在濃霧和晴朗天候條件下影響駕駛人駕駛行為的 3 個關鍵要素。其中刺激可再細分為外界 (external) 和內部 (internal) 刺激，外界刺激包括視覺刺激 (例如，前車後煞車燈亮光) 和駕駛環境條件 (例如，道路有霧或晴朗的天候條件下)；內部刺激為視覺流刺激影響大腦的感知 (perception) 與處理 (process)。

3.2 在濃霧天候感知不確定下之量子視覺流駕駛行為

依據 Sheu^[11,12] 所提出之量子視覺刺激轉換 (quantum transformation of visual stimuli) 理論，擴充建構在濃霧天候下駕駛視覺刺激模型 (即駕駛人感知到的濃霧交通流狀況)，將外部物理之視覺流 (或光流) 刺激轉換為內部心理刺激 (即心理物理動量 (psychophysical momentum))。首先，在外部物理之視覺流刺激方面，針對本車 (或實驗車輛) i 於時間 t 在給定車道 j 上移動部分，根據量子視覺流理論^[20,28,29]，本研究定義一個實驗車輛 (本車) 駕駛人的量子視覺流域 (quantum optical field) $Q[\Delta x(t), \Delta y(t)]$ ，據以描述駕駛人整個縱向 (X) 與橫向 (Y) 注意力的相關機率分配範圍 (即 $\Delta x(t)$ 和 $\Delta y(t)$)。 $\Delta x(t)$ 與 $\Delta y(t)$ 為本車駕駛人的視覺流焦點 (focal point) 在縱向 (X) 與橫向 (Y) 的標準差。此時，於特定車道 j 之前車在某時間 t 之移動狀態中，本車 (實驗車輛) 駕駛人在其量子視覺流域 $Q[\Delta x(t), \Delta y(t)]$ 中接受到前方車流中所有車輛所產生的量子視覺流刺激 (設定為 J_Q)。再者， j_Q 為駕駛人在時間 t 所感知到量子視覺流域 $Q[\Delta x(t), \Delta y(t)]$ 附近的某一車輛量子視覺流刺激。因此，某一車輛所形成的外部物理刺激 j_Q ，相對於本車駕駛人接受到前方車流中所有車輛所產生的量子視覺流刺激 J_Q 部分則以 $\forall j_Q \in J_Q$ 表示。

1. 本車駕駛人之前車相對速度感知公式

根據上述量子視覺流基本定義，以及外部刺激造成本車駕駛人對於前車相對速度感知，本研究再接續定義濃霧天候條件下，本車駕駛人對前車相對速度感知的不確定性公式，即本車駕駛人對前車相對速度感知是前車速度減本車速度，再加上誤差項，如式 (1) 所示。

$$S^f_{j_Q \rightarrow i}(t) \Leftrightarrow s^f_{j_Q}(t) - s^f_i(t) + \varepsilon^f_{j_Q \rightarrow i}(t) \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \quad (1)$$

其中，

$S^f_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：本車駕駛人感知到前方車輛 j_Q 與本車 i 在時間 t 的相對速度，即本車駕駛人對前車相對速度感知 (scale)；

$s^f_{j_Q}(t)$ ：前車 i 在時間 t 在縱向 (X-dimension) 的瞬時速度 (kph)；

$s^f_i(t)$ ：本車 i 在時間 t 在縱向 (X-dimension) 的瞬時速度 (kph)；

$\varepsilon^f_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：隨時間變化的誤差項，亦是 $S^f_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 隨時間變化的不確定性幅度 (kph)。

2. 本車駕駛人的感知心理物理動量公式

前車相對速度感知則進一步影響駕駛人內部心理刺激，例如濃霧中本車駕駛人在時間 t 時，在量子視覺流域範圍內觀察周圍車流狀況時發現，視野前方有數輛車在前方行駛（即為 J_Q ），藉由視覺流效應，每個感知到的車輛 J_Q ，都對駕駛人有個瞬間感知心理物理動量（ $\Psi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ，類比於運動力學之動量公式，即物體速度與其質量的乘積），如式 (2) 所表示：

$$\Psi_{j_Q \rightarrow i}(t) = m_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot S_{j_Q \rightarrow i}^f(t) \cdot W_i(t) \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \quad (2)$$

其中，

$m_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：與 j_Q 有關的感知光質量 (light mass)；

$S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：本車駕駛人對前車相對速度感知 (scale)，如式 (1)；

$W_i(t)$ ：本車駕駛人主觀報告駕駛心理負荷得分，參考運用心理負荷 (mental workload) 的李克特量表 (Likert Scale) 尺度規模，其與心理學的注意理論 (attention theory)^[30] 之本車 i 在時間 t 駕駛人注意資源的大小，以及時間壓力有關。

3. 本車駕駛人的感知心理物理能量公式

同式 (2)，本車駕駛人的感知心理物理能量（ $\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ，類比於運動力學之能量公式，即物體速度的平方與其質量的乘積），如式 (3) 所表示：

$$\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) = \frac{m_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot [S_{j_Q \rightarrow i}^f(t)]^2 \cdot W_i(t)}{2} \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \quad (3)$$

其中，

$m_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：感知光質量 (light mass)，如式 (2)；

$S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：本車駕駛人對前車相對速度感知 (scale)，如式 (1)；

$W_i(t)$ ：本車駕駛人主觀報告駕駛心理負荷得分，如式 (2)。

根據式 (2) 及式 (3)，顯示本車駕駛人感覺到前車相對向後移動時，會發生負值的感知心理物理動量 (perceived psychophysics momentum, PPM)。在此情況下，其負值感知心理物理動量被視為對本車駕駛人一個內部負向刺激，從而導致對本車駕駛人的速度調節造成負面影響（即減速）。

4. 視覺流焦點 (Δx) 與感知心理物理動量 $\Delta \Psi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 的聯合不確性公式

$\Delta x(t)$ 也代表在時間 t 量子視覺流域縱向維度的瞬間視覺流範圍，如同上述所提及。因此，因感知周遭交通流所產生的感知心理物理動量的不確性可定義為式 (4)，並可參考海森堡不確性原理 (Heisenberg uncertainty principle) 的形式 ($\Delta x \Delta p \geq h'$ ，權衡

(trade-off) 關係， h' 為蒲朗克常數 (Planck constant) 來表示。

$$\Delta x(t)\Delta\Psi_{j_Q\rightarrow i}(t)\geq h \quad (\forall i,t; \forall j_Q\in J_Q) \quad (4)$$

其中，

$\Delta x(t)$ ：在時間 t 本車駕駛人的視覺流焦點 (focal point) 在縱向 (X) 的標準差 (standard deviation)；

$\Delta\Psi_{j_Q\rightarrow i}(t)$ ：在時間 t 本車 i 駕駛人感知心理物理動量的標準差；

h ：一個動作常數 (action constant)。

式 (4) 說明了駕駛人在縱向視野中的視覺流焦點 ($\Delta x(t)$) 與感知心理物理動量 $\Delta\Psi_{j_Q\rightarrow i}(t)$ 的聯合不確定性 (joint uncertainty) 大於或等於動作常數 (h)。其中， h 是一個動作常數，如 Baker^[20] 所定義，其性質類似量子力學之蒲朗克常數 (Planck constant)。依式 (4) 所表示的不確定性，駕駛人感知心理物理動量的標準差增加 (減少) 時，本車駕駛人的視覺流焦點 (focal point) 在縱向 (X) 的標準差減少 (增加)。

