

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

SCUOLA DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica



**Definizione di Indicatori per la
Caratterizzazione dello Stile di Guida di Veicoli
Leggeri**

DANIELE BOSC

Anno Accademico 23/24

Indice

1	Introduzione	1
2	Stato dell'Arte	1
3	Fisica della Bicicletta	2
3.1	Dinamica Longitudinale	3
3.2	Dinamica Laterale	6
4	Il Sistema	7
4.1	Il Sensore	7
5	Raccolta Dati	9
5.1	Gli Esperimenti	9
5.2	Dati Raccolti	12
5.2.1	Accelerazione	12
5.2.2	Frenata	14
5.2.3	Curva	14
6	Indicatori	16
6.1	Accelerazione e Frenata	19
6.2	Curva	25
6.3	Utilizzo degli Indicatori	31
7	Sviluppi Futuri	36
7.1	Ulteriori Rilievi	36
7.2	Utilizzo degli Indicatori	37
8	Conclusioni	37

1 Introduzione

Con la crescente attenzione verso l'impatto ambientale dei trasporti la bicicletta è destinata ad avere una rilevanza sempre maggiore.

Il lavoro compiuto durante questa tesi è volto alla definizione di indicatori che consentano di caratterizzare lo stile di guida di un ciclista a partire dai dati raccolti da un sensore montato sopra a una bicicletta.

La caratterizzazione dello stile di guida non solo può aiutare i ciclisti a migliorare le loro prestazioni, ma può anche contribuire a promuovere una guida più sicura e a ottimizzare gli allenamenti in base alle esigenze individuali.

Nel corso di questa tesi, verranno approfonditi i dettagli di ciascuna fase, illustrando le metodologie impiegate, gli strumenti utilizzati e i risultati ottenuti. Infine, saranno discusse le implicazioni pratiche di questi indicatori e le possibilità di applicazione futura nel campo del ciclismo.

2 Stato dell'Arte

Sono già stati effettuati numerosi studi riguardanti la definizione di indicatori per la caratterizzazione dello stile di guida. Molti di questi si concentrano sulle automobili e altri, come in questo caso, su veicoli più leggeri, come le biciclette.

Ogni ricerca aveva la sua peculiarità, nonostante l'argomento fosse simile, alcune di queste utilizzano il machine learning o il dynamic time warping per ottenere pattern utili per il riconoscimento, altri studi utilizzano metodi di analisi statistica e altri algoritmi per evidenziare eventi specifici.

Le ricerche si differenziano anche in base ai sensori utilizzati, la maggior parte di queste fanno utilizzo di piattaforme inerziali oppure cellulari per raccogliere dati quali accelerazione e velocità angolari e ottengono poi la velocità e l'orientamento integrando le precedenti.

In alcuni casi al fine di ottenere misure più attendibili la piattaforma inerziale è stata accompagnata da un altro sensore in grado di "catturare" la velocità del veicolo. In questi casi si è optato per un GPS o un altro sensore posto sulla ruota che consente di determinare

in quanto tempo questa compie un giro completo e, quindi, la velocità della bicicletta.

Altri articoli, per meglio catturare alcuni comportamenti del ciclista, hanno provato a montare il sensore sul manubrio della bicicletta invece che sul telaio. In questo modo il sensore è riuscito a catturare il movimento che il ciclista fa con il manubrio per mantenere in equilibrio la bicicletta durante la corsa e, in base a questo, stabilire che stile di guida stesse adottando.

Infine altri articoli hanno fatto uso di telecamere e sensori montati sul ciclista stesso per valutare il comportamento di quest'ultimo durante la corsa.

3 Fisica della Bicicletta

Per meglio comprendere i capitoli seguenti andremo ora ad analizzare i principali fenomeni fisici che influenzano la bicicletta durante il moto.

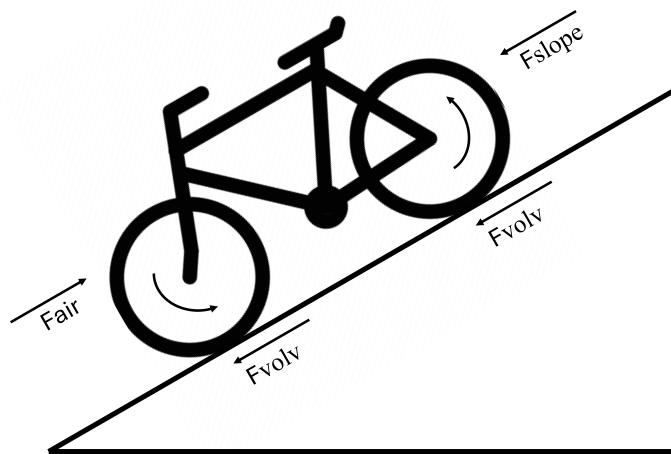


Figura 1: Forze resistenti applicate a una bicicletta che va in discesa.

