

由機車自摔刮地痕與倒地方向分析騎士 之操控行為

張超群 Chau-Chin Chang¹

摘要

在車輛行車事故鑑定時，許多案件有機車自摔倒地之現象。這是因為機車騎士遇到突發狀況而緊急煞車並作左閃或右閃之閃避動作，此時機車可能因前輪先鎖死或後輪先鎖死或兩輪同時鎖死，形成各種機車刮地痕走向與倒地方向。本文應用簡單的力學原理，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。在行車事故鑑定時就可利用這自摔之刮地痕走向與倒地方向，反推騎士之駕駛行為，作為肇事責任之參考。並可利用這些分析，提出避免機車自摔之機車設計與騎士駕駛行為。

關鍵字：機車自摔、左閃或右閃、前後輪鎖死、刮地痕、倒地方向

一、前言

國內外對機車碰撞力學之研究主要是利用動量法或軸距長度改變法，求碰撞車速(林志儒，2005；林峻弘，2009；施人維，2012；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)。

在作車輛行車事故鑑定時，經常有機車自摔現象發生，主要原因是台灣機汽車數量龐大，許多騎士常因直行時左前方視線被擋住而對向汽車左轉，或因路邊車輛起駛，或因路口右邊車輛突然衝出，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。對機車自摔原因之研究並不多，只知道車輪鎖死，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。本文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，分析機車自摔時之倒地方向和刮地痕走向。本文也簡介防鎖死煞車系統 ABS 與連動煞車系統 CBS 之工作原理，得到最好之防止自摔方法，就是購買有 ABS 之機車。我們用許多實際案例之現場圖說明機車自摔時騎士之操控行為，簡單易懂，可供交通警察或車輛行車事故鑑定會委員參考。

¹ 南臺科技大學機械工程系副教授。

二、基本理論

2.1 滑動率

車輪的制動力和穩定性，與滑動率(slip ratio)有很大的關係。所謂的滑動率是指制動過程中，輪胎滑動的比例。因為輪胎並不是真正的剛體，輪胎運動時可能做純滾動、邊滾動邊滑動或完全滑動。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，若車輪完全鎖死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這個參數來定義車輪的滑動比率，其定義為

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

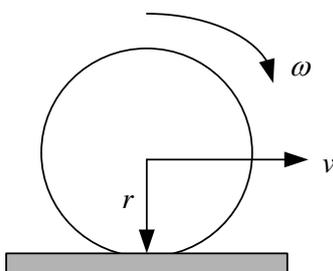


圖 1 車輪的滑動率

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，車輪角速度逐漸減小，滑動率也隨之增加，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完全鎖死時，車輪沒轉動， $\omega = 0$ ，此時滑動率 $s = 100\%$ ，車輪完全滑動。

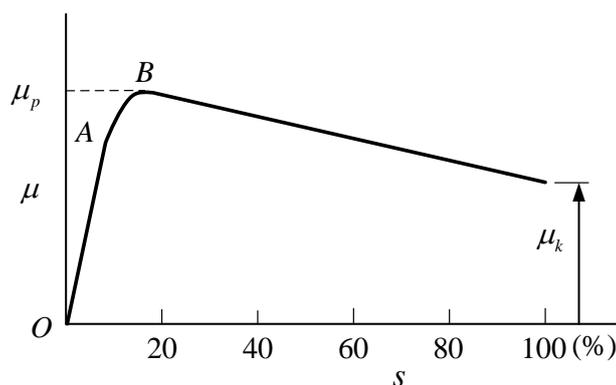


圖 2 摩擦係數與滑動率

輪胎的摩擦係數與滑動率之間的關係可用圖 2 描述(張超群、劉成群，2019)。

從圖 2 中可知滑動率在 15% ~ 20% 左右時摩擦係數有最大值 μ_p 稱為峰值摩擦係數；而滑動率 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(抓地力)，其大小與路面摩擦係數成正比。因此制動附著力也隨滑動率而變。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(Anti-lock Brake System) ABS 就是要將滑動率控制在 15% ~ 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死，機車若車輪鎖死會失去穩定性而失控自摔。

2.2 輪胎摩擦橢圓

如圖 3(a)所示，輪胎滾動的方向(即前後 x 方向)稱為縱向，輪胎的左右 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) (張超群、劉成群，2019)，如圖 2(b)所示。