5. 感知心理物理能量一階偏微分公式^[13]

式 (2) 及式 (3) 具有相對速度感知變數，可再探討前車與本車相對距離變化量對於本車駕駛人感知心理物理能量 (PPE) 的影響。本研究利用偏微分公式 (partial differential equation, PDE)，以相對速度感知為分量，推導出感知心理物理能量 (PPE) 一階偏微分公式，如式 (5a)。再將 $\partial X_{j_Q\rightarrow i}(t)=S_{j_Q\rightarrow i}(t)\cdot\partial t$ 代入式 (5a) 中可得式 (5b)。

$$\Phi'_{j_Q\rightarrow i}(t)=\left[\frac{2X_{j_Q\rightarrow i}(t)\cdot S_{j_Q\rightarrow i}(t)\cdot\partial t+(S_{j_Q\rightarrow i}(t)\cdot\partial t)^2}{(X_{j_Q\rightarrow i}(t))^2\partial S_{j_Q\rightarrow i}(t)}\right]\cdot\Phi_{j_Q\rightarrow i}(t)+\Psi_{j_Q\rightarrow i}(t) \quad (\forall i,t; \forall j_Q\in J_Q) \quad (5a)$$

或

$$\Phi'_{j_Q\rightarrow i}(t)=\left[\frac{2X_{j_Q\rightarrow i}(t)\cdot\partial X_{j_Q\rightarrow i}(t)+(\partial X_{j_Q\rightarrow i}(t))^2}{(X_{j_Q\rightarrow i}(t))^2\partial S_{j_Q\rightarrow i}(t)}\right]\cdot\Phi_{j_Q\rightarrow i}(t)+\Psi_{j_Q\rightarrow i}(t) \quad (\forall i,t; \forall j_Q\in J_Q) \quad (5b)$$

依式 (5a) 或式 (5b)，本車駕駛人相對速度感知的變化 (可視為外在刺激變化)，使其感知心理物理能量產生變化 (可視為內在刺激變化)，其相互關聯性與本車駕駛人在感覺瞬時的車輛間相對距離、相對速度感知以及瞬時內部刺激 (即感知心理物理能量和感知心理物理動量) 有關。例如，感知心理物理能量變化與相對速度感知的變化之關聯性為正向，但是與相對距離感知變化為負向關聯。

6. 本車駕駛人感知心理物理能量不確定性與駕駛人反應時間不確定性公式

參考 Briggs 與 Rost^[31] 包含時間之薛丁格方程式 (time-dependent Schrödinger equation, TDSE) 的說明，本研究進一步假設，在感知心理物理能量的不確定性與駕駛人反應時間

(reaction time, RT) 的不確定性具有權衡 (trade-off) 關係。其主要理由係依據海森堡推論，在能量和時間的不確定性之間具有權衡關係，類似於海森堡不確定性原理之共軛 (conjugate) 形式 (如式 (4))。因此，本研究類比於量子力學中的能量時間不確定原理，假設感知心理物理能量與反應時間不確定性存在權衡關係，如式 (6)。因此，提出兩項假設，分述如下：

假設 1：本車駕駛人之感知心理物理能量不確定性 (以標準差形式表示) 與駕駛人反應時間 (reaction time, RT) 的不確定性 (以標準差形式表示) 是兩個互補 (complementarity) 的變量，且具有共軛形式，如式 (6) 所示。

$$\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) \geq h \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \quad (6)$$

其中，

$\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：感知心理物理能量不確定性 (標準差) (scale)；

$\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ：反應時間的不確定性 (標準差) 秒 (s) 或毫秒 (ms)。

將不確定性定義為統計標準差形式具有易觀察與驗證等優點，因為將感知心理物理能量不確定性定義為感知心理物理能量標準差，而反應時間不確定性則為反應時間標準差，研究者較容易觀察並驗證式 (6) 之權衡關係是否存在。

7. 感知心理物理能量標準差與反應時間標準差之線性公式

再依據光的緊縮狀態 (squeezed state) 特性已在量子光學領域得到驗證^[32,33]，本研究進一步假設，感知心理物理能量標準差與反應時間標準差兩個變數，具緊縮且變化小之狀態，即通過使兩標準差的乘積可達到其最小值，亦即駕駛人感知與反應時間標準差乘積最小化時，從而得到式 (6) 近似於等式，而可得到相當於一個動作常數。因此，式 (6) 權衡關係的共軛形式可以轉化成線性關係，如式 (7)。

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) &= h \\ \Rightarrow \ln(\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)) + \ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)) &= \ln(h) \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \\ \Rightarrow \ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)) &= \ln(h) - \alpha_1 \ln(\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中，

α_1 ：等式 (7) 之係數或虛設參數。

式 (7) 之虛設參數之正負值及其大小值，表示感知心理物理能量標準差 ($\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$) 與反應時間標準差 ($\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$) 正負相關之強弱，因此可藉由統計檢定 α_1 小於 0，驗證 $\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 與 $\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 為負相關，具有權衡關係。故本研究使用單尾 t 檢定，檢驗假設 1 的虛無假設 ($H_{null}: \alpha_1 \leq 0$) 與對立假設 ($H_{1A}: \alpha_1 > 0$)。若拒絕虛無假設，則透過 $\ln(\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t))$ 與 $\ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t))$ 為負相關，推論 $\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 與 $\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 具有權衡關係。

3.3 前車相對速度感知與反應時間不確定性之間的關係

8. 近似的感知心理物理能量標準差公式

首先，本研究利用 Ferson 等學者^[34]提出的加權正交總和 (weighted quadrature sum) 方法，將式 (3) 之 $\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 對 $S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 微分，得到近似的感知心理物理能量標準差 ($\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$)，其中包括前車相對速度感知標準差 ($S_{j_Q \rightarrow i}(t)$) 和駕駛心理負荷 (driving mental workload) 標準差 ($\Delta W_i(t), \forall i, t$)，如式 (8) 表示。

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) &\cong \sqrt{\left(\frac{\partial\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)}{\partial S_{j_Q \rightarrow i}(t)}\right)^2 \cdot (\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t))^2 + \left(\frac{\partial\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)}{\partial W_i(t)}\right)^2 \cdot (\Delta W_i(t))^2} \\ &= \sqrt{\left(\Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t)\right)^2 \cdot (\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t))^2 + \left(\frac{m_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot [S_{j_Q \rightarrow i}(t)]^2}{2}\right)^2 \cdot (\Delta W_i(t))^2} \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \end{aligned} \quad (8)$$

其中，

$\Delta W_i(t)$ ：駕駛心理負荷 (scale) 標準差。

9. 感知心理物理能量變化量之簡化公式

式 (8) 在駕駛心理負荷固定在時間 t (即 $\Delta W_i(t) = 0, \forall t$) 下，可得簡化之式 (9)。

$$\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) = \Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t) \Leftrightarrow \frac{\partial\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)}{\partial S_{j_Q \rightarrow i}(t)} = \frac{\Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)}{\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)} \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \quad (9)$$

式 (9) 表示前車相對速度感知的變化所引起的感知心理物理能量變化，在統計上近似且相當於前車相對速度感知的標準差除以感知心理物理能量的標準差。

10. 前車相對速度感知的標準差與反應時間的標準差不確定性公式

此外，本研究重寫式 (6) 為式 (10)，式 (10) 表示前車相對速度感知的標準差 $\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 與反應時間的標準差 $\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ，具有類似於海森堡不確定性原理之共軛特性，而修正常數部分 ($\frac{h}{\Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t)}$ 或 $\frac{h}{\Phi'}$) 則與式 (5a) 和式 (5b) 的外部刺激 ($\partial S_{j_Q \rightarrow i}(t)$) 與內部刺激 ($\partial\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t)$) 有關聯。

