

小貨車高速翻覆之運動軌跡實例分析

吳宗修¹

吳俊良²

摘要

汽車在平坦筆直的道路行駛，其地面運動軌跡近乎直線。假若在未受外力情況下發生交通事故，現場重建多以能量守恆原理與慣性定律為重要法則，亦即該汽車運動軌跡應為朝向原來的前進方向或方向盤偏轉方向之線性型態。然而，在車輛高速翻覆的案例中，發現有小貨車失控翻滾所遺留的路面軌跡非呈線形，而是左右跳動之不規則型態，造成重建工作的困擾；尤其是若有其他車輛外力介入之疑慮時，更須釐清外力介入的時間點，是在貨車翻覆前或翻覆中，才能正確研判外力對該事故造成影響的程度與範圍。高速公路交通事故統計資料顯示，民國 100 年全年發生 135 件車輛翻覆事故，其中小貨車有 114 件，所占比例極大，益使本類案件成為重要的課題。本研究發現完整資料中有 16 件屬非線形軌跡，經細審現場照片發現：非線形軌跡之地面跡證均係「輪胎痕」及「輪圈痕」，極可能是車輛翻覆前，駕駛人仍操控車輛方向所造成，並非受其他外力介入影響。另外，本研究挑選實際案例，分析其「翻滾周數」與「受傷部位」等結果，發現與早期文獻所揭示模擬試驗略有不同，冀能提供後續研究參考。

關鍵詞：事故重建、車輛翻覆、非線形軌跡

一、前言

貨車翻滾對乘員身體造成傷害，也可能使未固定、裝載穩妥的貨物到處散落而妨礙交通。而在高速狀態下翻滾，傷害不僅止於事故當事人，其貨物散落、車輛無法即時拖離，對於高速公路造成運輸能量降低、甚至引發後方追撞的二次事故，使得用路大眾付出極大的社會成本。分析歷史文獻發現影響車輛翻覆運動軌跡有眾多因素，如：車速、翻覆角度、車高、載重、貨物位置等，研究者通常透過數學模型模擬各種狀況，輸入測試資料，取得各種車損情形及運動軌跡，多數用於設計車體安全結構。進行現場重建者，則多以個案中車與路之實際撞擊跡證，研判車輛翻滾過程之態樣。本研究嘗試將民國 100 年全年高速公路發生 135 件車輛翻覆事故中，114 件小貨車翻覆事故建立資料庫，以適當統計方法進行分析，期能與以往實驗結果印證與互補，供日後現場重建工作之參考。

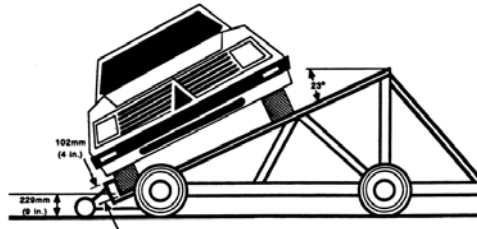
¹ 交通大學運輸科技與管理學系副教授（聯絡地址：30010 新竹市大學路 1001 號，電話：03-5731998，E-mail: thwoo@g2.nctu.edu.tw）。

² 交通大學運輸科技與管理學系博士生。

二、文獻回顧

2.1 車輛翻覆之實驗

依據文獻（鄧作樑等人，2009）記載，早於 1985 年即有學者依據當地汽車安全測試法規，以同款小型車進行實車翻滾測試（圖 1），車上並安置測試人偶，取得相關研究成果；在 1986 年學者以實車研究發現乘員在翻滾汽車中，身體主要損傷部位為頭、頸及胸部；對於翻覆周數的研究，則在 1990 年依據測試法規程序，測得周數在 2.5 到 3.75 圈之內。由於實車測試的實驗成本極高，自 1999 年開始，學者以軟體模擬車輛翻覆時與乘員之動態反應，並分析模擬軟體的限制與困難點。後續的研究者以實車測試結果與模擬數據進行比對驗證；2001 年學者探討車輛重心、輪距等因素對車輛翻覆行為之影響。由於數位技術的進步，在 2008 年(Rose *et al.*)開始採用攝影機對位(camera-matching)影像分析技術，著手動態及變形的量化量測研究。



