

# L'utilizzo degli smartphone nella rilevazione della decelerazione degli autoveicoli

Alfonso Micucci – Mattia Strangi  
Università degli Studi Bologna

## 1. Premessa

Uno dei quesiti principali posti all'analista ricostruttore cinematico è di risalire alla velocità iniziale di un autoveicolo il cui conducente, per evitare un improvviso pericolo, attui una frenatura d'emergenza a fondo, arrestandosi al termine della stessa.

Come noto, in tale scenario, tra avvistamento dell'incipiente pericolo e raggiungimento della massima efficienza della frenatura posta in essere, che nei veicoli delle precedenti generazioni era palesata dalla frequente insorgenza di una o più tracce gommose di frenatura radente, intercorre un certo tempo psicotecnico, dato dalla somma del tempo di percezione e reazione del conducente  $t_{pr}$  e del tempo tecnico di attivazione dell'impianto frenante  $t_t$ .

Il primo addendo  $t_{pr}$  decorre dalla visione del pericolo e fino all'inizio dello schiacciamento del pedale del freno. Durante questo l'efficienza della frenatura è nulla non essendosi ancora avuto azionamento dell'impianto, ma l'autovettura manifesta già una prima limitata decelerazione  $d$ , data dal freno motore e dalle resistenze al moto  $R$  (aerodinamica, resistenza al rotolamento, resistenza in curva ed effetto dell'eventuale pendenza della strada).

Il secondo addendo  $t_t$  decorre dalla pressione sul pedale, che convenzionalmente si fa corrispondere con l'accensione delle luci di arresto, e fino al raggiungimento della massima decelerazione. In tale fase si ha lo schiacciamento della leva verso il fine corsa e, conseguentemente, la ripresa dei giochi nella catena di azionamento ed il progressivo incremento della forza frenante  $H$  sviluppata dall'impianto, con analogo progressivo incremento dell'efficienza della frenatura  $e$ , essendo questa definitiva come rapporto tra forza frenante scambiata nell'orma di contatto pneumatici-suolo e forza peso  $P$ :

$$e = \frac{H}{P}.$$

Lo sviluppo della forza frenante comporta un incremento della decelerazione  $d$ , secondo la seguente relazione:

$$d = \frac{e P + R}{m(1 + \mu)};$$

dove  $m$  è la massa gravitazionale contingente dell' autovettura e  $\mu$  è un parametro che tiene conto della presenza, all'interno del mezzo, di masse rotanti con moto derivato da quello di avanzamento (essenzialmente ruote, ingranaggi della trasmissione, giunti, volano, albero motore).

Di norma, nella pratica professionale per semplicità si considerano trascurabili sia  $R$  che  $\mu$ . Essendo poi  $P = m \cdot g$ , si può scrivere che:

$$d = e \cdot g;$$

dove  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità.

Durante il tempo tecnico  $t_t$ , si può assumere, sempre nell'ottica della semplificazione ed in linea con le emergenze sperimentali, che la decelerazione cresca linearmente da zero fino al valore massimo  $d_m$ , il quale viene raggiunto nell'ambito di uno spazio:

$$S = v \cdot t_t - \frac{1}{4} d_m \cdot t_t^2;$$

dove  $v$  è la velocità all'inizio della frenatura. Se successivamente si manifestano tracce gommose di frenatura radente, lo spazio indicato assume la comune denominazione di 'frenatura pre-tracciante'.

La fase successiva al raggiungimento della massima decelerazione  $d_m$  si differenzia in funzione dell'allestimento o meno dell' autovettura con dispositivo ABS.

## 2. L'impiego degli smartphone

La determinazione della decelerazione alla massima efficienza è un presupposto fondamentale per la corretta stima della velocità iniziale dell'autovettura.

Tale valore, che dipende da una serie di fattori tra cui natura e stato degli elementi a contatto (pneumatici ed asfalto), temperatura, nonché tipologia di impianto di azionamento, può essere desunto dalle tabelle presenti in letteratura, oppure rilevato direttamente sul campo.

La prima modalità è senz'altro di più celere attuazione. Essa, tuttavia, comporta problematiche di approssimazione e di natura giuridica. La seconda modalità è senz'altro preferibile, in particolare laddove sia possibile utilizzare lo stesso veicolo nello stesso luogo, ma richiede l'impiego di una serie di strumenti, tra cui un accelerometro, da installare a bordo del veicolo. Al riguardo, la crescente diffusione degli smartphone consente di ridurre notevolmente la complessità operativa, rendendo il rilievo sperimentale della decelerazione alla portata di qualunque consulente.

Pressoché in tutti gli smartphone di ultima generazione, infatti, sono integrati di accelerometri, in origine concepiti per applicazioni di tipo ludico.

