

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之 操駕行為

Using motorcycle ground scratch mark and self-falling direction to analyze rider driving behavior

張超群 Chau-Chin Chang¹

摘要

在車輛行車事故鑑定時，經常有機車自摔倒地之案件。這是因為機車騎士遇到突發狀況而緊急煞車並作向左或向右閃避之動作，因機車失控而形成自摔。機車自摔後的倒地方向與車輪是否鎖死(或稱鎖住)有很大關係。機車可能因前輪先鎖住或後輪先鎖住或兩輪同時鎖住，加上機車閃避方向而形成各種機車刮地痕走向與倒地方向。本文應用輪胎滑動率、摩擦橢圓、陀螺力矩等力學原理，簡單分析前述騎士操控行為而造成自摔之刮地痕走向與倒地方向，並製成一個表方便使用者參考。我們用多個實際自摔案件，由機車自摔之刮地痕走向與倒地方向，分析騎士之操駕行為。經由這些分析，我們也說明避免機車自摔之方法。

關鍵字：機車自摔、向左或向右閃避、前後輪鎖住、刮地痕、倒地方向

Abstract

In identification of vehicle traffic accidents, there are often some cases of motorcycles self-falling to the ground. When a motorcycle rider encounters an emergency situation, he or she usually brakes urgently and performs to dodge to the left or right, resulting in a self-fall due to lose control of the motorcycle. The falling direction of the motorcycle self-fall is related to the wheel lock-up. The motorcycle

¹ 南臺科技大學機械工程系副教授。

self-fall may be caused by the front wheel lock-up first, the rear wheel lock-up first, or the two wheels locking at the same time, as well as dodge directions resulting in various motorcycle ground scratch marks and falling directions. In this paper, tire slip ratio, friction ellipse, and gyroscopic moment were used to analyze the falling direction of a motorcycle and direction of the ground scratch mark caused by the rider's various manipulation behaviors. The results of these analyses established a table for convenient reference to users. This study used several real traffic accident cases as examples to analyze the rider's driving behavior. Through these analyses, the studied results also illustrated the ways to avoid motorcycle from self-falling.

Keywords: motorcycle self-fall, dodge to the left or right, front wheel and rear wheel lock-up, ground scratch mark, falling direction.

一、前言

台灣機車常因天雨路滑、過彎失控、閃避失控、道路有人孔蓋、行駛磁磚路面等原因造成機車自摔。在作車輛行車事故鑑定時，也經常有機車自摔之鑑定案件，主要原因是台灣機汽車數量龐大，許多騎士常因機車直行時左前方視線被擋住而對向汽車左轉，或因路邊車輛突然起駛而未注意後方行駛之機車，或因路口右邊車輛突然衝出，直行機車緊急煞車並閃避而自摔。機車自摔通常騎士與被載人都會倒在路上或撞擊閃避的車輛，因此非常危險。

國內外對機車交通事故力學之研究主要是求碰撞車速或模擬機車碰撞後之運動與對騎士之傷害。林志儒與施人維應用多體動力學軟體 ADAMS 模擬機車與汽車碰撞後騎士之受傷部位及碰撞後機車之運動情形。(林志儒，2005；施人維，2012)；林峻弘利用實車測試機車倒地後刮地痕長度與車速，計算出摩擦係數(林峻弘，2009)；國外大都用動量法或軸距長度改變法，求機車與汽車碰撞之車速(Obenski and Hill, 2002；Rivers, 2006；Masory etc., 2012；Rose and Neale, 2018)。張超群將機車分為前部與後部，分析機車倒地方向的力學原理與簡易判斷方法(張超群，2015、2016)。張超群也提出應用機車刮地痕走向判斷機車碰撞前行駛方向的簡易方法(張超群，2020、2021)。西方國家因機車相對於汽車數量少很多，他們機車自摔絕大部分是發生在彎道行駛時因車速太快，輪胎抓地力不夠而產生的低轉倒(low side)(Cossalter, 2006；張超群、劉成群，2019)。對車禍中機車自摔原因之研究並不多，只知道車輪鎖住(lock-up)，輪胎失去抓地力，機車不穩而倒地，但並沒有詳細分析騎士的操駕行為。

張超群應用煞車時車輪的滑動率、輪胎的摩擦橢圓、機車前輪之陀螺力矩，簡單分析機車自摔之倒地方向和刮地痕走向(張超群，2022)。本文是以此研討會論文為基礎做較深入的說明。我們先簡介與機車自摔的有關理

論，如輪胎的滑動率、摩擦橢圓與陀螺力矩。然後說明前後輪是否鎖死(或稱鎖住)，對機車自摔倒地方向之影響。我們也說明機車向左閃避(簡稱左閃)或向右閃避(簡稱右閃)時，機車刮地痕的走向，並製作一個表方便使用者參考。我們用多個實際案例之現場圖分析機車自摔時騎士之操駕行為，簡單易懂，可供交通警察或車輛行車事故鑑定會委員參考。最後我們也簡介防鎖死煞車系統(Anti-lock Braking System，以下簡稱 ABS)與連動煞車系統(Combined Braking System 以下簡稱 CBS)之工作原理，說明避免機車自摔之方法。

二、基本理論

機車自摔和煞車(制動)有很大的關係。而機車制動力之大小和騎乘穩定性又與輪胎的滑動率及摩擦橢圓有關。此外，機車閃避時又與前輪之陀螺力矩有關連。內文中粗體符號代表向量，斜體符號是純量。

2.1 滑動率

車輪的制動力和穩定性，與輪胎的滑動率(slip ratio)有很大的關係。所謂的滑動率是指制動過程中，輪胎滑動所佔的比例。因為輪胎運動時可能做純滾動、邊滾動邊滑動或完全滑動。因為輪胎不是剛體，因此輪胎與地面間的摩擦係數並不是固定值。在交通事故鑑定時，輪胎與地面之間的摩擦係數是計算車速的重要參數。煞車時輪胎會根據煞車力的大小產生不同程度的滑動，車輪先從純滾動到邊滾動邊滑動，若車輪鎖死或稱鎖住，則輪胎變成完全滑動。參考圖 1，在制動過程中人們引入滑動率 s 這個參數來定義制動時車輪的滑動比率，其定義為

$$s = \frac{v - r\omega}{v} \times 100\% \quad (1)$$

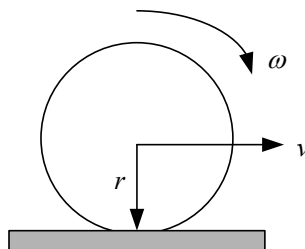


圖 1 車輪的滑動率

式中 v 為車輪中心的速度(當車輛直線行駛時等於車速),單位為 m/s , ω 為車輪轉動的角速度,單位為 rad/s , r 為車輪半徑,單位為 m 。當未踩煞車時 $v=r\omega$,此時滑動率 $s=0$;隨著煞車力的增大,車輪角速度 ω 逐漸減小,滑動率 s 也隨之增加,此時滑動率 $0 < s < 100\%$,車輪做邊滾動邊滑動之運動;當煞車力大到讓車輪鎖住時,車輪沒有轉動,角速度 $\omega=0$,此時滑動率 $s=100\%$,車輪完全滑動。制動時,若車輪完全滑動或接近完全滑動,會在路面上留下煞車痕。若制動時,車輪滑動率低,則不會有煞車痕。現今的汽車幾乎都有 ABS,制動時滑動率低,因此不會有煞車痕。