3.1 Dinamica Longitudinale

La dinamica longitudinale riguarda tutte quelle forze che consentono l'avanzamento della bicicletta. Affinché questa acceleri le deve essere applicata una forza

$$\vec{F} = m_{sys} \cdot a_{bike}$$

dove m_{sys} è la massa del sistema ovvero la somma della massa del ciclista e quella della bicicletta.

$$m_{sys} = m_{bike} + M_{ciclista}$$

Possiamo quindi scomporre il vettore \vec{F} nelle due componenti \vec{F}_P e \vec{F}_R

$$\vec{F}_P - \vec{F}_R = m_{sys} \cdot a_{bike}$$

dove la prima è la forza propulsiva, ovvero la forza che tende a far accelerare la bicicletta, mentre la seconda è la forza resistente, cioè la forza che si oppone al movimento della stessa.

Abbiamo quindi che:

- se $\vec{F}_P > \vec{F}_R \rightarrow a_{sys} > 0$ la bicicletta accelera
- se $\vec{F}_P < \vec{F}_R \rightarrow a_{sys} < 0$ la bicicletta decelera
- se $\vec{F}_P = \vec{F}_R \rightarrow a_{sys} = 0$ la bicicletta si muove a velocità costante.

Per semplificare le cose consideriamo di trovarci in quest'ultimo caso, supponiamo quindi che il ciclista stia avanzando mantenendo la velocità della bicicletta (v_{bike}) costante.

$$a_{bike} = 0 \rightarrow \vec{F}_P = \vec{F}_R$$

Moltiplicando ora \vec{F}_R per v_{bike} possiamo convertire la forza resistente in potenza resistente

$$P_P = P_R = \vec{F}_R \cdot v_{bike}$$

dove

$$P_P = P_{in} \cdot \eta$$

con η il rapporto di trasmissione tra pedali e ruota e

$$P_{in} = \vec{F}_{in} \cdot \cos(\theta) \cdot l_{crank} \cdot \omega_{crank}$$

dove l_{crank} e ω_{crank} sono, rispettivamente, la lunghezza e la velocità angolare della pedivella e θ è angolo compreso tra la direzione del vettore \vec{F}_{in} (la forza che il ciclista applica sui pedali) e l'asse perpendicolare alla pedivella. Abbiamo quindi che, in funzione della posizione in cui si trova la pedivella, il ciclista sarà in grado di imprimere una forza maggiore o minore alla bicicletta. In particolare la forza propulsiva risulta massima quando le pedivelle sono parallele al terreno e minima quando sono perpendicolari allo stesso. L'accelerazione della bicicletta risulta quindi oscillante.

Applicando quanto scritto nei passaggi precedenti otteniamo

$$\vec{F}_{in} \cdot \cos(\theta) \cdot l_{crank} \cdot \omega_{crank} \cdot \eta = \vec{F}_R \cdot v_{bike}$$

Passiamo ora alla forza resistente \vec{F}_R . Come detto questa è la forza che si oppone al movimento della bicicletta ed è composta dalle seguenti componenti

$$\vec{F}_R = \vec{F}_{air} + \vec{F}_{volv} - \vec{F}_{slope}$$

dove

- \vec{F}_{air} è la forza di attrito dell'aria

$$\vec{F}_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot v_{air}^2$$

dove ρ_{air} è la densità dell'aria, C_d è il coefficiente d'attrito, A è l'area frontale del ciclista e della bicicletta e v_{air} è la velocità dell'aria rispetto alla bicicletta ed è quindi composta dalla velocità del ciclista e dalla velocità del vento

$$v_{air} = v_{bike} + v_{wind}$$

$$\vec{F}_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot (v_{bike} + v_{wind})^2$$

- \vec{F}_{volv} è la forza di attrito volvente

$$\vec{F}_{volv} = m_{sys} \cdot g \cdot \mu_v \cdot \cos(\alpha)$$

dove μ_v è il coefficiente d'attrito volvente, g è la forza di gravità e α è l'inclinazione della superficie sulla quale sta andando la bicicletta. Questa forza è quindi massima quando la bicicletta si muove su un piano orizzontale.