資料來源：鄧作樑等人(2009)。

圖 1 FMVSS-208 側向翻覆測試示意圖

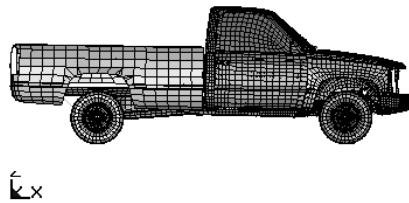
2.2 模擬車輛模型

相關的研究文獻中，學者（翁肇鴻，2008）建立完整車輛模型，以模擬實際車輛動態；其將車輛主體分為：「可壓縮質量系統」（車體，假設為剛體運動 rigid body motion）與「不可壓縮質量系統」（unsprung-mass system）；參數與係數部分包含：車輛慣性與幾何參數、懸吊系統係數、輪胎幾何參數及非線性輪胎模型參數等四類，亦介紹「簡化車輛模型」等多種模擬車輛模型，能幫助對於車輛運動的瞭解，以及車輛複雜而互相牽動的系統因素。該研究模擬結果顯示：所提出的法則可以成功地控制車輛免於翻覆，並控制車輛軌跡。但是當車身側滑角太大，控制法則將失效，也表示縱使在理想的模擬狀態，仍不能避免車輛翻覆。

另外，學者（鄧作樑等人，2009）介紹美國國家道路交通安全管理局(NHTSA)發展的小貨車有限元素模型（圖 2），是由 65 個組件、12,065 個節點、437 個固體元素、10,028 個殼元素、49 個樑元素及 44 個質量元素共同組成。其以 Chevrolet pickup 小貨車為研究對象，使用模擬軟體進行各項測試模型之建構與模擬分析。

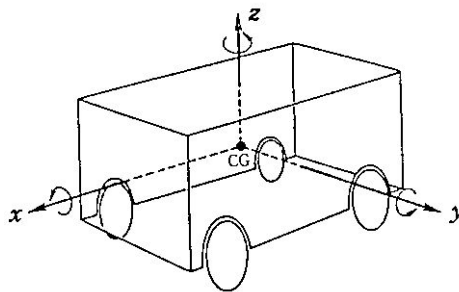
2.3 車輛驅動與輪胎側滑

為了研究車輛的運動與控制，大部分的文獻均以車輛之前後方向為 x 軸、左右方向為 y 軸、上下方向為 z 軸，並將車輛重心設為原點，形成車輛力學模型(賴耿陽, 1998)，將車輛運動自由度設為三次元空間內剛體的運動，分為： z 方向、 y 方向、 x 方向、繞 x 軸旋轉、繞 y 軸旋轉、繞 z 軸旋轉等 6 種類運動，如圖 3。其中「繞 x 軸旋轉」稱側傾運動、「繞 z 軸旋轉」稱偏轉運動、「 y 方向的並進運動、左右運動」稱側向運動，是操作方向盤才產生的運動。討論車輛翻覆議題，常提及的側滑角(slip angle)是指：車輛的前進方向與旋轉面之夾角。輪胎的側滑角增大，變形愈不順暢；如果側滑角達 12 至 16 度時，接觸地面的變形已幾乎沒有平行輪胎前進方向的部分，此時可視為輪胎觸地面與地面相對滑動。