輪胎的摩擦係數與滑動率之間的關係可用圖 2 描述(Wong, 1993; 張超群、劉成群, 2019)。從圖 2 中可知滑動率在 $15\% \sim 20\%$ 左右時,摩擦係數在 A 點有最大值 μ_p 稱為峰值摩擦係數;而在 B 點滑動率 $s=100\%$ 時的摩擦係數相當於動摩擦係數 μ_k ;而車輪邊滾動邊滑動時的摩擦係數大小介於 μ_k 與 μ_p 之間。路面能夠提供給輪胎的制動力稱為制動附著力(制動抓地力),其大小與路面摩擦係數成正比。因此制動抓地力也隨滑動率而變。制動抓地力與滑動率之間的關係曲線類似圖 2。使用防鎖死煞車系統 ABS 就是要將滑動率控制在 $15\% \sim 20\%$,以獲得最大的摩擦係數 μ_p ,即獲得最大制動抓地力,可縮短煞車距離。當然 ABS 最重要的功能是防止車輪鎖住,機車若車輪鎖住會失去穩定性而失控自摔。

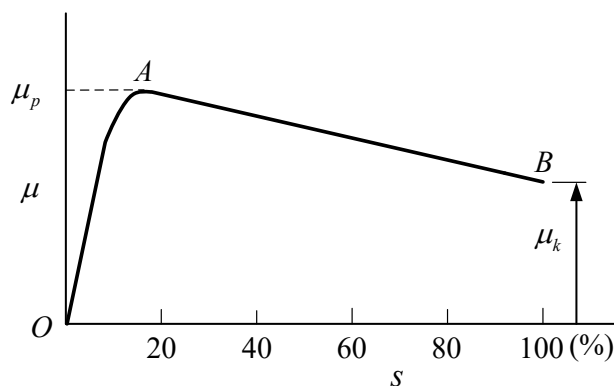


圖 2 摩擦係數 μ 與滑動率 s 之關係圖

2.2 輪胎摩擦橢圓

如圖 3(a)所示,輪胎滾動的方向(圖中 x 方向)稱為縱向,輪胎的左右方向(圖中 y 方向)稱為側向或橫向。機車直線行駛時輪胎只受到縱向力。轉彎或彎道行駛時,輪胎則同時受到縱向力和側向力。輪胎在縱向和側向的抓地力都有極限值,分別稱為最大縱向抓地力 $F_{x\max}$ 及最大側向抓地力 $F_{y\max}$ 。

以 $F_{x\max}$ 和 $F_{y\max}$ 為長短半軸所作的橢圓稱為附著橢圓或摩擦橢圓 (Friction ellipse) (Wong, 1993 ; Cossalter, 2006 ; 張超群、劉成群, 2019), 如圖 3(b) 所示。

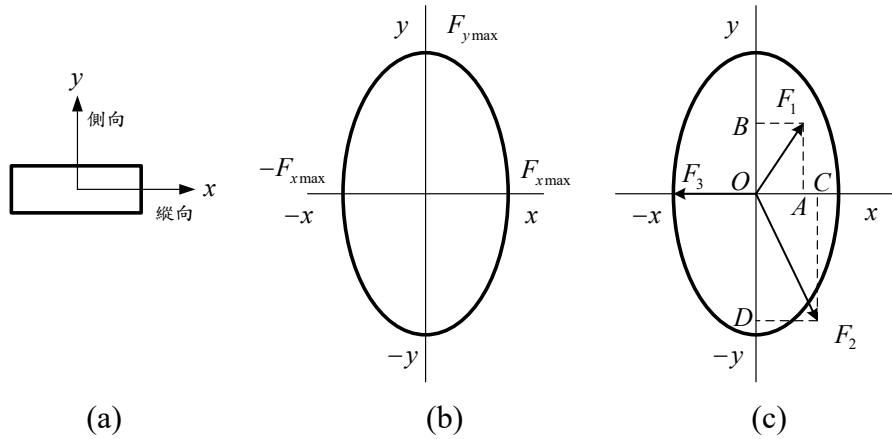


圖 3 摩擦橢圓和穩定性

摩擦橢圓的邊界代表輪胎在各種不同行駛狀況所能提供的最大抓地力，當輪胎受到的縱向力與側向力的合力位於橢圓內時，表示輪胎能提供足夠的抓地力，因此機車是穩定的。例如圖 3(c)中之縱向力 \overline{OA} 與側向力 \overline{OB} 之合力大小 F_1 位於摩擦橢圓內，所以機車是穩定的；若合力位於附著橢圓之外，表示輪胎無法提供這麼多的抓地力，因此機車會失控。例如圖 3(c)中之縱向力 \overline{OC} 與側向力 \overline{OD} 之合力大小力 F_2 ，位於摩擦橢圓外，因此機車是不穩定的。若機車緊急煞車車輪鎖住，此時輪胎縱向已用掉所有的抓地力，例如圖 3(c)中之力 F_3 ，側向已無任何抓地力，只要機車受到側向力(例如機車左閃或右閃產生之離心力)，車輪就會側滑。

為防止輪胎與路面的接地印痕的形狀隨側傾角改變而發生明顯變化，造成側向抓地力改變過大，並適應機車騎乘時因外傾角的大幅變化，產生側向力的突然變化，機車輪胎的側向剛度都較高。因此，機車的側向抓地力比縱向抓地力大，摩擦橢圓的長半徑在側向(y方向)。與機車輪胎不同的是，汽車輪胎摩擦橢圓的長半徑則沿x軸，故汽車輪胎的縱向抓地力比側向抓地力大。加大輪胎的寬度可使摩擦橢圓變大，從而增加輪胎之最大縱向抓地力，讓最高車速變大，並增加側向抓地力，改善車輛過彎的穩定性，這就是許多跑車要使用寬胎的原因。

2.3 機車之前部與後部

為了判斷機車倒地方向，本文將機車視為由兩大部件組成，稱為前部與後部。機車靜止時轉動把手，會一起轉動之零組件如前輪、前輪蓋、前叉、把手、照後鏡等構成機車之前部；其餘不動之零組件如車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管、油箱、坐墊、車牌與後輪等為機車之後部。與機車自摔有關之前輪屬於前部，而後輪屬於後部，如圖 4 所示。圖 5(a)為機車整車之前部與後部連在一起；而圖 5(b)為機車與前部與後部分離之示意圖(張超群，2015、2016)。