- \vec{F}_{slope} è la forza che la bicicletta subisce a causa della gravità

$$\vec{F}_{slope} = m_{sys} \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

e si oppone al movimento quando la bicicletta si muove in salita ($\alpha > 0$) e, al contrario, favorisce il movimento quando la bicicletta si muove in discesa ($\alpha < 0$).

Per quanto detto precedentemente otteniamo

$$\vec{F}_{in} \cdot \cos(\theta) \cdot l_{crank} \cdot \omega_{crank} \cdot \eta = (\vec{F}_{air} + \vec{F}_{volv} - \vec{F}_{slope}) \cdot v_{bike}$$

$$\begin{aligned} & \vec{F}_{in} \cdot \cos(\theta) \cdot l_{crank} \cdot \omega_{crank} \cdot \eta = \\ & = \left(\frac{1}{2} \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot (v_{bike} + v_{wind})^2 + m_{sys} \cdot g \cdot \mu_v \cdot \cos(\alpha) - m_{sys} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot v_{bike} \end{aligned}$$

che ci mostra come, all'aumentare della velocità, al ciclista sia richiesto di generare una maggior potenza. Inoltre, nel caso in cui il ciclista volesse accelerare entrerebbe in gioco anche l'inerzia, che dipende dalla massa del sistema e dal momento d'inerzia della ruota, che si andrebbe a sommare alle altre forze resistenti. Da quanto detto finora ne segue che, visto che per poter accelerare è necessario vincere le forze resistenti, tanto più la velocità della bicicletta è elevata tanto più è difficile accelerare.

3.2 Dinamica Laterale

La dinamica laterale si occupa delle forze e dei momenti che agiscono sulla bicicletta durante i movimenti laterali, in particolare le curve.

Le forze che entrano in gioco durante le curve sono:

- forza di attrito laterale
- forza centripeta
- forza centrifuga

La forza di attrito laterale è la forza di attrito tra gli pneumatici e il terreno ed è ciò che consente alla bicicletta di curvare.

La forza centripeta è una forza che agisce dall'esterno verso l'interno e che consente di mantenere la traiettoria durante la curva. È data da

$$\vec{F}_{centripeta} = m_{sys} \cdot \frac{v_{bike}^2}{R}$$

dove R è il raggio della curva, ovvero la distanza tra la bicicletta e il centro di istantanea rotazione.

La forza centrifuga \vec{F}_c , infine, è una forza che agisce dall'interno verso l'esterno di modulo pari alla forza centripeta ma di verso opposto. In particolare la forza centrifuga è applicata al centro di massa della sistema *ciclista + bicicletta* e tende a far ruotare lo stesso attorno all'asse che congiunge i punti di contatto delle due ruote con il terreno, generando un momento \vec{M}_c .

$$\vec{F}_c = m_{sys} \cdot \frac{v_{bike}^2}{R}$$

$$\vec{M}_c = \vec{F}_{c\perp} \cdot h = \vec{F}_c \cdot \cos(\phi_{roll}) \cdot l = m_{sys} \cdot \frac{v_{bike}^2}{R} \cdot \cos(\phi_{roll}) \cdot l$$

dove ϕ_{roll} è l'angolo di rollio, ovvero la rotazione della bicicletta attorno all'asse longitudinale e l è la distanza minima tra il centro di massa del sistema e l'asse che congiunge i punti di contatto delle due ruote con il terreno.