資料來源：鄧作樑等人(2009)。

圖 2 Chevrolet pickup 小貨車有限元素模型



資料來源：賴耿陽(1998)。

圖 3 車輛力學模型

2.4 車輛翻覆之事故現場重建

學者(翁肇鴻, 2008)曾表示：車輛翻覆常發生於駕駛者過度操控或是不良道路狀況，並且重心高度愈高的車輛愈容易發生翻覆。Daily (2006)等人在討論車輛翻覆的交通事故時，認為最常見的議題是「決定車輛翻滾的初速」及「決定誰是駕駛」；也提及發生翻車的原因很多，包含不適當的偏轉(inappropriate steering)、絆倒(trips)、單側坡(side hilling)、駛入邊坡(steer bank)及遭他車撞擊或固定物等許多不同的型態。其將單一車輛翻滾的類型區分

為：側滾(Side-to-Side)、側翻滾(Barrel roll)及前翻滾(Car flip over)等3類，而實際的翻滾則可能是複合型態。在Daily等人的著作Fundamentals of Traffic Crash Reconstruction(2006)中，建議事故重建工作者可以由現場環境跡證、車輛外觀跡證、車輛內部跡證及當事人之受傷情形等項目進行，也強調比對工具痕跡、邏輯思考的重要性。

三、研究方法

3.1 文獻分析法

本研究欲瞭解小貨車在高速狀態下翻覆的軌跡，先蒐集以往對於車輛翻覆的研究文獻，就各研究之研究目的、對象、方法及結果等內容，進行比較，期能瞭解研究工具的發展狀況，便於本研究方法之設計。除了相關研究文獻主題與內容，須再輔以網際網路等資料蒐集，進而探討與研析。在常用搜尋引擎中使用以下關鍵字搜尋：「車輛翻覆 vehicle rollover」、「汽車事故 vehicle crash」、「小貨車 pickup、light truck」、「客貨車 van」等。

3.2 個案分析法

3.2.1 跡證態樣

本項以事故現場圖為藍本、現場照片為輔證，將事故車輛之地面跡證(觸地起點至終點、輪痕或刮地痕)，在未受到其他外力影響的條件下，研判其「方向改變」的數量，如僅有1個方向、沒有改變，則判為「線形」軌跡；如有1個以上的「方向改變」，則判為「非線形」軌跡，如：刮地痕由中線車道進入外線車道，後又轉變回中線車道，即判為「非線形」軌跡(圖4)。



圖4 非線形跡證

3.2.2 車輛方向及車體轉向的表示方式

為能瞭解車輛方向盤之轉動，將「偏轉運動」(繞Z軸的旋轉運動)依順行車方向分為：「向左」為「逆時針」、「向右」為「順時針」；為瞭解車體側

翻或側翻滾的運動，將車體「側傾運動」(繞 x 軸的旋轉運動)亦依順行車方向分為：「向左」為「逆時針」、「向右」為「順時針」；至於「側向」之前翻滾的運動(繞 y 軸的旋轉運動)，則依順行車方向分為：「向前」與「向後」。進行個案之現場重建時，以地面跡證研判，整體跡證方向、刮地痕之連續性、痕跡與車體特徵之工具痕跡比對、旋轉空間是否符合當地環境等之邏輯思考，研判車輛之偏轉、側傾及側向運動並予以逐案記錄。

3.2.3 翻滾跡證之描述

「翻滾周數」為車輛由行駛方位之 0° 至停止狀態，如：「 $1/4$ 」表示「側面接觸地面即停止」、「 $1/2$ 」表示翻滾至「車頂接觸地面即停止」，以此類推。「翻滾範圍」為：垂直於行車方向之跡證，由左至右之最大距離(單位：0.1公尺)；「觸地最遠距離」為：順行車方向之跡證，由跡證起點至終點之最大距離(單位：0.1公尺)；「停止角度」指車輛停止時之車頭方向與行車方向之夾角，以 0° (或 360°)、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 等為分界。