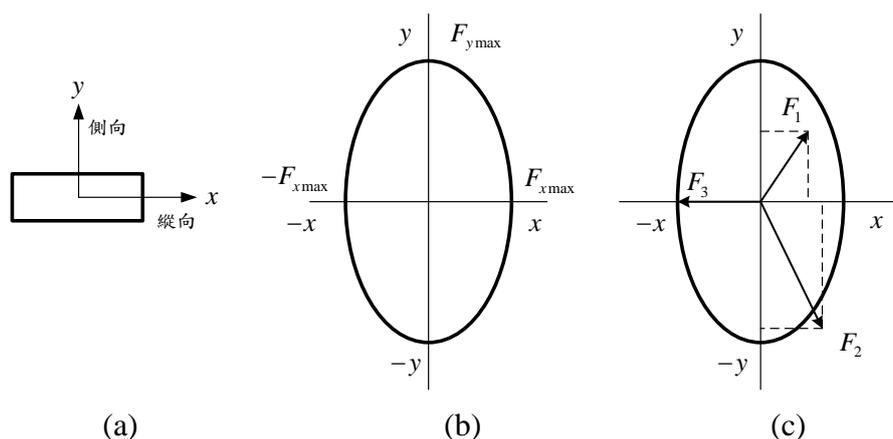


圖 3 摩擦橢圓和穩定性

摩擦橢圓的邊界代表輪胎在各種不同方向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(例如圖 3(c)中之力 F_1)，表示輪胎能提供足夠的抓地力，因此機車是穩定的；若合力位於附著橢圓之外(例如圖 3(c)中之力 F_2)，表示輪胎無法提供這麼多的抓地力，因此機車會失控。若機車緊急煞車車輪鎖死，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)，機車就會側滑。

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。

三、機車自摔倒地方向與刮地痕走向

為了判斷機車倒地方向，本文將機車視為由兩大部件組成，即前部與後部。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。圖 4 為機車前部與後部之示意圖(張超群，2015、2016)。

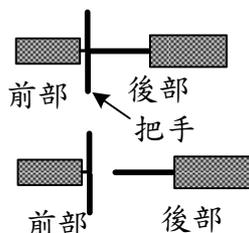


圖 4 機車前部與後部之示意圖

機車制動時可能產生下列三種極限情況：

- 1.前輪鎖死 (Lock up)，但後輪未鎖死。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。但由於前輪鎖死，地面不能提供轉向力，轉動把手，前輪轉了角度，但機車仍會向前滑動並轉倒。此外，若直線行駛時車速過快，前輪突然鎖死，由於慣性力的作用機車可能發生後輪提起離地，甚至翻車。
- 2.後輪先鎖死。此時前輪有轉向能力，但後輪鎖死無法獲得側向抓地力，此時在小的側向力作用下，會發生後輪側滑，機車處於不穩狀態。
- 3.前後輪同時鎖死。此時機車會失去轉向能力並容易轉倒，且後輪易側滑。

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，下面依前後輪是否鎖死做較詳細的分析。

3.1 前後輪未鎖死或鎖死

下面依機車左閃或右閃時，前後輪是否鎖死之不同狀況並參考許多監視錄影做分析。

3.1.1 前後輪皆未鎖死

參考圖 5，機車前部碰撞的倒地方向由陀螺力矩(Gyroscopic moment)決定。陀螺力矩之大小 $M_{gr} = I\omega\Omega \approx I\omega\Omega_r$ ，式中 I 為車輪繞自轉軸 y 的慣性矩， 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他車輛碰撞，但機車騎士遇到前面有狀況，若採取煞車並左閃或右閃的閃避動作，這時把手轉動就會有 Ω_r 產生。若前輪未鎖死，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類似。即機車左閃(把手向左轉動)，機車右倒(左轉右倒)；機車右閃(把手向右轉動)，機車左倒(右轉左倒)(張超群 2015、2016)。例如圖 5 之機車右閃時，把手向右轉