Per bilanciare questo momento, ed evitare di cadere, il ciclista è costretto a inclinarsi,

in modo che la forza di gravità generi un secondo momento \vec{M}_g

$$\vec{F}_g = m_{sys} \cdot g$$

$$\vec{M}_g = m_{sys} \cdot g \cdot \sin(\phi_{roll}) \cdot l$$

che vada a compensare \vec{M}_c .

$$\vec{M}_c = \vec{M}_g$$

$$m_{sys} \cdot \frac{v_{bike}^2}{R} \cdot \cos(\phi_{roll}) \cdot l = m_{sys} \cdot g \cdot \sin(\phi_{roll}) \cdot l$$

Dall'uguaglianza precedente è possibile ricavare l'angolo alla quale i due momenti si equivalgono, ovvero di quanto il ciclista deve inclinare la bicicletta per evitare di cadere durante la curva.

$$\operatorname{tg}(\phi_{roll}) = \frac{v_{bike}^2}{R \cdot g} \rightarrow \phi_{roll} = \operatorname{arctg} \left(\frac{v_{bike}^2}{R \cdot g} \right)$$

Infine, è importante considerare che, durante la pedalata, la forza che il ciclista applica sul pedale genera un momento che tende a far ruotare la bicicletta attorno all'asse longitudinale. Avremo quindi che, durante la corsa, la bicicletta oscillerà a destra e a sinistra in base a quale dei due pedali il ciclista sta impiegando per pedalare in quel momento.

4 Il Sistema

Nel capitolo seguente verrà trattato il sensore che è stato montato sulla bicicletta al fine di raccogliere i dati necessari per lo svolgimento di questa tesi.

4.1 Il Sensore

Il sensore utilizzato per raccogliere i dati è il Blue Coin della ST Microelectronics (<https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-bcnkt01v1.html>) sulla quale è stato montato il software *FP_ALLMEMS1-V4.3.0* presente sulla pagina web del produttore.



(a)



(b)

Figura 2: La bicicletta 2a e il sensore 2b usati durante le uscite per acquisire i dati

Questo sensore è dotato di

- Accelerometro: misura in mg l’accelerazione lungo gli assi x,y e z
- Giroscopio: misura in $mdps$ la velocità angolare attorno agli angoli di rollio (*roll*), beccheggio (*pitch*) e imbardata (*yaw*)
- Magnetometro: misura in mG (*milliGauss*) l’intensità del campo magnetico, può essere utilizzato per determinare l’orientamento
- Barometro: misura la pressione atmosferica
- Termometro: misura la temperatura
- Microfono

Durante i nostri esperimenti sono stati utilizzati solo i dati provenienti dall’accelerometro, dal giroscopio e dal magnetometro in quanto sufficienti per ottenere i risultati da noi cercati.

Il sensore è stato montato di volta in volta sul telaio della bicicletta, sull’asse che dalla sella prosegue verso il manubrio, al di sotto di quest’ultimo. Sfortunatamente, in questo modello di bicicletta, quest’asse è inclinato rispetto all’orizzontale e leggermente curvo. Questo ha reso necessario trovare un modo per calcolare la rotazione dei dati al fine di far coincidere gli assi del sensore e con quelli della bicicletta, ma di questo tratteremo nel prossimo capitolo.

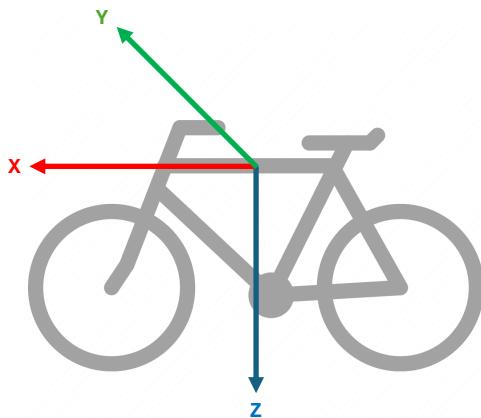


Figura 3: Bicicletta con il sistema di riferimento usato

Il sistema di riferimento usato dal sensore è quello *NED* (north-east-down), avremo quindi che: la direzione positiva dell’asse x sarà quella di movimento della bicicletta (di fronte a noi), l’asse y avrà direzione positiva sul lato destro della bicicletta e l’asse z sarà diretto verso il basso. Da notare che, nonostante sia diretta verso il basso, il sensore percepisce l’accelerazione gravitazionale come negativa in quanto, non vedendo i risultati della stessa (il sensore non sta precipitando), ”ritiene” che ci sia un’accelerazione negativa (rivolta verso l’alto) che gli sta impedendo di cadere. In altre parole, il sensore rileva la reazione vincolare della superficie terrestre, che è una forza normale che contrasta la gravità e mantiene il sensore in equilibrio.

5 Raccolta Dati

In questo capitolo verranno descritte le sessioni di raccolta dati e verrà fornita una panoramica dei dati stessi.