3.2.4 其他跡、事證之分類與記錄

包含「整體偏向」為「原行駛車道」至「最終位置」之方向，以「左」、「直」、「右」等3個方向表示；「貨物固定情形」分為「有固定」、「未固定」、「不明」等3種；「駕駛人受傷部位」主要記錄其受傷體側，如「左手肘」、「右手指」；以及「事故肇因」、「車種」、「車損」、「乘客受傷部位」及「其他註記」等參考項目。

3.3 德菲法

為使前項個案分析達到正確、客觀目的，本研究依據德菲法程序，選定3位具有5年以上審核事故經驗的專家審閱者，審閱者之間互不知曉其他審閱者身分。依前項分析方法，就國道高速公路100年1至12月發生之小客貨車翻車之全般事故資料114件，逐卷分析、記錄；在完成每位專家之問卷後，再將其他2位審閱者的研判結果，提供該審閱者做為第二次研判，再進行一次分析，最後蒐集、比對、討論至無差異性。

3.4 敘述性統計分析

本研究之目的欲發掘小貨車高速翻覆之「非線性運動軌跡」，進而對此類事故有進一步之認識；如欲建立模式或分析因素之關係，其樣本應達一定數量；否則在樣本數不足或分析因素過多時，遽然進行推論或探索之統計分析，可能不易獲得較佳的結果。

四、資料整理與分析

4.1 資料來源

以國道公路警察局 100 年全年高速公路及管轄快速公路之小貨(含客貨)車翻覆全般事故為研究資料，每卷包含：道路交通事故現場圖(草圖)、道路交通事故調查報告表(一、二)、當事人調查筆錄、證人或關係人調查筆錄、道路交通事故照片黏貼紀錄表、道路交通事故當事人酒精測定紀錄表、道路交通事故肇事人自首情形紀錄表、道路交通事故初步分析研判表、疑似道路交通事故肇事逃逸追查表、舉發違反道路管理事件通知單影本，以及屍體相驗報告(或醫療院所診斷證明)等文件。

4.2 有效資料

本研究樣本計 114 件，完整資料計 56 件；不完整資料計 58 件，包含：事故後車輛移離現場、事故過程受路側交通設施影響(如：撞擊外側護欄、路緣石或翻落邊坡)、二次事故及測繪不明確、錯誤或漏失等，另外 7 件缺乏「肇事因素」之判定。

4.3 軌跡分析

4.3.1 運動軌跡分析

完整資料中 40 件屬「線形軌跡」、16 件屬「非線形軌跡」。二者在「翻滾範圍」或「觸地最遠距離」，並無顯著關聯。

「非線形軌跡」之翻覆事故除具有「無其他外力介入而方向改變」之分類條件外，尚有部分特徵如下：

- 1.非線形之地面跡證均係「輪胎痕」、「輪圈痕」或兩者伴生。
- 2.呈現連續性或斷續之弧形、S 形或近似之形狀，其長度不一。
- 3.在出現「車體刮地痕」後，其跡證方向即不再改變而呈線形。
- 4.對照駕駛人筆錄內容，有「閃避失控」之陳述。