動，機車左倒(右轉左倒)。

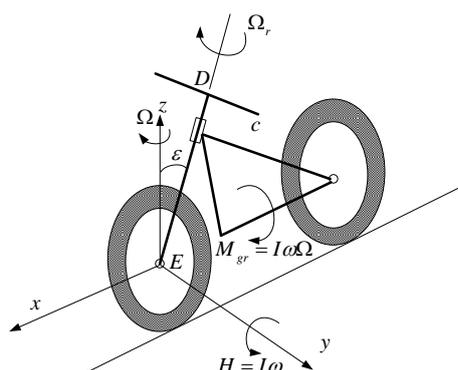


圖 5 機車前部之陀螺力矩產生示意圖

3.1.2 前輪先鎖死，後輪未鎖死

若騎士採取煞車並做左閃或右閃之閃避動作時，前輪先鎖死。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；機車右閃時，機車車身會往右傾斜，機車向右轉倒。



圖 6 機車左閃與右閃前輪鎖死，後輪未鎖死，機車滑行方向

設機車緊急煞車並左閃，前輪鎖死後輪未鎖死時，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。通常機車左右閃的弧度不是很大，離心力較小，後輪不會側滑。因此，前輪鎖死，而後輪未鎖死時，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 6 所示，這是較常見的機車自摔模式。

3.1.3 後輪先鎖死，前輪未鎖死

如圖 7 所示，騎士緊急煞車並左閃或右閃，前輪未鎖死而後輪鎖死時，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，這時就看騎士的反應了，若騎士轉動把手試圖修正，因前輪未鎖死，前輪會產生陀螺力矩而使機車倒地。例如圖 7(a)中，機車左閃後輪鎖死向右側滑，前輪未鎖死，若騎士向右轉動把手試圖修正，則機車左倒；若騎士未轉動把手，則機車右倒。類似地，圖 7(b)中，機車右閃後輪鎖死向左側滑，前輪未鎖死，若騎士向左轉動把手，則機車右倒；若騎士未轉動把手，則機車左倒。

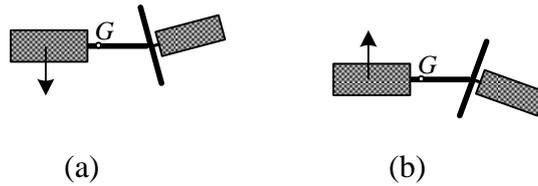


圖 7 機車左閃與右閃後輪鎖死，前輪未鎖死，後輪側滑方向

3.1.4 前後輪同時鎖死

若騎士左閃或右閃的閃避動作時，前後輪同時鎖死。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 8(a)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 8(b)所示。前後輪同時鎖死時，因後輪側滑，機車倒地後車體會有較大的轉動。通常機車前後輪同時鎖死之機率較低。

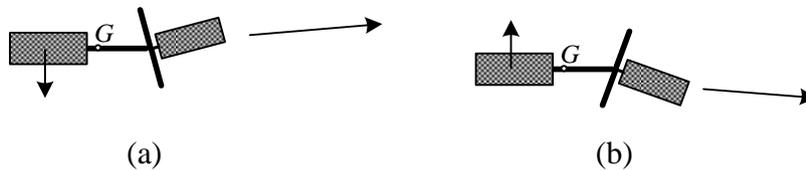


圖 8 機車左閃與右閃前後輪同時鎖死，機車滑行與後輪側滑方向

3.2 機車直線行駛車輪鎖死

機車直行時，因緊急煞車而自摔。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，車輪鎖死，因重心偏左，在重力作用下機車左倒向前滑行。

3.3 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。

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，分析圖中騎士之操控行為。

例 1：圖 9 與圖 10 為機車自摔之現場圖，分析圖中騎士之操控行為

圖 9 中刮地痕朝前方偏左，因此騎士可能看到 C 車從右方出現而作左閃。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，前輪鎖死而無陀螺效應。因重心偏左，在重力作用下機車左倒向前滑行。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，因此後輪未鎖死，後輪未側滑。

圖 10 類似圖 9 之情境，刮地痕朝前方偏左，表示機車左閃。機車左倒代表前輪鎖死，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，這很可能是後輪未鎖死，但機車倒地滑行到要停止前可能碰到了不平路面而車身稍微有轉動。