5.1 Gli Esperimenti

La raccolta dati è avvenuta in diverse sessioni, ognuna delle quali si è focalizzata su una differente situazione di guida. In particolare sono stati prese in considerazione le fasi di:

- accelerazione: in questa fase i dati sono stati raccolti sia durante una situazione di pedalata normale che forte in un percorso rettilineo

- frenata: in questa fase i dati sono stati raccolti sia in situazioni di progressiva che di repentina perdita di velocità
- curva: in questa fase sono stati raccolti dati inerenti a curve principalmente di 90° e 180° percorse più o meno velocemente

Dato che il sensore non era integrato sulla bicicletta, ma andava fissato di volta in volta sulla stessa, all'inizio di ogni sessione è stato necessario determinare la matrice di rotazione da applicare ai dati per far coincidere il sistema di riferimento del sensore con quello della bicicletta. Per far ciò, una volta fissato il sensore, sono stati raccolti dati per un periodo di tempo di $30s$ con la bicicletta mantenuta ferma dapprima in posizione verticale (in modo che la direzione dell'asse longitudinale fosse parallelo al terreno) e, successivamente, inclinata. Dei dati così raccolti sono stati tenuti i $10s$ centrali, in modo da eliminare gli istanti successivi all'accensione e precedenti allo spegnimento del sensore, che sono i più sporchi. I primi dati ottenuti, quelli con la bicicletta in verticale, sono stati quindi utilizzati per calcolare la rotazione attorno all'asse x . Questo è stato fatto calcolando il modulo del valor medio della componente gravitazionale che giace sul piano yz e calcolando poi la rotazione necessaria per annullare la componente x di tale vettore.

$$\theta_x = \arccos\left(\frac{g_z}{|g_{yz}|}\right)$$

con θ_x la rotazione attorno all'asse x , g_z la componente gravitazionale lungo l'asse z e $|g_{yz}|$ il modulo del vettore composto dalle componenti y e z del vettore gravità. È stata quindi ottenuta la prima matrice di rotazione M_x

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}$$

Allo stesso modo è stata poi ottenuta la rotazione attorno all'asse y e la rispettiva matrice di rotazione M_y . Infine, grazie al secondo set di dati, quello con la bicicletta inclinata, è stato possibile ottenere la rotazione attorno all'asse z e la matrice M_z .

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice di rotazione complessiva è stata poi ottenuta moltiplicando le singole matrici di rotazione

$$M = M_x \cdot M_y \cdot M_z$$

ed è stata applicata ai dati raccolti per portarli nel sistema di riferimento della bicicletta.