L'accelerometro che equipaggia lo smartphone di maggiore diffusione è un dispositivo inerziale prodotto da STMicroelectronics (cfr. fig. 1), operante con una frequenza di campionamento di 100 Hz. Esso è inserito all'interno di microchip appartenente alla famiglia dei MEMS (Micro Electromechanical Systems). La parte meccanica è una massa inerziale, sospesa da "molle" microscopiche. Muovendo il corpo dell'accelerometro nello spazio, la massa si muove al suo interno allungando e comprimendo, in maniera lineare, le molle che la tengono sospesa. Attraverso opportune applicazioni, è possibile visualizzare e registrare l'andamento dei corrispondenti segnali riportati dal processore.



Figura 1: Il dispositivo accelerometrico disposto all'interno dello smartphone.

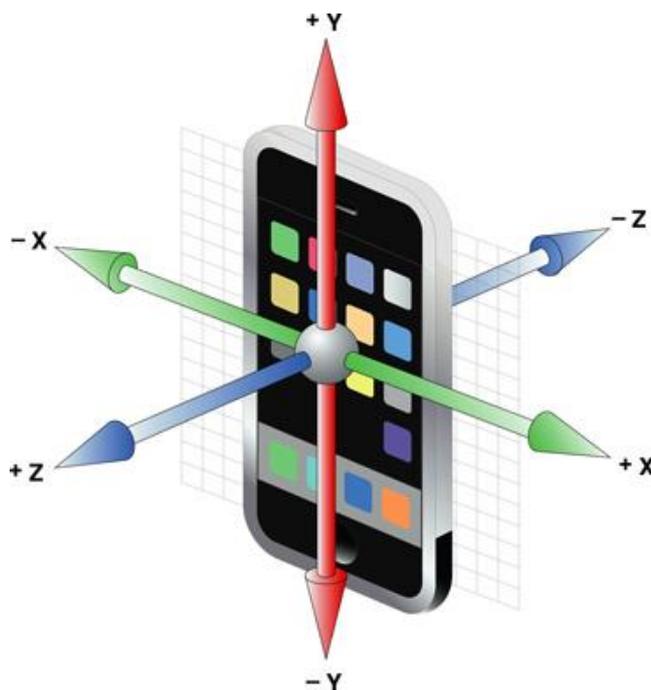


Figura 2: L'accelerometro misura l'accelerazione riscontrata sui 3 assi di riferimento in funzione del tempo.

Il primo passo da compiere per procedere con la rilevazione dell'accelerazione a bordo di un veicolo è quello di rendere il dispositivo solidale all'abitacolo per mezzo di un opportuno supporto, in maniera tale da avere l'asse Y circa allineato all'asse longitudinale del mezzo e l'asse Z in verticale (cfr. fig. 2). Successivamente è opportuno effettuare una calibrazione, procedimento che modifica l'orientamento della terna di riferimento in maniera tale che l'accelerazione gravitazionale rilevata in condizioni statiche risulti unicamente lungo l'asse Z (ovvero  $a_z = -1 g$ ) e di conseguenza l'asse Y risulti disposto sul piano parallelo all'asse longitudinale del dispositivo.

Durante l'esecuzione delle prove di frenata si manifesta una inclinazione in avanti dell'abitacolo, che comporta una indesiderata rotazione in avanti della terna di assi, il cui effetto è quello di portare ad una riduzione del valore rilevato lungo l'asse Y di interesse, di entità comunque marginale. Si supponga, infatti, di sviluppare una decelerazione  $a_y = -8 g$ . Una inclinazione in avanti di  $5^\circ$  dell'abitacolo, e di conseguenza dello smartphone, comporta che il valore rilevato lungo l'asse y risulta:

$$a'_y = (-8 \cos 5^\circ + 1 \sin 5^\circ) g = -7,88 g,$$

con un tasso di errore di circa il 2%.

A tale problematica deve aggiungersi che il valore di accelerazione rilevato dallo smartphone è dato dalla somma della reale accelerazione dovuta al moto proprio del veicolo  $a_{y,p}$  con il rumore  $a_{y,r}$  dovuto alle vibrazioni indotte dalla irregolarità del profilo del suolo, a quelle generate dal

motore, a quelle dell'abitacolo ed alle oscillazione delle molle di sostegno della massa inerziale di cui si è detto (cfr. fig. 4).