圖 4 速克達與檔車的前部與後部

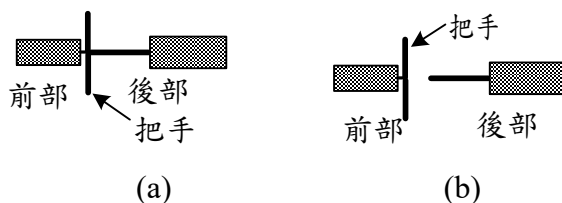


圖 5 機車前部與後部之示意圖

2.4 前輪之陀螺力矩

機車前部碰撞或機車左閃或右閃，前輪未鎖住時，機車的倒地方向由陀螺力矩(Gyroscopic moment)決定。所謂陀螺 (Gyroscope)，是指繞自己的對稱軸高速旋轉的剛體，行駛中機車的車輪可視為陀螺。當機車行駛，車輪轉向時便會有陀螺力矩產生。參考圖 6，設車輪以角速度 ω 繞 y 軸轉動於路面上滾動，此時車輪的自轉角動量 $\mathbf{H} = I\omega$ ， I 為車輪繞自轉軸 y 的質量慣性矩， G 為人車系統之質心(重心)。設車輪受到外力而改變行駛方向而繞 z 軸轉動(進動)，進動角速度為 Ω ，此時產生之陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 的定義為自轉角動量 $\mathbf{H} = I\omega$ 與進動角速度為 Ω 的又積(Cross Product)，即

$$\mathbf{M}_{gr} = \mathbf{H} \times \Omega = I\omega \times \Omega \quad (2)$$

陀螺力矩 M_{gr} 之大小 $M_{gr} = I\omega\Omega \approx I\omega\Omega_r$ ， ω 為前輪繞自轉軸 y 之角速度大小， Ω_r 為把手轉動之角速度大小， $\Omega = \Omega_r \cos \varepsilon$ 為前輪繞 z 軸之角速度大小， ε 為前叉角(張超群 2015、2016)。雖然機車自摔倒地前並未與其它車輛碰撞，但機車騎士遇到前面有狀況，若採取煞車並作左閃或右閃的閃避動作，這時把手轉動就會有 Ω_r 產生。若前輪未鎖住，會有前輪自轉角速度 ω ，進而生成陀螺力矩 M_{gr} 使機車倒地，其倒地方向與機車前部碰撞之倒地方向相同。即機車左閃(把手向左轉動)，機車右倒(左閃右倒)；機車右閃(把手向右轉動)，機車左倒(右閃左倒)(張超群 2015、2016、2022)。例如圖 6(a)之機車左閃時，把手向左轉動，產生的陀螺力矩 M_{gr} 使機車右倒(左閃右倒)。圖 6(b)之機車右閃時，把手向右轉動，產生的陀螺力矩 M_{gr} 使機車左倒(右閃左倒) (張超群 2022)。騎士正常騎乘機車時作左閃或右閃之閃避動作時，通常轉動把手的角速度較慢，把手角速度 Ω_r 小，陀螺力矩 M_{gr} 也較小，機車通常不會倒地。但若遇到緊急狀況而採取閃避動作時，通常騎士會快速轉動把手，把手角速度 Ω_r 大，陀螺力矩 M_{gr} 也較大，機車通常會倒地。

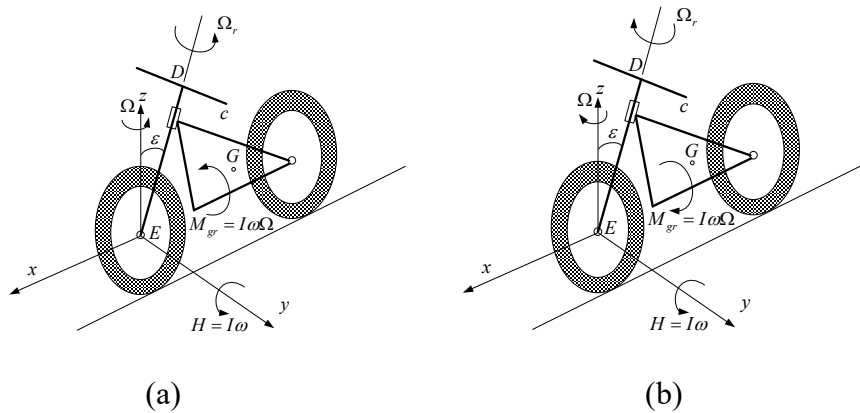


圖 6 機車左右閃避時前輪產生陀螺力矩之示意圖

三、機車自摔倒地方向與刮地痕走向

機車緊急煞車時會有下列四種情況：

(一)前後輪皆未鎖住

此時前輪有轉向能力，但後輪也有側向抓地力。

(二)前輪鎖住，但後輪未鎖住。

此時根據摩擦橢圓理論，後輪仍有側向抓地力，機車不至於側滑。但由於前輪鎖住，地面不能提供轉向力給前輪，若騎士轉動把手，前輪雖轉動了角度，但機車仍會沿原來行駛方向前滑動並轉倒；若騎士未轉動把手，機車仍會沿原來行駛方向前滑行。此外，若直線行駛時車速過快，前輪突然鎖住，由於慣性力的作用機車可能發生後輪提起離地，甚至翻車。

(三)後輪鎖住，但前輪未鎖住。

此時前輪有轉向能力，但後輪鎖住無法獲得側向抓地力，在小的側向力（例如路面不平或機車閃避產生的離心力）作用下，會發生後輪側滑，機車處於不穩狀態。若騎士操控技術良好，機車可能不會倒地；但一般人可能會恐慌並且操控技術沒那麼好，機車會倒地。

(四)前後輪同時鎖住

此時機車會失去轉向能力並轉倒，且後輪會側滑。

因前輪決定機車走向與倒地方向，後輪影響機車是否會側滑，故前輪對自摔的倒地方向與刮地痕走向影響較後輪大，下面依機車左閃或右閃時，前後輪是否鎖住之不同狀況並參考許多監視錄影做分析。

3.1 前後輪皆未鎖住

參考圖 6，若騎士採取煞車並做左閃或右閃之閃避動作時，前後輪都未鎖住。此時因前輪自轉角速度 $\omega \neq 0$ ，會有陀螺力矩 M_{gr} 產生，機車左閃時右倒，如圖 7(a)所示，倒地後機車朝前面偏左滑行，如圖 7(b)所示。機車右閃時左倒，如圖 8(a)所示，倒地後機車朝前面偏右滑行，如圖 8(b)所示。後輪未鎖住，因此機車無側滑。圖 7 和圖 8 中 Z 軸為垂直路面之假想軸，G 為騎士與機車系統之質心(重心)。