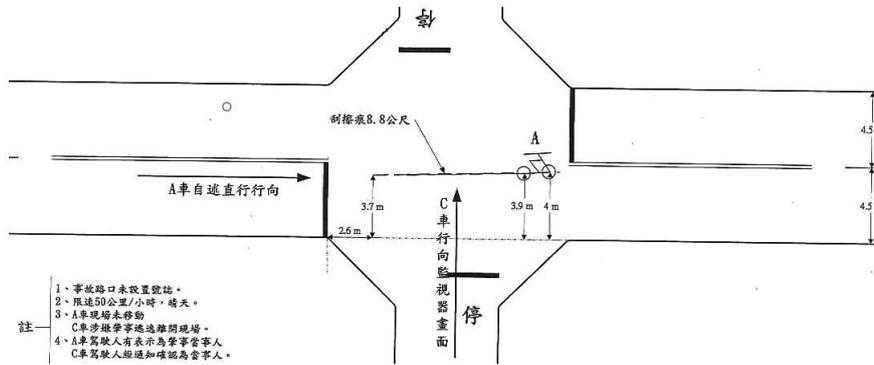


圖 9 例 1 之自摔現場圖

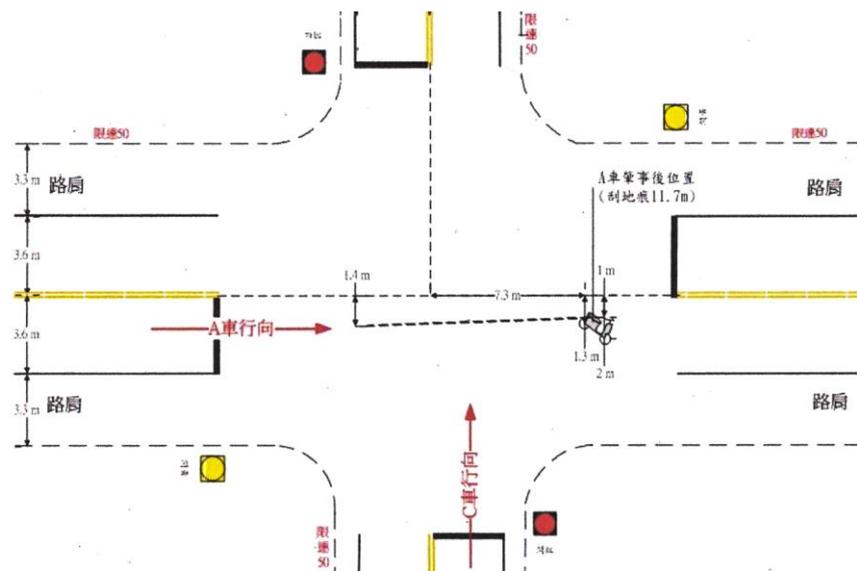


圖 10 例 1 之自摔現場圖

例 2：分析圖 11 和圖 12 中騎士之操控行為

根據監視器影像，圖 11 中機車先倒地滑行才撞到行人。圖 11 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)代表前輪未鎖死，因此在陀螺力矩的作用下，機車左閃右倒。地上有血跡表示機車碰撞到行人，因此機車車身與刮地痕有較大的轉動角度。至於後輪是否鎖死，則不易確定，需檢查後輪是否有側滑痕跡。