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) &\geq h \\ \Rightarrow \Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) &\geq h \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \\ \Rightarrow \Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) &\geq \frac{h}{\Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t)} \geq \frac{h}{\Phi'} \end{aligned} \quad (10)$$

其中，

$\overline{\Phi'}$ ： $\Phi'_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 之上限值。

11. 前車相對速度感知標準差與反應時間標準差之線性公式

通過應用式 (10) 及基於構建假設 1 之相同理由，本研究構建假設 2 如下：

假設 2：本車駕駛人之前車相對速度感知不確定性（以標準差形式表示）與駕駛人反應時間（reaction time, RT）的不確定性（以標準差形式表示）是兩個互補（complement-arity）的變量，且具有共軛（conjugate）形式。再利用光的緊縮狀態性質，本研究進一步變換式 (10) 的共軛形式，令假設 2 具有線性關係，以表示前述兩者間的權衡關係，並限定具有最小下界。因此，推導得到式 (11)。

$$\begin{aligned} \Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t) \cdot \Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t) &\geq \frac{h}{\Phi'} \\ \Rightarrow \ln(\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)) + \ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)) &= \ln(\tilde{h}) \quad (\text{let } \tilde{h} = \frac{h}{\Phi'}) \quad (\forall i, t; \forall j_Q \in J_Q) \\ \Rightarrow \ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)) &= \ln(\tilde{h}) - \beta_1 \ln(\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

其中，

β_1 ：等式 (11) 之係數或虛設參數；

$$\tilde{h} := \frac{h}{\Phi'}$$

式 (11) 之虛設參數性質與式 (7) 相同，即其正負值及其大小值，表示前車相對速度感知標準差（ $\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ）與反應時間標準差（ $\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ ）正負相關之強弱。因此，本研究使用單尾 t 檢定，檢驗假設 2 的虛無假設（ $H_{null} : \beta_1 \leq 0$ ）與對立假設（ $H_{1A} : \beta_1 > 0$ ）。若拒絕虛無假設，則透過 $\ln(\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t))$ 與 $\ln(\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t))$ 為負相關，推論 $\Delta S_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 與 $\Delta T_{j_Q \rightarrow i}(t)$ 具有權衡關係。

圖 1 表示以量子視覺流為基礎的各變數關聯圖，顯示各變數不確定性的關係。後續，本研究探討濃霧氣象條件下，模擬海森堡不確定性原理，以確認跟車行為中駕駛人感知的不確定性下，駕駛人所感知的相對速度與反應時間不確定性之間的權衡關係。本研究使用駕駛模擬器檢驗兩項假設，至於實驗模擬器相關的實驗元素說明如下節。

四、實驗方法與結果

本研究以國內道路駕駛人為研究對象，以濃霧下平原地區公路為環境。令駕駛人於 3 個車道的中間車道行駛，於行駛過程中所行經路段設置 3 種不同的行車速度（90 kph、60 kph、30 kph）與 3 種跟車距離（60m、40m、20m），配合發生前車踩煞車的基本事件情境，共 9 組實驗隨機分配於路段中，並且於運輸研究所駕駛模擬器進行實驗。此實驗主要蒐集

駕駛人在不同行車速度，以及本車駕駛人對前車相對速度之視覺流感知下，對於前車踩煞車時煞車燈亮的反應時間與相對速度判斷，蒐集本車駕駛人反應時間的標準差與相對速度判斷標準差，以及駕駛人之駕駛心理負荷問卷資料。

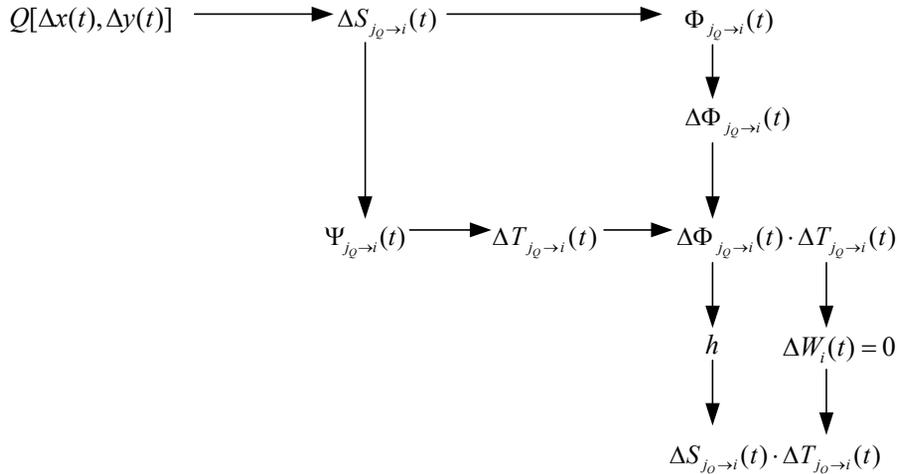


圖 1 以量子視覺流為基礎的各變數關聯圖

有關實驗受試者、控制變數、應變數、實驗設備、實驗步驟與實驗結果說明如下。

4.1 實驗受試者

實驗受試者為 16 位志願參與者，共計 8 位男性與 8 位女性，平均年齡為 38.2 歲 (年齡範圍為 20~60 歲)，每次受試 1 小時，多數曾經參與晴朗天候之實驗。且實驗受試者視力須為正常或矯正後視力正常，實驗 24 小時前並無飲酒以及藥物使用，受試者年齡限制為 18 歲以上，並簽署參與實驗同意書。

4.2 控制變數

根據研究結果顯示^[11,13]，速度和間距等 2 個控制變數，是重複量測感知心理動能與反應時間等數據時，具有統計顯著影響的 2 個重要因素。

1. 速度 (speed)：由實驗模擬器隨機產生有 3 種不同速度水準，分別為 90 kph, 60 kph, 與 30 kph，駕駛人於實驗車輛中將會聽見模擬器提示音，並盡力維持在模擬程式中隨機選定之某一車速行駛。
2. 間距 (spacing)：前車與駕駛人實驗車輛將會由駕駛模擬器控制在 3 種不同間距，分別為 20、40 與 60 公尺。實驗中的駕駛模擬器採用 EON studio 4.0。
3. 光流：光流是指駕駛人眼睛所感知的視野光流數量，視覺域中不同的相對速度將透過軟

體進行轉換。本研究嘗試描述駕駛模擬器受測者眼睛感知的光流量，應用 OpenCV 免費軟體，採用在樣型識別、電腦視覺以及其他影像處理領域中常用於運動檢測之 Lucas-Kanade 光流演算法^[35,36]，將 3 種不同速度對應 3 種不同車間距共 9 組情境的光流態樣，轉換成 9 組光流型態 (pattern)。