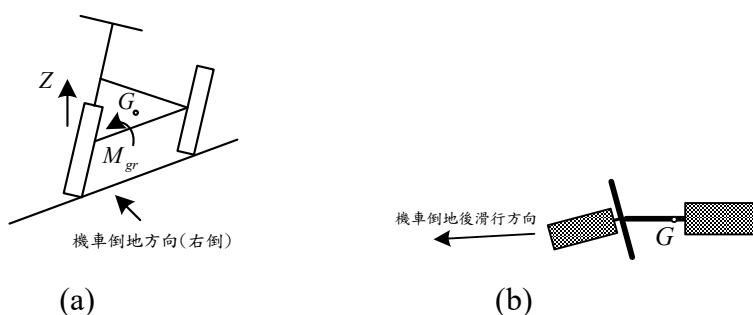


圖 7 機車左閃前後輪未鎖住，機車倒地與滑行方向

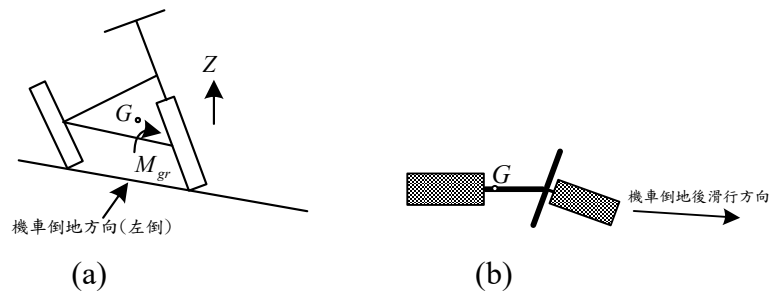


圖 8 機車右閃前後輪未鎖住，機車倒地與滑行方向

3.2 前輪先鎖住，後輪未鎖住

若騎士採取煞車並做左閃或右閃之閃避動作時，前輪先鎖住。此時因前輪自轉角速度 $\omega=0$ ，無陀螺力矩產生。但機車左閃時，機車車身會往左傾斜，這時重力 W 對地面之側傾力矩使機車向左轉倒，如圖 9(a)所示。因為後輪未鎖住，後輪沒有側滑，機車倒地後向前微偏左滑行，如圖 9(b)所示(張超群 2022)。機車右閃時，機車車身會往右傾斜，這時重力 W 對地面之側傾力矩使機車向右轉倒，如圖 10(a)所示。因為後輪未鎖住，後輪沒有側滑，機車倒地後向前微偏右滑行，如圖 10(b)所示(張超群 2022)。

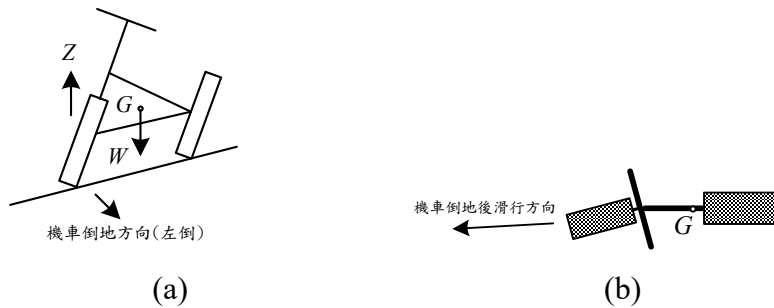


圖 9 機車左閃前輪鎖住，後輪未鎖住，機車倒地與滑行方向

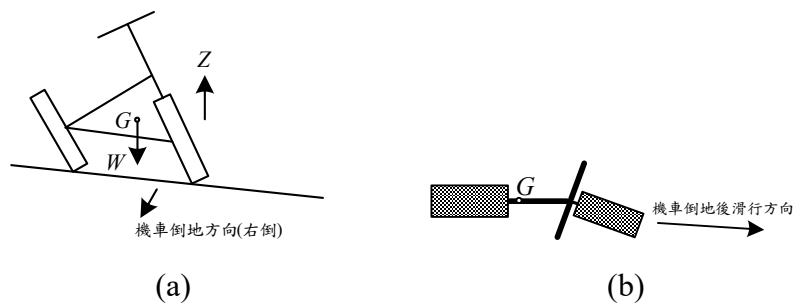


圖 10 機車右閃前輪鎖住，後輪未鎖住，機車倒地與滑行方向

設機車緊急煞車並左閃，前輪鎖住後輪未鎖住時，根據圖 3 之摩擦橢圓理論，後輪在側向仍有抓地力，此時因機車左閃，會有向右的離心力作用在後輪上，若此離心力大於後輪之側向抓地力，則後輪會側滑。若此離心力小於後輪之側向抓地力，則後輪不會側滑。通常機車左閃或右閃的路徑之曲率半徑很大，離心力較小，後輪不會側滑。因此，前輪鎖住，而後輪未鎖住時，機車倒地的滑行方向(刮地痕方向)為往前方稍微偏左或偏右如圖 9(b)和圖 10(b)所示，這是較常見的機車自摔模式。

若後輪未鎖住，後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動，但機車滑動時路面可能不平仍有阻力，車身可能會有小轉動。因此，機車滑動停止時與刮地痕通常會成較小角度，如圖 11(a)所示。若後輪鎖住，後輪側滑，機車倒地後車身會轉動。因此，機車滑動停止時車體與刮地痕通常會成較大角度，如圖 11(b)所示。

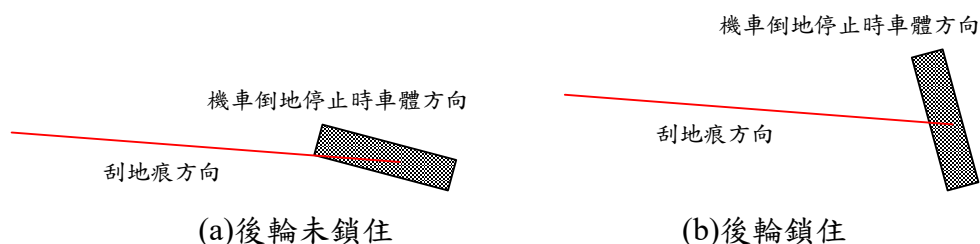


圖 11 機車後輪未鎖住與後輪鎖住，機車倒地滑動停止時車體與刮地痕之角度

3.3 後輪先鎖住，前輪未鎖住

如圖 12 和圖 13 所示，騎士緊急煞車並左閃或右閃，前輪未鎖住而後輪鎖住時，後輪縱向已用掉後輪所有的抓地力。根據圖 3 之摩擦橢圓理論，後輪在側向沒有抓地力，後輪會側滑，並使後輪繞重心 G 轉動。此時機車未必會立刻倒地，若騎士轉動把手試圖修正，因前輪未鎖住，前輪會產生陀螺力矩而使機車倒地。例如圖 12 中，機車左閃後輪鎖住向右側滑，前輪未鎖住則：(a)若騎士向右轉動把手一次機車就倒地，則機車左倒；若騎士向右轉動把手一次，騎士看機車要倒地，馬上又向左轉動把手，則機車右倒；(b)若騎士未轉動把手，則機車左倒；(c)若騎士向左轉動把手，則機車右倒。

類似地，圖 13 中機車右閃後輪鎖住向左側滑，前輪未鎖住，則：(a)若騎士向左轉動把手一次機車就倒地，則機車右倒，若騎士向左轉動把手一次，騎士看機車要倒地，馬上又向右轉動把手，則機車左倒；(b)若騎士未轉動把手，則機車右倒；(c)若騎士向右轉動把手，則機車左倒。