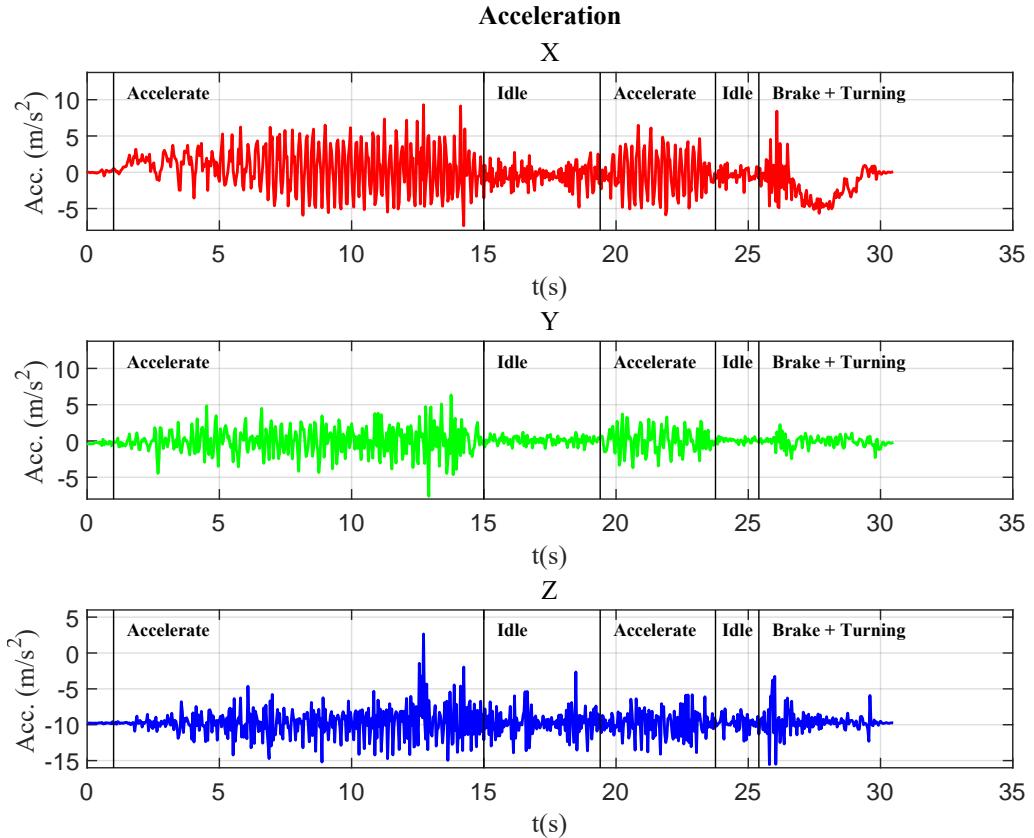


Figura 4: Grafico dei dati di accelerazione raccolti durante un percorso rettilineo. Dalle immagini si può notare come nelle fasi di accelerazione (*Accelerate*) lungo gli assi *X* e *Y* siano più ampie rispetto alle fasi di *idle*.

5.2 Dati Raccolti

Durante i vari esperimenti il sensore ha raccolto i dati di accelerazione, velocità angolare e campo magnetico con una frequenza di campionamento di 25Hz (un campione ogni 0.04s). In questa sezione verrà trattato di come si comportano queste grandezze durante i vari esperimenti fatti.

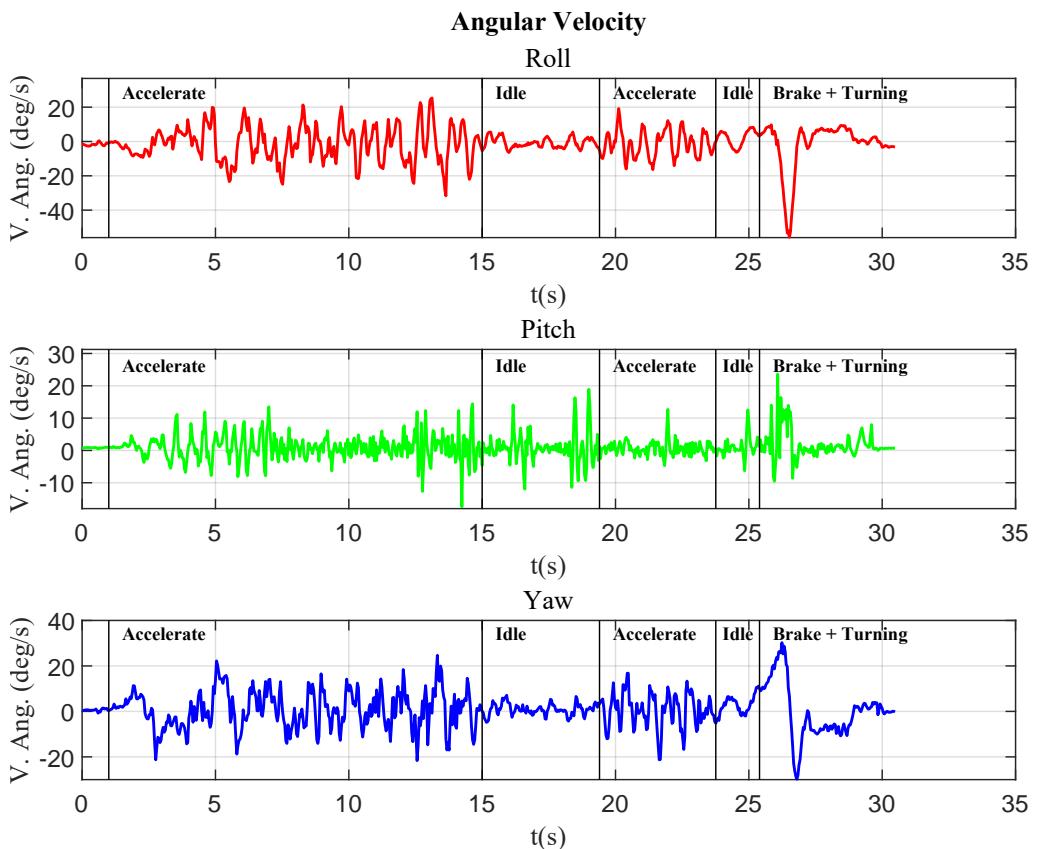


Figura 5: Grafici dei dati delle velocità angolari raccolti durante un percorso rettilineo. Dalle immagini si può notare come nelle fasi di *Accelerate* le oscillazioni degli angoli *roll* e *yaw* siano più ampie rispetto alle fasi di *idle*.