4.3 應變數

1. 反應時間：反應時間是指，時間 t_1 時前車煞車燈亮起，至實驗車輛駕駛人採取反應踩下煞車之時間 t_2 的時間差。故反應時間為 t_2-t_1 ，並由駕駛模擬器紀錄。
2. 前車相對速度感知：本研究依據 Hoffmann 及 Mortimer^[37] 使用的相對速度感知實驗及晴朗天候下前車相對速度感知實驗，擴充運用於濃霧中駕駛人對於前車與本車的相對速度差。受試者必須根據前車相對速度感知的不同，使用量尺刻度由 0 (沒有感覺速度變化) 至 7 (非常快) 來表示。本研究選擇設定物理相對速度為 3.4 公尺/秒，測試駕駛人對前車相對速度感知。本研究使用李克特量表 (Likert Scale) 並且設定前車與本車 20 公尺間距時相對速度的七尺度規模 (1-7)。7 個主觀感知及其對應的物理相對速度分別為：1.無差異 (0 公尺/秒)；2.緩慢 (1 公尺/秒)；3.稍慢 (2.2 公尺/秒)；4.普通 (3.4 公尺/秒)；5.稍速 (4.5 公尺/秒)；6.快速 (5.6 公尺/秒)；7.極快速 (6.7 公尺/秒)。40 公尺及 60 公尺間距之前車與本車間的相對速度主觀感知與物理相對速度方案，則維持相同應用程序。
3. 駕駛心理負荷：本車駕駛人主觀報告的駕駛心理負荷得分，係參考運用心理負荷 (mental workload) 的李克特量表 (Likert Scale) 七尺度規模 (1.沒有時間壓力~7.非常有時間壓力)，並由本車駕駛人對 9 種情境比較後獲得。時間壓力 (time pressure) 在二階段實驗之 9 個情境下是 NASA-TLX^[38] 的 6 個因素中最重要和最有效的因子，其餘因子有精神需求 (mental demand)、身體需求 (physical demand)、表現 (performance)、努力 (effort) 與挫折程度 (frustration level) 等。
4. 感知心理能量：依據式 (3) 所定義的感知心理能量，是光質量、感知心理動量的平方與駕駛心理負荷之乘積值，再乘以 1 個係數 1/2。感知心理能量本研究無法直接測量，僅能根據式 (3) 定義，經由量測前車相對速度感知的方式，間接測量感知心理能量。由於受駕駛模擬器的限制，這是目前測量感知心理能量的可能方式。因此，感知心理能量間接測量可被視為一個初步實驗，以確定反應時間和感知心理能量之間的相关性。

4.4 實驗設備

先使用 Google Sketch Up 將所需要的濃霧天候、車輛、道路以及各種交通設施繪出，再匯入 EON 之中進行動態行為設計，匯入場景內每個物件的位置、速度、加速度等各種運動，都可由 EON 控制並觀察，再由 EON 內建的 Route 節點拉線配合 VB Script 程式撰寫，控制進一步的行為變化、資料輸入及輸出，即可與 VB .Net 進行訊息的連接溝通。

以 VB .Net 程式語言建構操作駕駛模擬器之程式核心，不論控制 6 軸運動平台的訊號、各項電子訊息的接收、EON 程式的控制和數據的記錄等，都是使用 VB .Net 撰寫，此為整個駕駛模擬器的重要溝通橋樑、計算及記錄工具。

本實驗為了減少外在條件對駕駛人於前車光流或注意力的影響，環境中並無設置建築物，另外除了前方有事件車外，亦沒有其他交通車流出現；實驗係要求駕駛人行駛於中間車道尾隨事件車行駛。

在決定不同條件下進行實驗後，於實驗中要求駕駛人保持跟車距離或是行車速度，共有 $3 \times 3 = 9$ 種情形，利用螢幕錄影及截圖功能，即可得到駕駛人於不同距離、速度下，前車踩煞車時的光流變化，對駕駛行為及安全性之影響。

此實驗模擬器由運輸研究所開發，包含駕駛車廂，以現實為基礎的視覺與聲音系統，模擬車輛運動的程式，以及一個用來模擬逼真的駕駛環境主機系統。駕車車輛為真實的車輛車廂，模擬環境係由 EON studio 4.0 (EON Reality, Inc., USA) 所產生。

4.5 實驗步驟與流程

實驗受試者首先會了解有關本研究之研究目的、方法、程序以及潛在風險，實驗受試者會單獨受試，實驗受試者會與顯示螢幕保持舒適的觀看距離，並於閱讀實驗說明後，即進行測試。每次實驗約進行 5 分鐘，旨在使駕駛人於模擬環境的駕駛車廂中較輕鬆、舒適地進行實驗。駕駛人於直線道路上依系統提示之 3 種速度行駛，分別為 30, 60 與 90 kph ($m=1,2,3$)，並依規定行駛於中間車道上不變換車道，而與前車的距離將由模擬系統分別控制在 20, 40, 與 60 公尺 ($n=1,2,3$)。實驗路段長為 4,500m，並分為 9 段，每段長 500 公尺，每段的前車將定速行駛 (速度由模擬器隨機指定為 30, 60, 90 kph)，每當前車以固定減速度煞車時，將此時駕駛人的光流視為 $OF(m,n)$ ，故實驗路段共有 9 組光流型態 $OF(m,n)$ ， $m=1,2,3$; $n=1,2,3$ 。駕駛人在直線道路上跟車行駛約 5 分鐘，實驗過程中駕駛人必須持續注意駕駛前方狀況，每次結束後，即填寫有關前車相對速度感知的量尺問卷。蒐集駕駛人在不同行車速度，以及本車駕駛人對前車相對速度之視覺流感知下，對於前車踩煞車時煞車燈亮的反應時間 (前車踩煞車時煞車燈亮之時間 t_1 ，目標車駕駛人腳踏下煞車踏板之時間 t_2 ，反應時間= t_2-t_1) 與相對速度判斷。

本研究沿習晴朗天候下二階段實驗^[13]，設計可適用於濃霧天候下之二階段實驗，如圖 2。第 1 階段實驗目的，係研究在濃霧天候下的感知心理能量與反應時間的不確定性，即感知心理能量和反應時間的標準差乘積等於一個動作常數。如果感知心理能量與反應時間不確定性之權衡關係存在，則動作常數 (h) 可以在第 1 個實驗中確認。因此，本研究也測試在第 1 階段實驗中駕駛心理負荷。第 2 階段實驗的目的，則是確定根據駕駛人前車相對速度感知的標準差和反應時間之間的權衡關係。