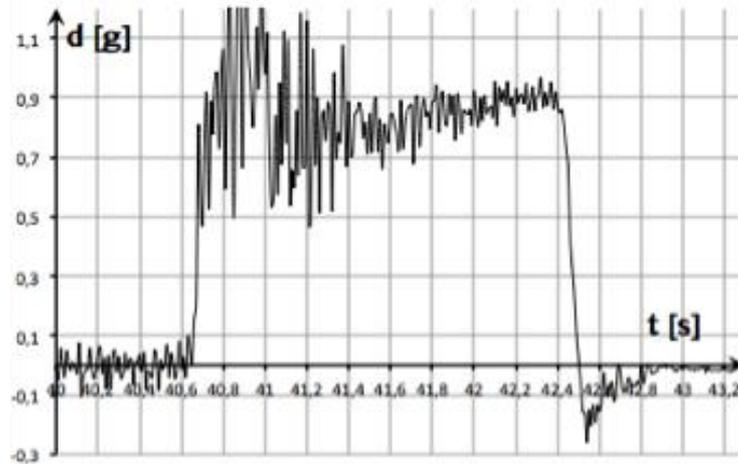


Figura 3: Grafico della decelerazione 'grezza' misurata lungo l'asse Y.

Al riguardo, si osserva che la componente di rumore  $a_{y,r}$  indicata non induce traslazione fisica del veicolo lungo l'asse Y. Di conseguenza, effettuando una sua integrazione in un tempo più o meno ampio, deve ottenersi un valore nullo, il che comporta che il valore medio dell'accelerazione stessa deve essere nullo:

$$a_{y,r,m} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{y,r} \cdot dt = 0,$$

ovvero che il valore medio del dato rilevato in un determinato intervallo è corrispondente al valore medio della sola componente di accelerazione connessa al moto proprio del veicolo;

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (a_{y,p} + a_{y,r}) \cdot dt = a_{y,p,m}.$$

Alla luce di quanto esposto, appare chiaro che la componente di rumore  $a_{y,r}$  è eliminabile con la tecnica della media mobile. Operativamente, i diversi tentativi effettuati hanno mostrato che l'ampiezza ottimale dell'intervallo mobile che porta ad un sufficiente filtraggio del rumore senza perdita di significatività del valore residuo, è di 10 campioni (cfr. fig. 4).

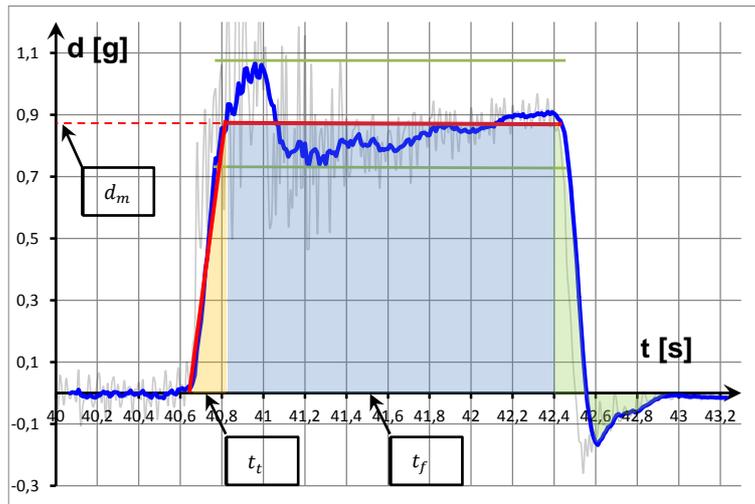


Figura 4: Grafico della decelerazione misurata lungo l'asse Y, opportunamente filtrata con media mobile di 10 campioni.

Ottenuto il grafico filtrato, è possibile determinare la decelerazione media  $d_m$  come ordinata di compenso del tratto superiore al valore corrispondente al minimo che si manifesta in occasione della transizione da aderenza ad attrito (cfr. linee orizzontali in fig. 4), nonché il tempo tecnico di attivazione dell'impianto frenante  $t_t$  come tempo intercorrente tra avvio della decelerazione ed intercetta di  $d_m$ .

Lo spazio sotteso dal grafico rappresenta la variazione di velocità, che nel primo tratto è pari a:

$$\Delta v_1 = \frac{1}{2} d_m t_t,$$

mentre nel secondo tratto è pari a:

$$\Delta v_2 = d_m t_f,$$

dove  $t_f$  è la durata della frenatura alla massima efficienza, che si assume cessata al conseguimento dell'arresto.

Qualora anziché della durata della frenatura alla massima efficienza si disponga della sua lunghezza, ad esempio in quanto evidenziata da tracce gommose di frenatura radente, è possibile determinare la velocità in origine per mezzo della seguente relazione:

$$v_{iniziale} = \frac{1}{2} d_m t_t + \sqrt{2 d_m L};$$

E' interessante osservare come raggiunta la quiete, la decelerazione non assuma istantaneamente un valore nullo, ma decresca dapprima fino allo zero, quindi divenga negativa, infine ritorni allo zero. Tale contributo, da non considerarsi ai fini del computo della decelerazione media, è dovuto ad un fenomeno di beccheggio finale, che si manifesta allorché il mezzo raggiunge la stasi, come ben

si comprende dall'osservazione che l'area sottesa dal grafico nel semipiano positivo è circa uguale a quella sottesa nel semipiano negativo.