5.2.1 Accelerazione

Le fasi accelerazione si sono svolte su un percorso rettilineo. Durante queste fasi, delle tre grandezze considerate, solo l'accelerazione e la velocità angolare hanno prodotto variazioni apprezzabili.

In particolare, l'accelerazione lungo l'asse x risulta oscillante, con oscillazioni tanto più elevate quanto più il ciclista pedala intensamente. Queste oscillazioni sono dovute, come discusso nel capitolo riguardante la fisica della bicicletta, dall'azione del piede sul pedale e dal fatto che non è possibile riuscire a imprimere costantemente la massima forza ma questa dipende dall'orientamento della pedivella. La forza applicata nel pedalare si traduce anche in un'oscillazione della bicicletta, visibile sia sull'accelerazione lungo l'asse y che in una rotazione attorno all'asse x (*roll*).

Nei dati provenienti dal giroscopio è inoltre possibile osservare una rotazione attorno all'asse z (*yaw*) tanto maggiore quanto il ciclista si "impegna" nel pedalare. Questo è dovuto all'azione del ciclista sul manubrio per mantenere in equilibrio la bicicletta.

In tutti i casi precedenti l'oscillazione cessa quando il ciclista smette di pedalare e procede per inerzia.

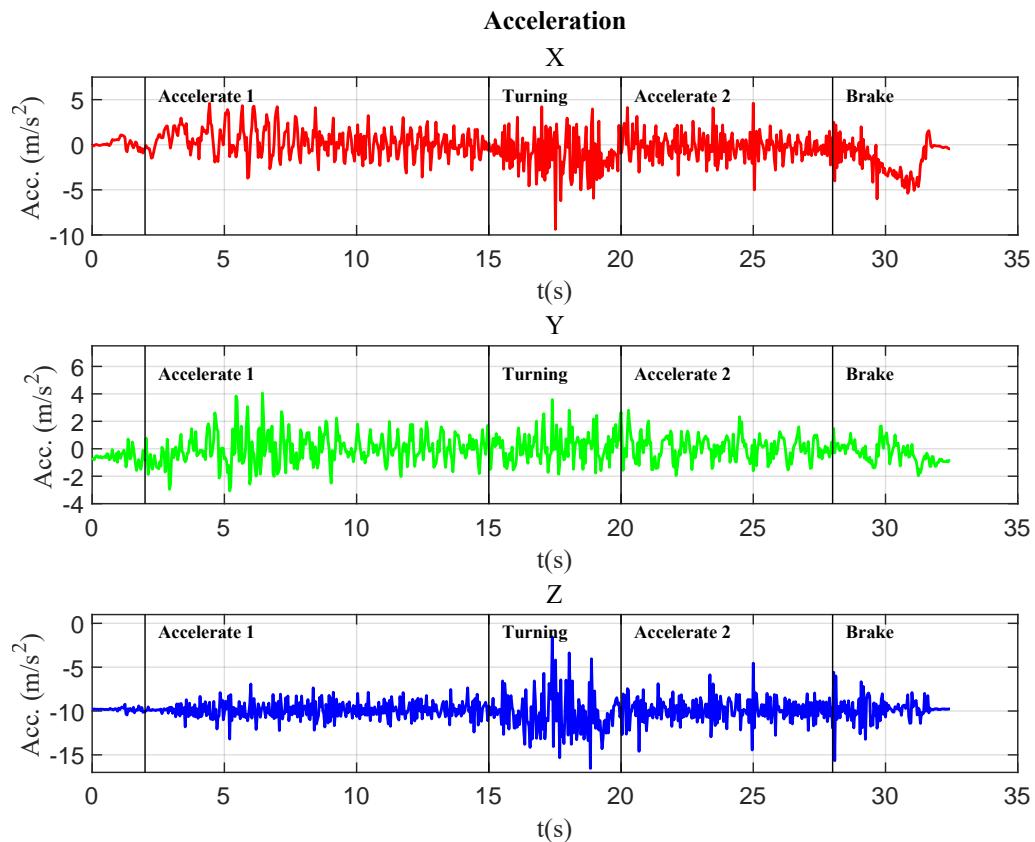


Figura 6: Grafico dei dati di accelerazione raccolti durante un percorso con curva a U. Dalle immagini si può notare come, nella fase di curva (*Turning*), vi sia un abbassamento dell'andamento medio dell'accelerazione in X .