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之操駕行為

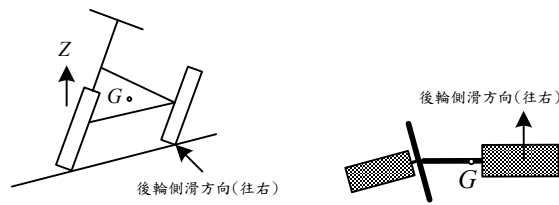


圖 12 機車左閃後輪鎖住，前輪未鎖住，後輪側滑方向

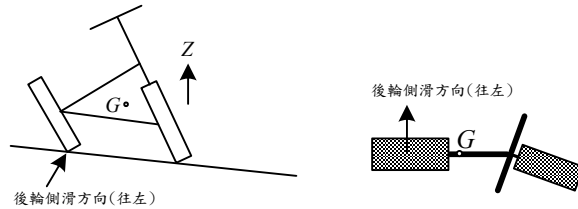


圖 13 機車右閃後輪鎖住，前輪未鎖住，後輪側滑方向

3.4 前後輪同時鎖住

若騎士作左閃或右閃的閃避動作時，前後輪同時鎖住。此時因前輪自轉角速度 $\omega=0$ ，無陀螺力矩產生。但機車左閃時，機車車身會往左傾斜，機車向左轉倒，同時後輪向右側滑，機車朝前方偏左滑行，如圖 14 所示；機車右閃時，機車車身會往右傾斜，機車向右轉倒，同時後輪向左側滑，機車朝前方偏右滑行，如圖 15 所示。前後輪同時鎖住時，因後輪側滑，機車倒地後車體會有較大的轉動，滑動停止時機車與刮地痕通常會成較大角度。

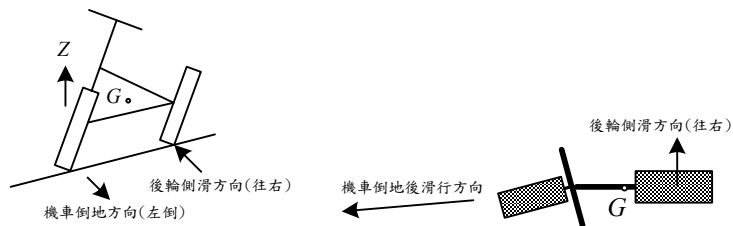


圖 14 機車左閃前後輪同時鎖住，機車滑行與後輪側滑方向

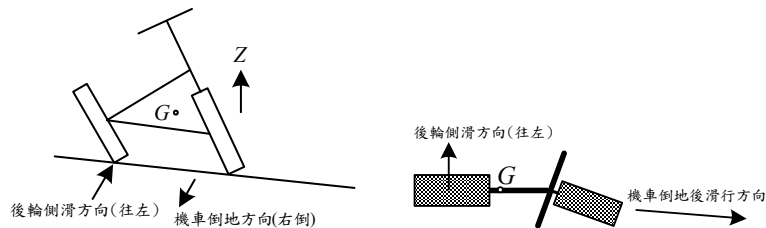


圖 15 機車右閃前後輪同時鎖住，機車滑行與後輪側滑方向

3.5 機車直線行駛車輪鎖住

機車直行時緊急煞車，若前輪鎖住，則無陀螺力矩，機車不會因陀螺力矩而倒地；因機車直行騎士未轉動把手，機車也不會轉倒；若後輪鎖住，因機車直線行駛無側向力，機車不會側滑；若前後輪同時鎖住，機車既不會轉倒，也不會側滑。機車直行緊急煞車自摔的倒地方向與機車重心位置有關。若機車重心偏機車縱向(前後方向)中心線左側，機車左倒；若機車重心偏機車縱向(前後方向)中心線右側，機車右倒。台灣主要的機車為速克達，此種機車因左側傳動系統較右側排氣管重，通常重心會稍微偏前後中心線之左邊。當機車直行時，騎士看到有狀況而未閃避並緊急煞車，車輪鎖住，因重心偏左，在重力作用下機車左倒向前滑行。

3.6 刮地痕走向

機車自摔倒地刮地痕走向依閃避方向決定，左閃時刮地痕朝原來行駛方向之前方偏左；右閃時刮地痕朝原來行駛方向之前方偏右。

表 1 為利用上述各種機車刮地痕走向與倒地方向判斷機車前輪或後輪是否鎖住之簡易表。

表 1 由機車刮地痕與倒地方向判斷機車閃避方向與前後輪是否鎖住

刮地痕走向與倒地方向	閃避方向	前輪	後輪	備註
刮地痕朝前偏左，機車左倒	左閃	鎖住	未鎖住	機車向左轉倒。後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動或轉動很小，機車與刮地痕成較小角度。
			鎖住	機車向左轉倒。後輪側滑，機車倒地後車身會轉動，機車與刮地痕成較大角度。
刮地痕朝前偏左，機車右倒	左閃	未鎖住	未鎖住	後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動或轉動很小，機車與刮地痕成較小角度。
			鎖住	後輪側滑，若騎士試圖修正，向右轉動把手一次機車就倒

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之操駕行為

刮地痕走向與倒地方向	閃避方向	前輪	後輪	備註
				地，則機車左倒；若騎士向右轉動把手一次，騎士看機車要倒地，馬上又向左轉動把手，則機車右倒；若騎士未轉動把手，則機車左倒。
刮地痕朝前偏右，機車左倒	右閃	未鎖住	未鎖住	後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動或轉動很小，機車與刮地痕成較小角度。
			鎖住	後輪側滑，若騎士試圖修正，向左轉動把手一次機車就倒地，則機車右倒；若騎士向左轉動把手一次，騎士看機車要倒地，馬上又向右轉動把手，則機車左倒；若騎士未轉動把手，則機車右倒。
刮地痕朝前偏右，機車右倒	右閃	鎖住	未鎖住	機車向右轉倒。後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動或轉動很小，機車與刮地痕成較小角度。
			鎖住	機車向右轉倒。後輪側滑，機車倒地後車身會轉動，機車與刮地痕成較大角度。
速克達機車刮地痕朝正前方，機車左倒	未閃避	鎖住	未鎖住	若後輪未鎖住，後輪在機車行進方向仍有抓地力，機車往前行，然後因前輪鎖住，不穩而倒地。
			鎖住	因為機車直行，沒有離心力，後輪鎖住，機車不會側滑。速克達機車前輪鎖住，因重心稍微偏左，機車左倒。

四、機車自摔之實際案例分析

機車騎士遇到前方突然出現之車輛、人、動物或落石，通常會緊急煞車並做閃避動作。本節由現場圖之機車刮地痕走向與倒地地方向，分析圖中騎士之操駕行為。

例 1：圖 16 與圖 17 為機車自摔之現場圖，分析圖中騎士之操駕行為。

圖 16 中刮地痕朝前方偏左，根據監視器影像，A 車騎士看到 C 車從右方出現而向左閃避。機車自摔左倒，這是因左閃時把手向左，機車會稍微左傾，重心偏左。機車又緊急煞車，前輪鎖住而無陀螺效應。因重心偏左，在重力作用下機車向左轉倒而向前滑行。因機車車身方向平行刮地痕方向，這表示車身倒地滑行時，車身未轉動，後輪未側滑，因此後輪未鎖住。