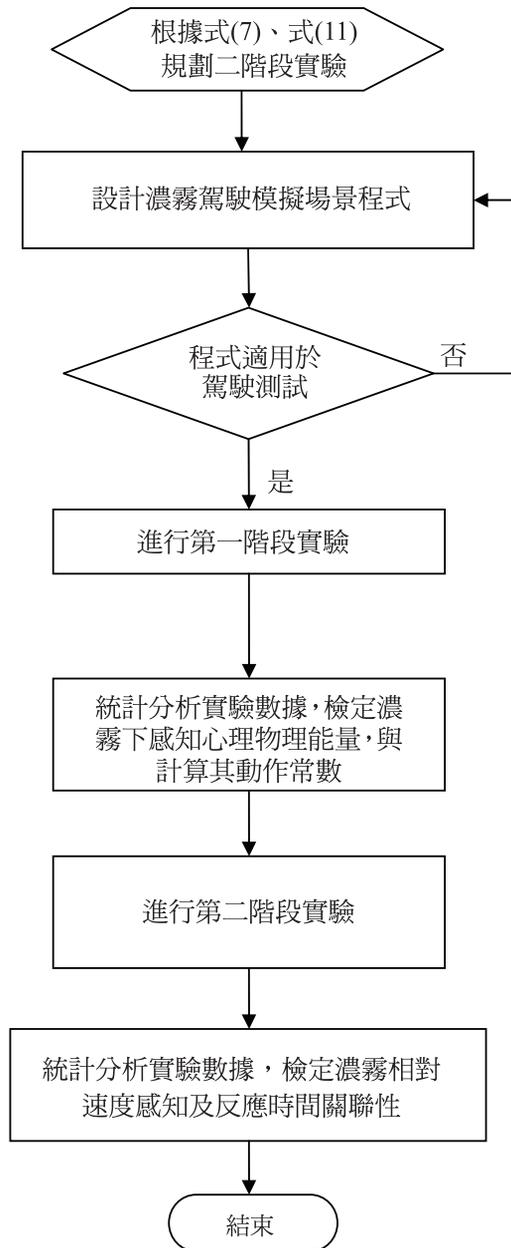


圖 2 二階段實驗程序流程圖

本研究蒐集前車相對速度感知與反應時間，在第 1 階段和第 2 階段實驗中，共量測 5 次實驗數據，除提供第 1 階段實驗調查的感知心理能量與反應時間不確性使用外，亦在第 2 階段試驗中使用。同時為了減少不確定性的擴散，假定駕駛腦力負荷的不確性是零，

簡化第 2 階段實驗中測試駕駛人對前後相對速度感知與反應時間不確定性之間修正 (revised) 之權衡關係。

圖 3 顯示測試場景，其中 (a) 為濃霧天候；(b) 為晴朗天候。圖 4 顯示 9 個測試場景的概念，紅色虛線橢圓表示的視覺範圍，箭頭顯示在前車尾端的光流方向。

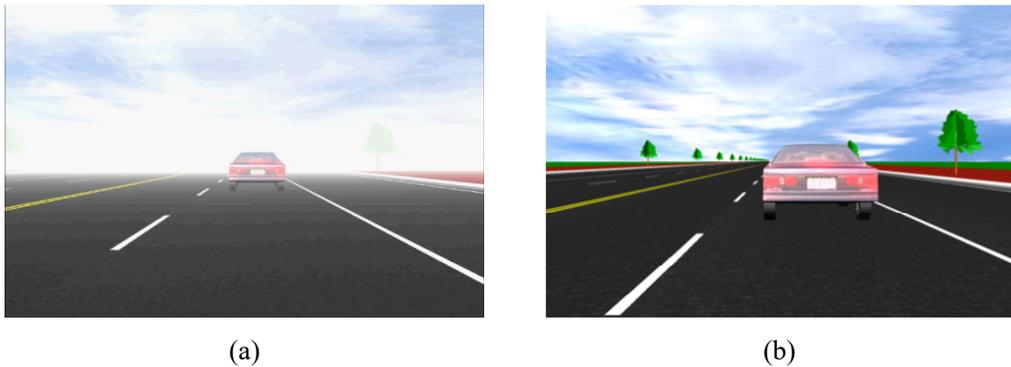


圖 3 測試場景：(a) 濃霧；(b) 晴朗^[13]

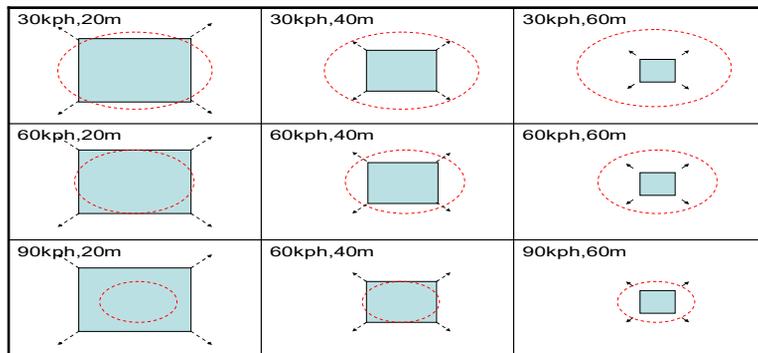


圖 4 前車減速時 9 個測試場景概念

4.6 實驗結果

1. 第 1 階段實驗結果

第 1 階段實驗目的，是驗證假設 1 在濃霧的條件下所對應的虛無假設，即針對在濃霧條件 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta\Phi)$ 之線性迴歸斜率為零之假設，進行驗證。

經過第 1 階段的實驗後，有些駕駛人分心或是反應時間太慢不正常，以至於與前車發生碰撞等資料須先進行修正。因此為鼓勵駕駛人在模擬車廂中的駕駛行為能和日常行為一樣，本實驗提供額外獎勵予未發生碰撞之實驗受試者。為找尋反應時間標準差 (ΔT) 與本車駕駛人感知心理物理動能標準差 ($\Delta\Phi$) 之間的權衡關係，使用自然對數運算子 \ln ，並利

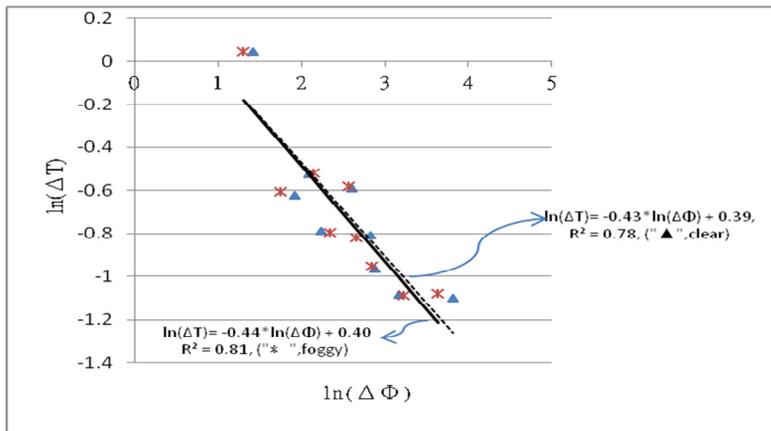
用統計軟體之曲線配適 (curve fitting) 來驗證轉換過後的關係。

在第 1 個實驗中，本研究產生的 720 個實驗結果數據 (16 名受測者×5 次試驗×濃霧條件 9 的場景) 整理如表 1 左側。另外晴朗天候下第 1 階段實驗結果，則依據 Sheu 與 Wu [11,13] 實驗結果綜整如表 1 右側。濃霧曲線配適的結果如圖 5，此線性方程的 $R^2=0.81$ ，線

表 1 濃霧與晴朗天候下第一階段實驗結果

速度	間距 = 20 公尺，濃霧						間距 = 20 公尺，晴朗					
	$\bar{\Phi}$ (scale ³)	$\Delta\Phi$ (scale ³)	\bar{T} (msec)	ΔT (msec)	h^* (note)	\bar{W} (scale)	$\bar{\Phi}$ (scale3)	$\Delta\Phi$ (scale3)	\bar{T} (msec)	ΔT (msec)	h^* (note)	\bar{W} (scale)
S=30 kph	28.1	17.2	1703.4	385.7	6.6	5.3	32.2	17.8	1399.2	381.1	6.8	5.0
S=60 kph	39.5	25.1	1464.9	337.3	8.5	6.0	43.0	23.8	1266.9	339.2	8.1	5.5
S=90 kph	58.3	37.8	1340.6	340.9	12.9	6.7	61.9	45.8	1234.0	333.9	15.3	6.4
	間距 = 40 公尺，濃霧						間距 = 40 公尺，晴朗					
S=30 kph	10.0	8.6	2208.5	593.5	5.1	4.0	11.6	8.1	1810.3	591.3	4.8	3.5
S=60 kph	13.5	13.0	2008.5	559.1	7.2	4.7	16.9	13.6	1710.1	555.5	7.6	4.2
S=90 kph	24.2	14.4	1891.4	441.3	6.3	5.5	24.8	17.0	1691.0	446.5	7.6	5.0
	間距 = 60 公尺，濃霧						間距 = 60 公尺，晴朗					
S=30 kph	4.1	3.7	2620.4	1048.5	3.9	3.3	5.5	4.2	2113.8	1046.0	4.3	2.7
S=60 kph	7.0	5.7	2111.0	545.9	3.1	3.4	7.7	6.9	1721.3	537.7	3.7	2.9
S=90 kph	10.2	10.3	2012.0	451.9	4.7	4.2	11.8	9.4	1717.6	454.8	4.3	3.8