4.3.2 翻滾範圍

垂直行車方向之跡證散佈範圍為 3 至 16.6 公尺(分佈圖如圖 5)。

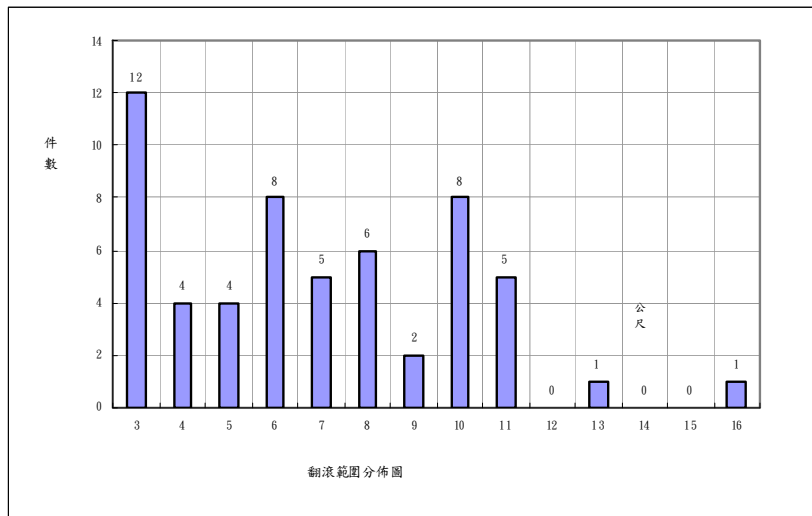


圖 5 跡證範圍散佈圖

4.3.3 觸地最遠距離

個案之順行車方向跡證，由跡證起點至終點之最大距離由 6 公尺至 110 公尺（分佈圖如圖 6）。

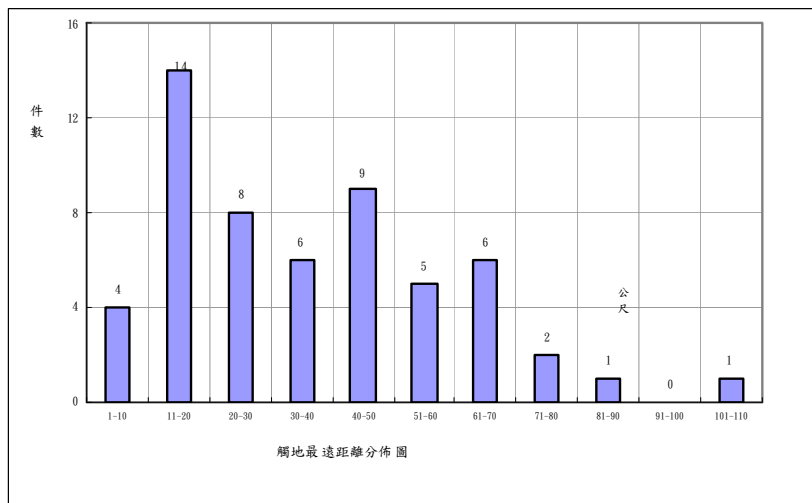


圖 6 觸地最遠距離分佈圖

4.3.4 翻滾周數

車輛由行駛方位之 0 至停止狀態，「1/4 周」36 件、「1/2 周」10 件、「3/4 周」3 件、「1 周」4 件、「1 又 1/4」、「1 又 1/2」及「1 又 3/4」均為 1 件。如圖 7 所示。

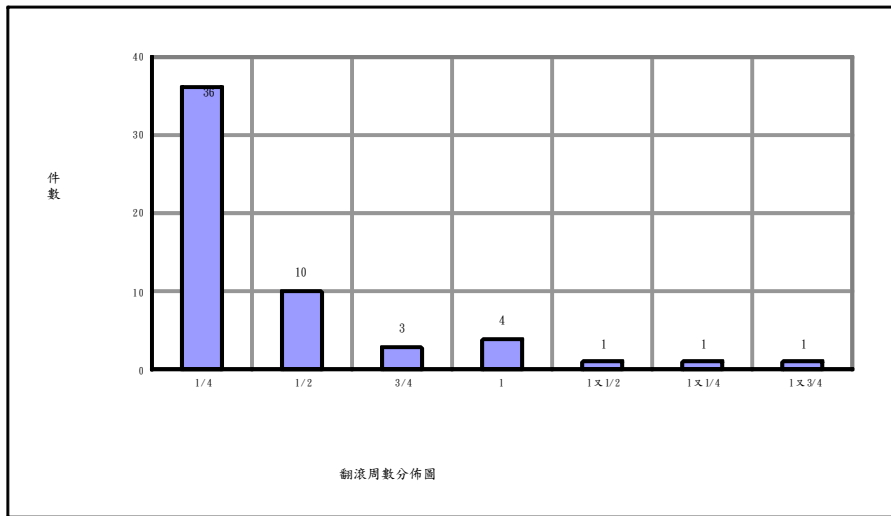


圖 7 翻滾周數

4.4 其他

4.4.1 肇事原因

107 件有明確記錄「肇事因素」之案件，其中「左後輪故障」（包含：膠皮脫落、爆破、爆破脫落）者 45 件、「右後輪故障」者 28 件，二者合計 73 件、占 68.2%；但均無前輪故障之案件。