圖 17 類似圖 16 之情境，刮地痕朝前方偏左，表示機車 A 左閃。機車左倒代表前輪鎖住，只是機車停止時車身並未平行刮地痕並且機車中心沒位於刮地痕附近，這很可能是機車倒地滑行到要停止前碰到了不平路面而車身稍微有轉動。

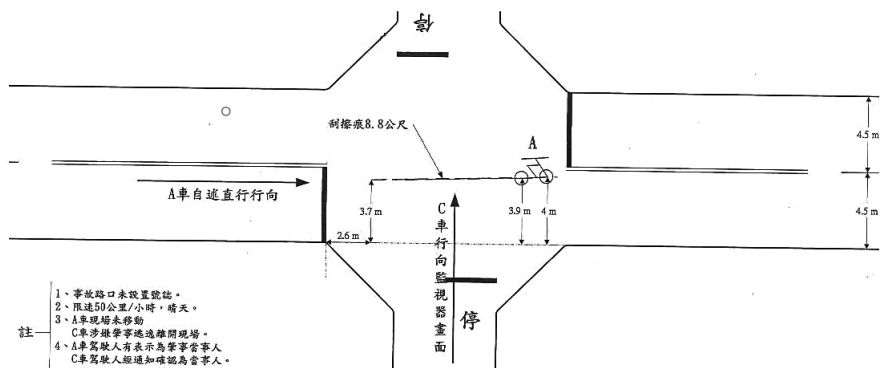


圖 16 A 車閃避 C 車自摔之刮地痕與停止位置圖(張超群 2022)

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之操駕行為

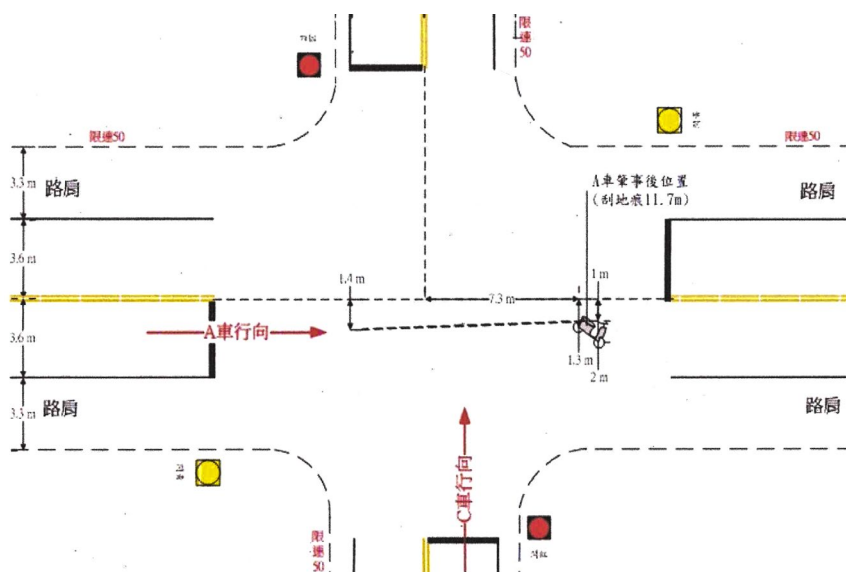


圖 17 機車 A 閃避自摔之現場圖(張超群 2022)

例 2：分析圖 18 和圖 19 中騎士之操駕行為。

根據監視器影像，圖 18 中機車先倒地滑行才撞到行人。圖 18 中刮地痕朝前方偏左，表示機車向左閃避，機車右倒(左閃右倒)代表前輪未鎖住，因此在陀螺力矩的作用下，機車左閃右倒。機車滑行時碰撞到行人，因此機車車身與刮地痕有較大的轉動角度。至於後輪是否鎖住，則不易確定，需檢查後輪是否有側滑痕跡。

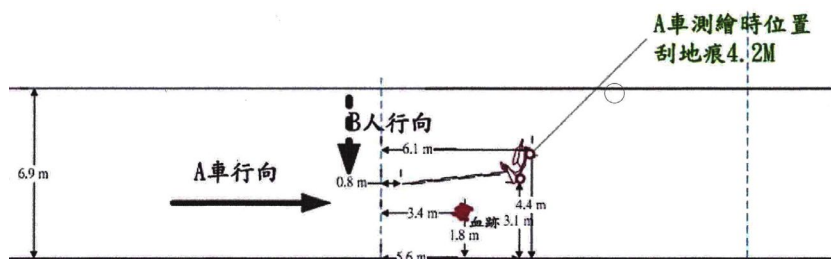


圖 18 行人突然穿越馬路機車自摔之現場圖(張超群 2022)

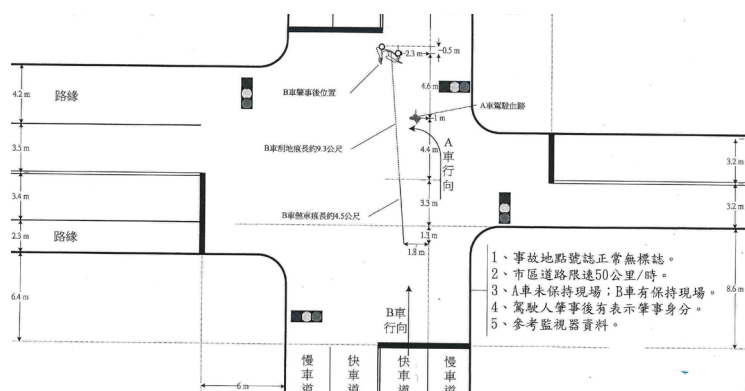


圖 19 A 車左轉 B 車閃避自摔之現場圖(張超群 2022)

圖 19 中刮地痕朝前方偏左，表示機車 B 向左閃避，機車左倒代表前輪鎖住。至於後輪是否鎖住，則因有煞車痕與刮地痕平行，因此後輪無側滑，即後輪未鎖住。機車滑動停止時車體與刮地痕成較大的角度並且自行車有車損，這表示機車倒地時有碰撞到自行車。

例 3：分析圖 20 至圖 22 中騎士之操駕行為。

圖 20 中刮地痕朝前方偏右，表示機車向右閃避，機車右倒(右閃右倒)，因機車倒地後車身與刮地痕的角度較大(近似垂直)，可能有下列兩種情況：

前輪鎖住，機車向右轉倒。若後輪未鎖住，但機車倒地滑行中碰到物體。

機車右閃把手向右，後輪鎖住向左側滑，前輪未鎖住。騎士向左轉動把手試圖修正方向，在陀螺力矩的作用下，機車前輪左轉，機車右倒。因機車倒地後車身與刮地痕的角度較大(近似垂直)，更可確認後輪鎖住。