註：動作常數 =sec x scale x scale2；資料來源：本研究整理與 [13]。



資料來源：本研究整理與 [13]。

圖 5 濃霧與晴朗天候下 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta\Phi)$ 關係圖

性關係 $F=29.75$ ，其 $P=0.001<0.05$ ；迴歸方程式係數 t 值 $=-5.4$ ，迴歸方程式係數顯著性 $P=0.001<0.05$ 。假設 1 的虛無假設是在 0.05 顯著性信賴水準被拒絕，即在一個濃霧條件 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta\Phi)$ 之間的負相關關係存在，如表 2 所示。最後，利用無母數檢定之雙樣本差異符號檢定 (Wilcoxon signed-rank test)，驗證濃霧和晴朗的天候條件之兩個行動常數 (h_f 、 h_c) 有無明顯差異，結果顯示在 $\alpha=0.05$ 信賴水準下，兩個行動常數統計明顯無差異 ($n=9$ ， $P=0.46$)。

表 2 濃霧與晴朗天候下假說 1 之 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta\Phi)$ 關係 (在信賴水準 $\alpha=0.05$)

	濃霧	晴朗
R^2	0.81	0.78
Adjusted R^2	0.77	0.75
線性關係 $F(1,7)$ 值	29.75	24.10
線性關係顯著性	0.001	0.002
Unstandardized Coefficients (Std. Error)	$\hat{\alpha}^f_1=-0.44(0.08)$	$\hat{\alpha}^c_1=-0.43(0.09)$
迴歸方程式係數 t 值	-5.4	-4.91
迴歸方程式係數顯著性	0.001	0.002
接受或拒絕 H_{null}	拒絕 H_{null}	拒絕 H_{null}

資料來源：本研究整理與 [13]。

2. 第 2 階段實驗結果

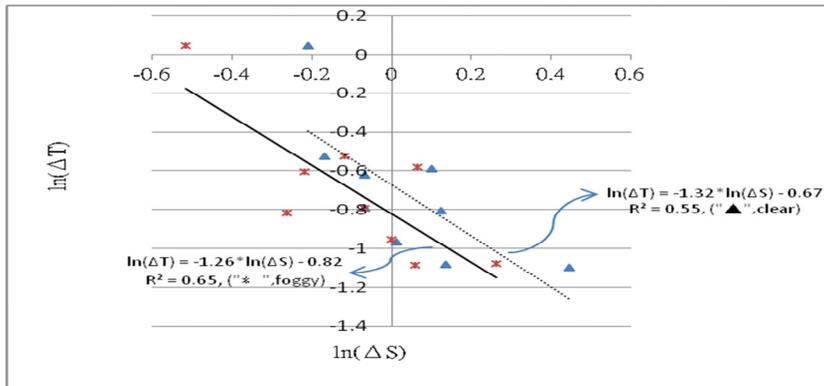
第 2 階段實驗目的，是驗證假設 2 在濃霧的條件下所對應的虛無假設，即針對在濃霧條件 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta S)$ 之線性迴歸斜率為零之假設，進行驗證。採取與第 1 階段實驗相同受試者、自然對數運算子 \ln 與利用統計軟體之曲線配適 (curve fitting) 來驗證轉換過後的關係，驗證反應時間的標準差 (ΔT) 與本車駕駛人對前車相對速度感知的標準差 (ΔS) 之間的權衡關係。

在第 2 階段實驗中，本研究之 720 個實驗結果數據 (16 名受測者 \times 5 次試驗 \times 濃霧條件 9 的場景) 整理如表 3 左側。另外晴朗天候下第 2 階段實驗結果，則依據 Sheu 與 Wu^[11,13] 實驗結果綜整如表 3 右側。濃霧曲線配適的結果如圖 6，此線性方程的 $R^2=0.65$ ，線性關係 $F=8.62$ ，其 $P=0.022<0.05$ ；迴歸方程式係數 $t=-2.94$ ，迴歸方程式係數顯著性 $P=0.02<0.05$ 。假設 2 的虛無假設是在 0.05 顯著性信賴水準被拒絕，即在一個濃霧條件 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta S)$ 之間的負相關之關係存在，如表 4 所示。

表 3 濃霧與晴朗天候下第 2 階段實驗結果

	間距 =20 公尺，濃霧					間距 =20 公尺，晴朗				
	\bar{S} (scale)	ΔS (scale)	\bar{T} (msec)	ΔT (msec)	\tilde{h} (secxscale)	\bar{S} (scale)	ΔS (scale)	\bar{T} (msec)	ΔT (msec)	\tilde{h} (secxscale)
S=30 kph	3.0	1.0	1703.4	385.7	0.30	3.4	1.0	1399.2	381.1	0.28
S=60 kph	3.5	1.1	1464.9	337.3	0.25	3.8	1.1	1266.9	339.2	0.24
S=90 kph	4.0	1.3	1340.6	340.9	0.19	4.1	1.6	1234.0	333.9	0.18
	間距 = 40 公尺，濃霧					間距 = 40 公尺，晴朗				
S=30 kph	2.1	1.	2208.5	593.5	0.61	2.4	0.8	1810.3	591.3	0.56
S=60 kph	2.1	1.2	2008.5	559.1	0.51	2.6	1.1	1710.1	555.5	0.44
S=90 kph	2.9	1.4	1891.4	441.3	0.34	3.0	1.2	1691.0	446.5	0.33
	間距 = 60 公尺，濃霧					間距 = 60 公尺，晴朗				
S=30 kph	1.5	0.6	2620.4	1048.5	1.08	1.9	0.8	2113.8	1046.0	0.95
S=60 kph	1.9	0.8	2111.0	545.9	0.82	2.1	0.9	1721.3	537.7	0.81
S=90 kph	2.0	0.9	2012.0	451.9	0.63	2.3	1.0	1717.6	454.8	0.56

註： $\tilde{h} = \frac{h}{\Phi'}$ ；資料來源：本研究整理與 [13]。



資料來源：本研究整理與 [13]。

圖 6 濃霧與晴朗天候下假說 2 之 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta S)$ 關係 (信賴水準 $\alpha=0.05$)

五、討論

第 1 階段實驗結果揭示以下重要發現：首先，在濃霧天候下前車緊急煞車時，本車駕駛人對前車之感知心理物理動能不確性與反應時間不確性間之權衡關係，可能以類似海森堡不確性原理的形式存在，其權衡關係亦類似於在晴朗天候條件的權衡關係^[13]。