La metodologia illustrata può essere validata effettuando, contemporaneamente ad alcune prove, dei rilievi metrici inerenti la lunghezza delle tracce di frenata, che possono consistere nelle scie gombose impresse dagli pneumatici qualora il veicolo non sia dotato di ABS, ovvero di scie di vernice emessa da un aerografo con azionamento connesso con il pedale del freno.

### 3. Le prove eseguite presso l'Università di Bologna

La tecnica illustrata è stata impiegata presso l'Università di Bologna per la conduzione di una serie di prove, eseguite con diverse tipologie di veicoli e su diversi manti stradali al fine di poter rappresentare il parco veicolo circolante oggi in Italia. I risultati ottenuti relativi ad asfalto mediamente ruvido ed asciutto sono sintetizzati nella tabella seguente.

Tipologia di vettura	Tempo tecnico $t_t$ [s]	Decelerazione massima [g]
<b>UTILITARIA</b>	0,19 ÷ 0,34	0,65 ÷ 0,85
<b>MEDIA</b>	0,13 ÷ 0,25	0,79 ÷ 0,89
<b>SPORTIVA</b>	0,08 ÷ 0,17	0,79 ÷ 0,88

Tabella 1: Risultati prove sperimentali.

L'esame dettagliato dei grafici, tra l'altro, ha consentito anche di riscontrare il difforme comportamento in frenata di autovetture rispettivamente prive e dotate di impianto ABS.

Nel grafico dei primi (cfr. fig. 4), si nota distintamente che raggiunta la massima decelerazione si ha la 'rottura dell'aderenza' e conseguentemente il blocco delle ruote, generalmente anteriori in conseguenza di una esplicita scelta progettuale effettuata relativamente alla ripartizione della forza frenante tra avantreno e retrotreno, con subentro dell'attrito radente e contrazione puntuale della decelerazione anche del 20%. A seguire la decelerazione manifesta oscillazioni contenute ed andamento sub-orizzontale fino all'arresto, con pendenza più o meno accentuata a seconda che prevalga l'allargamento dell'orma di contatto per abrasione delle superficie del battistrada e/o il riscaldamento dello pneumatico e/o l'incremento dell'attrito radente per riduzione della velocità.

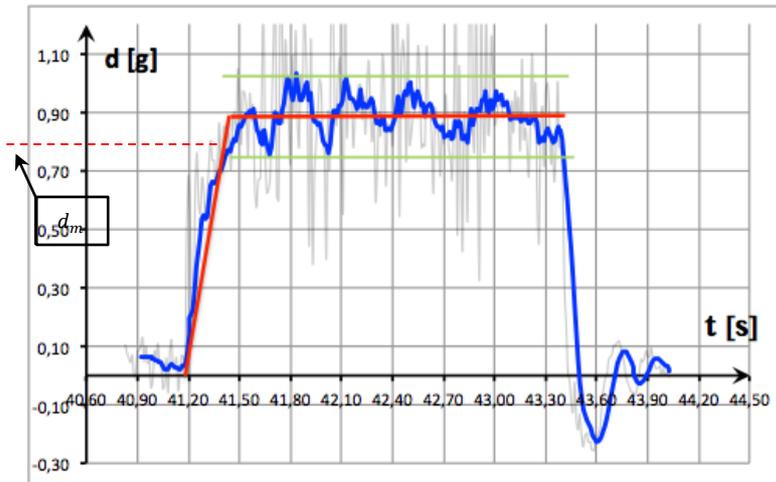


Figura 5: Diagramma della decelerazione relativo alla prova n° 08 del 19/09/2012 (frenata VW Polo su asfalto asciutto a 71 km/h). Si noti la chiara oscillazione dovuta all'intervento dell'ABS..

In un'autovettura allestita con ABS funzionante (cfr. fig. 5), all'atto della transizione da aderenza ad attrito, il correttore dinamico rilascia la pressione nel circuito di azionamento del freno favorendo un pieno recupero dell'aderenza, per poi tornare ad incrementare la pressione stessa, il tutto con elevata frequenza. Per tale ragione il tratto successivo al raggiungimento della massima decelerazione presenta un andamento tendenzialmente oscillante, con periodo variabile in funzione delle caratteristiche dell'impianto ABS e del suolo.

Il difforme comportamento evidenziato non si traduce in una variazione di decelerazione media. Infatti, i picchi ottenuti a fronte del temporaneo recupero dell'aderenza vengono controbilanciati dal successivo temporaneo rilascio della morsa del freno.