經參閱照片機車未碰到汽車，因此不是情況(a)。觀看錄影畫面後，圖 20 中機車倒地過程騎士之操駕模式為情況(b)。

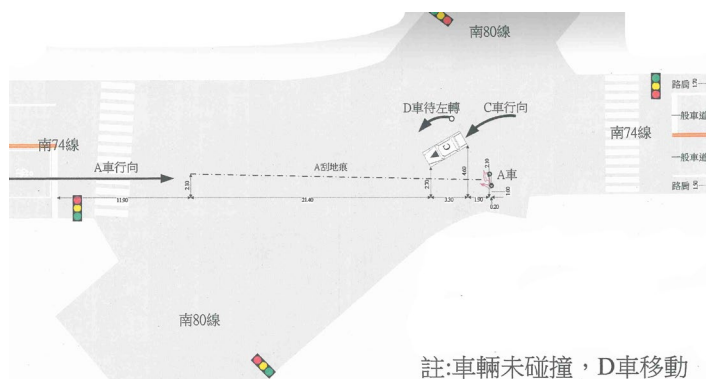


圖 20 機車 A 閃避自摔之刮地痕與倒地位置圖(張超群 2022)

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之操駕行為

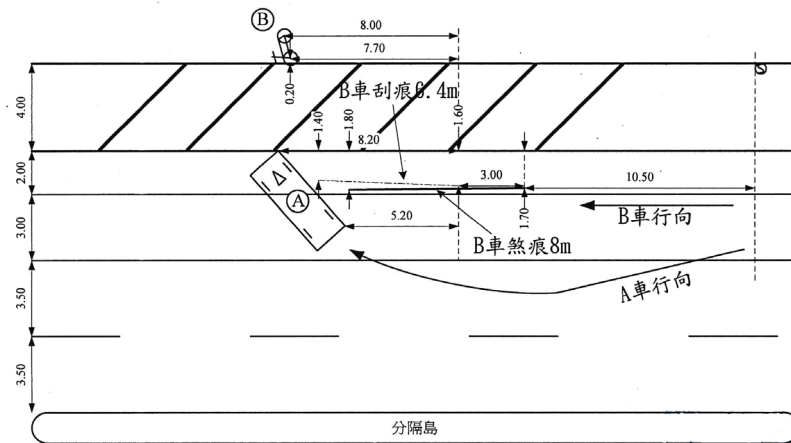


圖 21 汽車 A 右切，機車 B 閃避自摔之現場圖(張超群 2022)

圖 21 中刮地痕朝前方偏右，表示騎士向右閃避並緊急煞車，機車右倒，並有煞車痕與刮地痕同時產生。這表示機車右閃時前輪鎖住，機車向右轉倒，但後輪仍有制動力，機車傾斜滑行時因後輪未完全鎖住，因此後輪未側滑而留下煞車痕，後來機車撞到汽車而彈到停止位置。

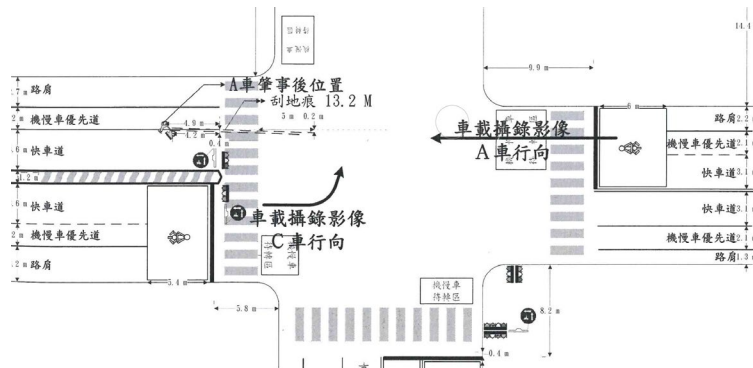


圖 22 C 車左轉，A 車閃避自摔之現場圖(張超群 2022)

圖 22 中刮地痕朝前方偏右，表示騎士看到 C 車左轉而機車向右閃避並緊急煞車，機車左倒(右閃左倒)。這表示機車右閃時前輪未鎖住，機車向右閃避時把手向右轉動，在陀螺力矩作用下，機車左倒。因機車倒地後車身的角度與刮地痕方向角度不是很大。因此，後輪也未鎖住。

例 4：分析圖 23 中騎士之操駕行為。

根據車損照片，機車與汽車有發生碰撞。圖 23 中刮地痕在碰撞點之前，這表示機車先倒地。刮地痕朝前方沒偏斜，表示機車直行未閃避。圖中之機車為速克達，因左側傳動系統較右側排氣管重，通常重心會稍微偏前後方向中心線之左邊。當機車直行時，騎士看到

有狀況未閃避並緊急煞車，車輪鎖住，因重心偏左，在重力作用下機車左倒向前滑行，碰到汽車而停止。因為與汽車碰撞，機車倒地後車身與刮地痕方向呈較大角度。

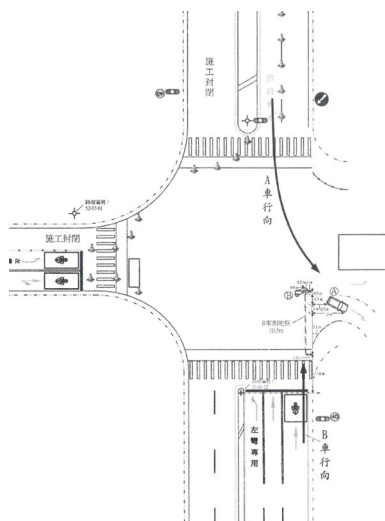


圖 23 直行機車倒地碰撞左轉彎汽車之現場圖

五、如何避免機車自摔

由前面之分析可知要避免機車自摔應盡可能防止車輪鎖住。前輪鎖住會形成轉倒、後輪鎖住會側滑。此外，若前輪未鎖住，快速轉動把手閃避，形成之陀螺力矩也會造成機車倒地。避免機車自摔常採用的方法如下：

(1) 前後煞車的使用與轉動把手之速度

機車煞車系統的設計為前煞車能提供較大的制動力使車快速停止，這是因為煞車時的慣性力造成載荷轉移至前輪。此時可加大前輪抓地力，但需避免急速用力拉前輪煞車拉桿造成載荷轉移未安全到位，抓地力未達到理論最大值時，車輪即鎖住而轉倒或造成後輪提起(離地)，甚至前翻。因此，遇到緊急煞車時，騎士應該先點煞前後輪，避免車輪鎖住，並讓前輪抓地力增大。此外，平時也應注意輪胎之胎紋是否太淺，若胎紋深度低於胎面磨耗指示點，則需更換輪胎。