表 4 濃霧與晴朗天候下假說 2 之 $\ln(\Delta T)$ 與 $\ln(\Delta S)$ 關係 (信賴水準 $\alpha=0.05$)

	濃霧	晴朗
R^2	0.65	0.55
Adjusted R^2	0.54	0.48
線性關係 $F(1,7)$ 值	8.62	7.69
線性關係顯著性	0.022	0.028
Unstandardized Coefficients (Std. Error)	$\hat{\beta}^f_1 = -1.26(0.35)$	$\hat{\beta}^c_1 = -1.32(0.45)$
迴歸方程式係數 t-value	-2.94	-2.73
迴歸方程式係數顯著性	0.02	0.02
接受或拒絕 H_{null}	拒絕 H_{null}	拒絕 H_{null}

資料來源：本研究整理與 [13]。

其次，就感知心理物理動能而言，濃霧中 9 個情境之感知心理物理動能平均值之最小值，出現在間距 60 公尺且車速 30 kph 之情境，最大值出現在間距 20 公尺且車速 90 kph 之情境。若類比於物體傾向於低能量位階移動之概念時，在濃霧中本車駕駛人可能會傾向較低之感知心理物理動能情境，即加大間距，放慢車速，與相關文獻相符^[2,7,15]。感知心理物理動能亦被視為一種內部刺激，在一定程度上包含情感反應，例如：緊張、喜好和隨機應變^[39]，故其仍處於高度不穩定和不確定的狀態，而且個人的情感狀態可能影響評估的判斷、人們的評價和駕駛行為^[40,41]。再者，就駕駛心理負荷而言，濃霧中 9 個情境之駕駛心理負荷平均值，均大於晴朗天候之駕駛心理負荷平均值，顯示駕駛人在相同情境時，對前車緊急煞車之心理負荷，受濃霧影響視覺而有較大之心理負荷平均值，及移轉注意力至關聯前方車況，以避免車輛碰撞，類似於運動學者研究成果^[42]。另外，濃霧和晴朗天候條件之兩項行動常數 (h_f 、 h_c) 無明顯差異，可進一步推論：如果濃霧下感知心理物理動能的不確定性小於晴朗天候時，則濃霧下反應時間的不確定則較晴朗天候時增加，然而實驗數據並未支持此推論。以上發現，對於如何從心理學角度提高安全舒適的駕乘環境提供了一些方向。

從第 2 階段實驗結果得到有趣的發現：首先，在濃霧天候下前車緊急煞車時，本車駕駛人對前車與本車之相對速度感知不確定性與反應時間不確定性之間的權衡關係，可能以類比於海森堡不確定性原理的形式存在，其權衡關係與晴朗天候條件的權衡關係[13]相同。可能的原因是高速時前車煞車事件下，本車駕駛人增加心理工作負荷，迅速作出煞車反應，以避免車輛發生碰撞，同時對前車與本車之相對速度感知有較大突然變化，無論在濃霧或晴朗天候下皆同。其次，就相對速度感知而言，濃霧中 9 個情境之相對速度感知平均值，均小於晴朗天候之相對速度感知平均值，顯示駕駛人在相同情境時，對前車緊急煞車時相對速度感知，受濃霧影響視覺而有較小之相對速度感知。若在濃霧下相對速度感知較晴朗天候小，使駕駛人誤認為還有增加速度的餘裕，而依晴朗天候相對速度感知經驗誤判進而提高車速，此推論亦符合部分研究結果，即在濃霧中駕駛人疏忽而提高車速。最後，

就反應時間而言，濃霧中 9 個情境之反應時間平均值，均大於晴朗天候之反應時間平均值，顯示駕駛人在相同情境時，對前車緊急煞車時反應時間受濃霧影響視覺，而有較長之反應時間平均值。若在濃霧或晴朗天候下反應時間標準差無明顯差異下，濃霧下反應時間較長，表示需要較長的安全煞車距離，代表與前車碰撞風險相對較高。

六、結論與建議

6.1 結論

本研究實驗結果證實在濃霧天候下前車緊急煞車時，本車駕駛人對前車與本車之相對速度感知不確定性與反應時間不確定性之間的權衡關係，是以類比於海森堡不確定性原理的權衡形式存在。再者，在濃霧天候的實驗結果與晴朗天候進行比較時，濃霧和晴朗天候條件之兩項行動常數 (h_f 、 h_c) 無明顯差異。另外，研究結果有助於了解霧的特點和明確天候條件下的現象，並解釋駕駛人感知的不確定性。

最後，本研究具體貢獻在於說明了濃霧天候下前車緊急煞車時駕駛人感知的不確定，可能存在相對速度感知標準差與反應時間標準差之間的權衡關係。本研究成果，有助於描述駕駛人感知不確定下的跟車行為現象，並可促進道路安全之改善，激盪出交通理論發展的新想法。

6.2 建議

在可立即延伸的研究課題部分建議如下：

1. 影響駕駛人的環境因素除晴朗與濃霧天候外，尚有夜間 (night) 等天候條件，後續可進行分析夜間天候下前車緊急煞車時，本車駕駛人對前車相對速度感知不確定性與反應時間不確定性之間的權衡關係。
2. 另考量目前國內、外行車環境經常遭遇暴雨的天候環境，也造成行車安全的威脅。類似的不良天候行車環境之跟車行為研究，可列為未來重點研究發展方向之一。
3. 駕駛行為除前車緊急煞車外，還有前車等速與加速等行為，故可於模擬程式中，擴充在夜間及濃霧天候下前車之等速與加速行為，量測本車駕駛人對前車相對速度感知與加減速之反應時間不確定性之關聯性。
4. 未來之類似實驗，可對不小心開車之受測者改採給予扣款之懲罰，以貼近模擬受測者避免車禍可能產生的負效用及心理負擔。
5. 在應用方面，根據實驗結果，反應時間數據均可應用於以量子光學為基礎的跟車模式^[10-13]，使駕駛跟車行為模型在一個不確定的交通環境下 (例如：有霧、晴朗或夜間的天候條件)，可顯著改善。