4.4.2 載貨情形

37 件有明確記錄載貨及其固定情形之案件，其中「貨物固定」者 4 件、「貨物未固定」者 33 件，後者有明顯偏高情形。

4.4.3 駕駛人受傷情形

15 件有明確記錄駕駛人受傷部位之案件，其中「左手」者 13 件、「右手」者 1 件、「頸椎」者 1 件。

4.4.4 天候

114 件均在事故調查表件中記錄「天候」，其中「晴」110 件、「雨」8 件。

五、討 論

1. 爆胎對小貨車翻覆之影響

依「爆胎使該側驅動力降低」現象，爆胎側之驅動力小於非爆胎側，

車輛行進方向應即偏向爆胎側；如貨物未固定，可能慣性移動，使重心偏移，兩側輪胎受力不均，而留下輪痕（或輪框痕）；此時，如駕駛人偏轉方向盤，企圖反向修正，貨物再次慣性移動，重心再次偏移，使失控情形加劇，甚至造成翻覆。

2. 非線形軌跡之產生原因

小貨車非線形軌跡之地面跡證，係由「輪胎痕」或「輪圈痕」造成，表示當時該車之車輪部分，尚未完全懸空，推測其仍能反映駕駛人之部分操控能力，使車輛不依線形方向前進，如果車體非呈平面運動，則可能在地面留下非線形跡證，形成非線形軌跡。

3. 與受外力撞擊之跡證比較

本研究發現：非線形軌跡之跡證呈弧形，如不能連續，其態樣仍可觀察為連續型；如果車輛在留下輪痕的過程中，遭受（足夠的）外力撞擊，車輛運動方向將受影響，輪痕也會改變方向，產生轉折角度。兩者在外觀上，有足夠的特徵可供比對區分。

4. 資料有效性

本研究不完整樣本計 58 件，源自處理員警於繪製現場圖時發生錯誤，車頭方向錯誤者 1 件、車輪方向錯誤者 1 件，資料錯誤率達全部件數之 1.8 %；本研究僅採用完整資料 56 件進行軌跡分析，似不宜建立跡證模型。

5. 與早期實驗比較

本研究對實際案例進行分析，發現「翻滾周數」至多為「1 又 3/4 周」，且僅出現 1 件，與早期模擬實驗結果「2.5 到 3.75 圈」（即 2 又 1/2 到 3 又 3/4 圈）明顯不同，有進一步探究空間；另外，本研究記錄得「駕駛人受傷部位主要在左手」，與早期文獻之乘員受傷部位「主要損傷部位為頭、頸及胸部」不同，疑與繫妥安全帶之條件不同有關。

參考文獻

- 吳宗修、吳俊良、劉瑞(2010)，「探索肇事次因在交通安全策略之意義」，*100 年道路交通安全與執法研討會專題報告*。
- 鄧作樑、雷貴安(2009)，「車輛翻覆測試之數值模型建立與分析」，*車輛工程學刊*，第 6 期，頁 1-15。
- 翁肇鴻(2008)，*車輛行駛軌跡及抑止車輛翻覆之差動式輪胎力矩控制系統*，交通大學機械工程學系碩士論文。
- 賴耿陽(1998)，*車輛驅動及控制*，一版，臺南：復漢出版社有限公司。
- Daily J., Shigemura, N., and Dailyfont J. (2006), *Fundamentals of Traffic Crash Reconstruction*, Florida: Institute of Police Technology and Management.