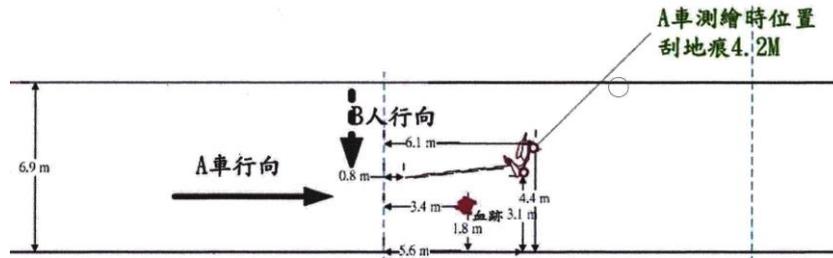


圖 11 例 2 之自摔現場圖

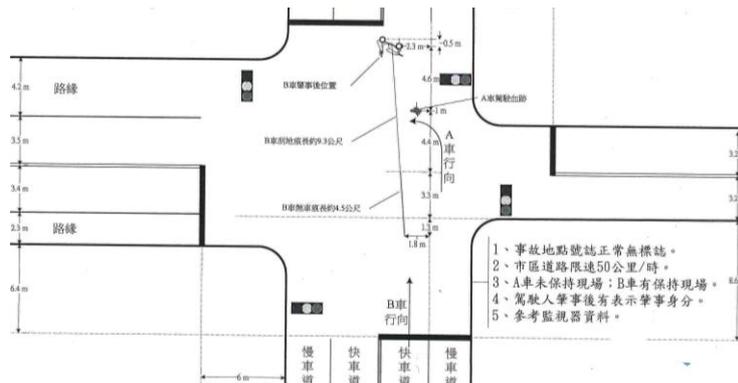


圖 12 例 2 之自摔現場圖

圖 12 中刮地痕朝前方偏左，表示機車向左閃避，機車左倒代表前輪鎖死。至於後輪是否鎖死，則因有煞車痕與刮地痕平行，因此後輪無側滑，即後輪未鎖死。地上有血跡表示機車倒地滑行時有碰撞到自行車，因此機車車身與刮地痕有較大的轉動角度。

例 3：分析圖 13 至圖 15 中騎士之操控行為

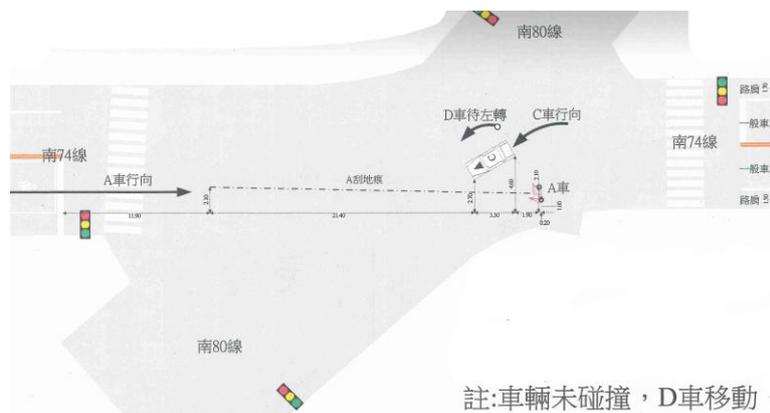


圖 13 例 3 之自摔現場圖

圖 13 中刮地痕朝前方偏右，表示騎士看到 C 車或 D 車有動而機車向右閃避，機車右倒(右閃右倒)，可能有下列兩種情況：

1. 若前輪鎖死，則機車向右轉倒。
2. 機車右閃把手向右，後輪鎖死向左側滑，前輪未鎖死，如圖 7(b)所示。騎士向左轉動把手試圖修正方向，因此在陀螺力矩的作用下，機車前輪左轉右倒。因機車倒地後車身的角度與滑行方向較大(近似垂直)，後輪可能鎖死。

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，其原因為若前輪鎖死，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，需要用到手把拉桿及腳踏板來控制前後輪的煞車。

須注意的是，機車 ABS 的功能是有其極限的。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。

2.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 (Combined Brake System) 簡稱 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，減少車輪鎖死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。

3.前後煞車的使用

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把手造成載荷轉移未安全到位，抓地力未達到理論最大值時，車輪即鎖死而打滑或造成後輪提起（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，避免車輪鎖死，並讓前輪抓地力增大，一旦足夠的抓地力轉換至前輪後，就可以用力煞緊前後車輪。此外，平時也應注意輪胎之胎紋是否深度夠，才能有較大地抓地力。

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，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控行為的簡易方法。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死，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死；若機車倒地方向與閃避方向相反(左閃右倒或右閃左倒)表示機車前輪未鎖死。

機車後輪鎖死機車會側滑，此時若前輪未鎖死，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，此時機車車體倒地後會轉動，因此車體方向通常與刮地痕成較大角度。機車前後輪同時鎖死時，因後輪側滑，機車倒地後會車體會有較大的轉動。台灣主要機車為速克達，其重心偏中心線左邊，若速克達機車直線行駛時，因緊急煞車而自摔，機車左倒。本文用

許多實際案例之現場圖說明機車自摔時騎士之操控行為，簡單易懂，可供交通警察或車輛行車事故鑑定會委員參考。我們也說明避免自摔之常用方法，其中最佳方法為購買有 ABS 之機車。

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。
- 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、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。
- 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.