參考文獻

1. Yan, X., Li, X., Liu, Y., and Zhao, J., "Effects of Foggy Conditions on Drivers' Speed Control Behaviors at Different Risk Levels", *Safety Science*, Vol. 68, 2014, pp. 275-287.
2. Pretto, P., Bresciani, J. P., Rainer, G., and Bühlhoff, H. H., "Foggy Perception Slows Us Down", *eLife*, Vol. 1, 2012, pp. 1-12.
3. Ni, R., Bian, Z., Guindon, A., and Andersen, G. J., "Aging and the Detection of Imminent Collisions under Simulated Fog Conditions", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 49, 2012, pp. 525-531.
4. Trick, L. M., Toxopeus, R., and Wilson, D., "The Effects of Visibility Conditions, Traffic Density, and Navigational Challenge on Speed Compensation and Driving Performance in Older Adults", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 42, No. 6, 2010, pp. 1661-1671.
5. Hoogendoorn, R. G., Tamminga, G., Hoogendoorn, S. P., and Daamen, W., "Longitudinal Driving Behavior under Adverse Weather Conditions: Adaptation Effects, Model Performance and Freeway Capacity in Case of Fog", *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (itsc)*, Vol. XIII, 2010, pp. 450-455.
6. Mueller, A. S. and Trick, L. M., "Driving in Fog: The Effects of Driving Experience and Visibility on Speed Compensation and Hazard Avoidance", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 48, No. 3, 2012, pp. 472-479.
7. Hoogendoorn, R., Hoogendoorn, S., Brookhuis, K., and Daamen, W., "Adaptation Longitudinal Driving Behavior, Mental Workload, and Psycho-Spacing Models in Fog", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2249, 2011, pp. 20-28.
8. 王嘉宇、李澤州、張家偉、涂輝招，「高速公路平直路段霧霾天氣下的 IDM 跟馳模型分析」，*交通運輸研究*，第 1 卷，2015，頁 86-91。
9. 維基百科，「不確定性原理」，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/不確定性原理>，民國 105 年。
10. Sheu, J. B., "A Quantum Mechanics-Based Approach to Model Incident-Induced Dynamic Driver Behavior", *Physica D*, Vol. 237, 2008, pp. 1800-1814.
11. Sheu, J. B. and Wu, H. J., "Uncertainties of Perceived Relative Speed and Reaction Time in Car Following: A Quantum Optical Flow Perspective", *The 16th International Conference of Hong Kong Society Transportation Studies (HKSTS)*, Hong Kong, 2011, pp. 11-18.
12. Sheu, J. B., "Characterization of Driver Behavior during Car Following Using Quantum Optical Flow Theory", *Transportmetrica Part A*, Vol. 9, No. 3, 2013, pp. 269-298.
13. Sheu, J. B. and Wu, H. J., "Driver Perception Uncertainty in Perceived Relative Speed and Reaction Time in Car Following—A Quantum Optical Flow Perspective", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 80, 2015, pp. 257-274.
14. 張開國、葉祖宏、吳熙仁、許鉅乘、黃臣鴻、廖晟傑，「應用駕駛模擬器與光流理論於道路駕駛者對前車相對速度感知之標準差與反應時間標準差關聯性之初探」，交通部運輸研究所運輸研究專輯，民國 102 年。

15. 陳彥承，「應用車輛前方防撞警示系統於高速公路及長隧道內之駕駛績效研究」，中央大學機械工程學研究所碩士論文，民國 99 年。
16. 石裕川、林景瑞，「不同天候下處置道路施工時對男女駕駛腦波及心率變異的影響」，*都市交通*，第 27 卷，第 1 期，民國 102 年，頁 14-24。
17. 涂輝招、李振飛、孫立軍，「駕駛模擬器運動系統對自由駕駛行為的影響分析」，*同濟大學學報：自然科學版*，第 43 卷，第 11 期，2015，頁 1696-1702。
18. Robinson, G. H., Erickson, D. J., Thurston, G. L., and Clark, R. L., "Visual Search by Automobile Drivers", *Human Factors*, Vol. 14, No. 4, 1972, pp. 315-323.
19. Dewar, R., *Road User, Traffic Engineering Handbook*, 5th edition, Institute of Transportation Engineers, Washington, DC, 1999.
20. Baker, R. G. V., "On the Quantum Mechanics of Optic Flow and Its Application to Driving in Uncertain Environments", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, Vol. 2, No. 1, 1999, pp. 27-53.
21. Gibson, J. J., *The Senses Considered as a Perceptual System*, Houghton Mifflin, Boston, 1966.
22. Lee, D. N., "The Optic Flow Field: The Foundation of Vision", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1980, Vol. 290, pp. 169-179.
23. Mehmood, A. and Easa, S. M., "Modeling Reaction Time in Car-Following Behaviour Based on Human Factors", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 2, 2009, pp. 93-101.
24. Knipling, R. R., Wang, J. S., and Yin, H. M., *Rear-end Crashes: Problem Size Assessment and Statistical Description, Technical Report*, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA, 1993.
25. Fitts, P. M. and Posner, M. I., *Human Performance*, Brooks/Cole, Belmont, CA, 1967.
26. Jacoby, J., "Stimulus-Organism-Response Reconsidered: An Evolutionary Step in Modeling (Consumer) Behavior", *Journal of Consumer Psychology*, Vol. 12, No. 1, 2002, pp. 51-57.
27. Tan, A., Brewer, P., and Liesch, P. W., "Before the First Export Decision: Internationalisation Readiness in the Pre-Export Phase", *International Business Review*, Vol. 16, No. 3, 2007, pp. 294-309.
28. Miura, T., "Behavior Oriented Vision: Functional Field of View and Processing Resources", *Eye Movements: From Physiology To Cognition*, Elsevier Science Publisher B. V., Amsterdam, 1987, pp. 563-572.
29. Bartmann, D., Spijkers, W., and Hess, M., "Street Environment, Driving Speed and Field of Vision", In: Gale, A. G., Brown, I. D., Haslegrave, C. M., Moorhead I., and Taylor S. P., *Vision in Vehicles III*, Elsevier, Amsterdam, 1991.
30. Young, M. S. and Stanton, N. A., "Malleable Attentional Resources Theory: A New Explanation for the Effects of Mental Underload on Performance", *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 44, No. 3, 2002, pp. 365-375.
31. Briggs, J. S. and Rost, J. M., "On the Derivation of the Time-Dependent Equation of

- Schrödinger”, *Foundations of Physics*, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 693-712.
32. Iida, S., Yukawa, M., Yonezawa, H., Yamamoto, N., and Furusawa, A., “Experimental Demonstration of Coherent Feedback Control on Optical Field Squeezing”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 57, No. 8, 2012, pp. 2045-2050.
33. Mitra, S. and Mukhopadhyay, S., “An Analytical Investigation on the Interactions between a Squeezed and a Coherent Optical Signal”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 124, No. 20, 2013, pp. 4586-4589.
34. Ferson, S., Kreinovich, V., Hajagos, J., Oberkampf, W., and Ginzburg, L., *Experimental Uncertainty Estimation and Statistics for Data Having Interval Uncertainty*, Applied Biomathematics, New York, 2007.
35. Doğan, S., Temiz, M. S., and Külür, S., “Real Time Speed Estimation of Moving Vehicles from Side View Images from An Uncalibrated Video Camera”, *Sensors*, Vol. 10, 2010, pp. 4805-4824.
36. 維基百科, 「光流法」, <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/光流法>, 民國 106 年。
37. Hoffmann, E. R. and Mortimer, R. G., “Scaling of Relative Velocity Vehicles”, *Accident and Analysis and Prevention*, Vol. 28, No. 4, 1996, pp. 415-421.
38. Mouzé-Amady, M., Raufaste, E., Prade, H., and Meyer, J. P., “Fuzzy-TLX: Using Fuzzy Integrals for Evaluating Human Mental Workload with NASA-Task Load Index in Laboratory and Field Studies”, *Ergonomics*, Vol. 56, No. 5, 2013, pp. 752-763.
39. Öz, B., Özkan, T., and Lajunen, T., “Professional and Non-Professional Drivers’ Stress Reactions and Risky Driving”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 13, No. 1, 2010, pp. 32-40.
40. Matthews, G., “A Transactional Model of Driver Stress”, *Stress, Workload and Fatigue*, In P. A. Hancock and P. A. Desmond (Eds.), Lawrence Erlbaum Association, New Jersey, 2001, pp. 133-166.
41. Malhotra, N. K., “Attitude and Affect: New Frontiers of Research in the 21st Century”, *Journal of Business Research*, Vol. 58, 2005, pp. 477-482.
42. Tenenbaum, G. and Connolly, C. T., “Attention Allocation under Varied Workload and Effort Perception in Rowers”, *Psychology of Sport and Exercise*, Vol. 9, No. 5, 2008, pp. 704-717.