此外應避免快速轉動把手閃避，這樣若車輪鎖住，機車會轉倒；若車輪未鎖住，機車仍會因陀螺力矩而倒地。但人在緊張狀態，不容易做到慢速轉動把手。

(2)採用防鎖死煞車系統

避免機車緊急煞車自摔之方法最好是機車有防鎖死煞車系統 ABS。ABS 能夠在緊急制動中防止車輪完全鎖住，並控制車輪的滑動率在 15%~20%之間，以獲得最大的縱向和側向抓地力，防止機車的側滑失控，並縮短煞車距離。

因為機車只有前後兩個車輪，機車 ABS 和汽車 ABS 的要求重點不同。汽車 ABS 在制動過程中可讓駕駛員保有操控性，閃避前方的障礙物；而機車 ABS 最重要的功能就是獲得良好的制動穩定性，防止摔車和翻車，並縮短制動距離。機車前輪 ABS 的設計至為重要，其原因為若前輪鎖住，機車很容易翻車或摔車，對乘員是非常危險的。ABS 工作時一鬆一放的特殊手感，可能會造成一些騎士的緊張甚至驚嚇，而不由自主地放開煞車反而造成危險。因此，機車的 ABS 要做到非常細緻，讓騎士不致因 ABS 工作反而慌張。通常，機車 ABS 前後煞車的迴路是獨立（分開）的，需要用到把手拉桿及腳踏來控制前後輪的煞車。

須注意的是，機車 ABS 的功能是有限制的。若機車在彎道行駛的向心加速度較小(因而離心力較小)時，根據摩擦橢圓理論，機車 ABS 只要降低很小的制動性能，就可以獲得較大範圍的穩定性。但是，若騎士在彎道作劇烈操駕使得向心加速度變大(因而離心力較大)時，則機車彎道行駛的穩定性會降低，有 ABS 的機車也可能會失控。

因為機車使用 ABS 時車輪不會鎖住，車輪仍有轉動，因此若閃避時快速轉動把手，產生之陀螺力矩仍會使機車倒地。因此，騎乘有 ABS 之機車，遇到突然出現之車輛、人、動物時，應直接用力使用煞車，若因距離太近，無法煞停時再閃避，閃避時不要快速轉動把手。

(3)使用連動煞車系統

由於 ABS 費用較高，為了降低成本有些車廠採用連動煞車系統 CBS，它是只用後煞車時，同時會連動前輪的煞車系統。CBS 預先設定了合理的前後制動力分配，可以降低制動時前後輪之間的運動差異，減少車輪鎖住的機會，增加行駛穩定性。但 CBS 的前後制動力分配比例可能不適合所有路況。因此，如經費許可，應盡可能購買有 ABS 的機車。

六、結論

本文應用車輪制動時的滑動率、輪胎的摩擦橢圓、機車前輪之陀螺力矩，以簡單易懂的力學，分析機車自摔時之倒地方向和刮地痕走向。由此得到機車自摔倒地方向，主要由閃避方向和前輪是否鎖死或稱鎖住決定。

藉此我們得到利用機車自摔之刮地痕走向與倒地方向判斷騎士之操駕行為的簡易方法。即先由自摔之刮地痕走向可快速判斷騎士之閃避方向：若刮地痕朝前方偏左，代表機車左閃；若刮地痕朝前方偏右，表示機車右閃。再用機車自摔倒地方向判斷前輪是否鎖住，若機車倒地方向與閃避方向相同(左閃左倒或右閃右倒)，則通常表示機車前輪先鎖住；若機車倒地方向與閃避方向相反(左閃右倒或右閃左倒)，則表示機車前輪未鎖住。若後輪未鎖住，後輪未側滑，機車倒地後車身不轉動，但機車滑動時路面可能不平仍有阻力，車身可能小轉動。因此，機車倒地停止時與刮地痕通常會成較小角度。

機車後輪鎖住，後輪會側滑，此時若前輪未鎖住，騎士仍可操控把手轉向。但一般人在轉向過程中仍會因前輪產生之陀螺力矩而摔車，此時機車倒地後車身會轉動，因此機車滑動停止時車身方向通常與刮地痕成較大角度。台灣主要機車為速克達，其重心偏車身前後中心線左邊，若速克達機車直線行駛時，因緊急煞車而自摔，機車左倒。我們製作一個由機車刮地痕與倒地方向判斷機車閃避方向與前後輪是否鎖住之表，方便參考使用。本文用多個實際案例之現場圖，分析機車自摔時騎士之操駕行為，簡單易懂，可供交通警察或車輛行車事故鑑定會委員參考。最後我們也簡介防鎖死煞車系統 ABS 與連動煞車系統 CBS 之工作原理，說明避免自摔之常用方法，建議購買有 ABS 之機車，較不會發生自摔。

致謝

感謝臺南市車輛行車事故鑑定會提供會議案件作為本文之案例。

參考文獻

- 林志儒(2005)，機車事故之電腦模擬，臺灣科技大學機械工程系碩士論文。
- 林峻弘(2009)，機車事故鑑定之行車速度推估研究，龍華科技大學工程技術研究所碩士論文。
- 施人維(2012)，汽機車同向碰撞行車事故之模擬，臺灣科技大學機械工程系碩士論文。
- 張超群(2015)，「機車倒地方向的力學分析及其在行車事故鑑定之應用」，交通學報，第十五卷第二期，頁 191-224。

應用機車自摔刮地痕走向與倒地方向分析騎士之操駕行為

張超群(2016),「機車碰撞倒地方向的簡易判斷方法和其在行車事故鑑定之應用」,105年道路交通安全與執法研討會。

張超群(2020),「應用機車刮地痕輔以倒地方向推估可能的碰撞前行向」,交通學報,第二十卷,頁1-38。

張超群(2021),「應用刮地痕快速判斷兩部同向行駛機車碰撞前行向之簡易方法」,110年道路交通安全與執法研討會。

張超群(2022),「由機車自摔刮地痕與倒地方向分析騎士之操控行為」,111年道路交通安全與執法研討會。

張超群、劉成群(2019),摩托車動力學,二版,臺北:五南圖書出版公司。
臺南市車輛行車事故鑑定會會議案件。

Cossalter, V. (2006), *Motorcycle Dynamics*, 2nd ed., Morrisville NC: LuLu Press.

Masory, O., Bartlett, W. and Wright B. (2012), "Motorcycle Accident Reconstruction, Part 1-Physical Models", 2012 Florida Conference on Recent Advances in Robotics.

Obenski, K. S. and Hill, P. F. (2002), *Motorcycle Accident Reconstruction and Litigation*, 3rd ed., Tucson, AZ: Lawyers & Judges Publishing Company.

Rivers, R. W. (2006), *Evidence in Traffic Crash Investigation and Reconstruction*, Springfield: Charles C Thomas Publisher.

Rose, N. A. and Neale, W. T. C. (2018), *Motorcycle Accident Reconstruction*, Wallendle: SAE International.

Wong, J. Y. (1993), *Theory of Ground Vehicle*, John Wiley & Sons: New York.

(收稿 111/10/07, 第一次修改 112/05/31, 接受 112/07/01, 定稿 112/08/10)