5.2.2 Frenata

Durante le fasi di frenata l'accelerazione lungo l'asse x decresce rapidamente e diventa negativa a causa dell'azione del freno, in maniera più o meno marcata, a seconda dell'intensità della frenata.

In caso di frenate particolarmente intense, è inoltre possibile notare l'effetto della frenata anche come rotazione attorno all'asse y . Questo è dovuto all'inerzia del ciclista che, facendogli spostare il peso in avanti, causa un'inclinazione della bicicletta.

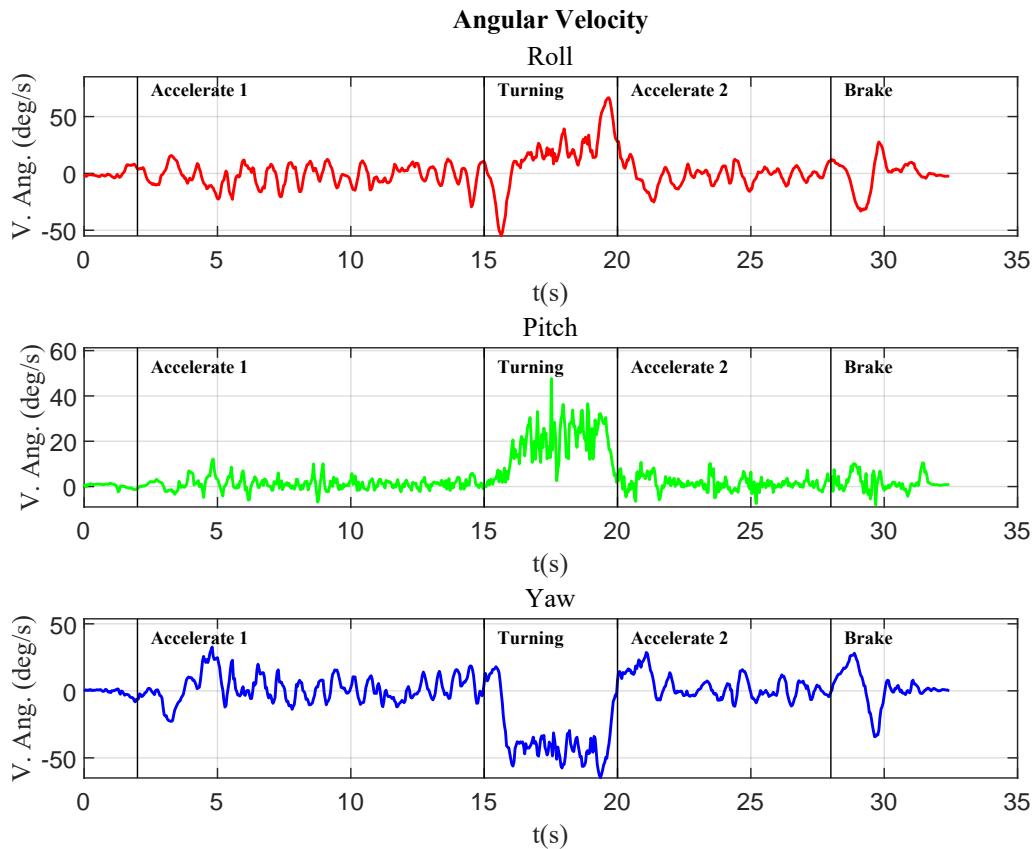


Figura 7: Grafico dei dati di velocità angolare raccolti durante un percorso con curva a U. Dalle immagini si può notare un picco all'inizio e alla fine della curva (*Turning*) attorno all'angolo di rollio (*Roll*). Negli altri angoli, invece, si può notare un incremento/decimento del loro valore durante la curva.

5.2.3 Curva

Durante le curve le misure di accelerazione diventano meno rilevanti, si assiste principalmente a una riduzione della componente in x .

Le velocità angolari, invece, mostrano variazioni significative. All'inizio e alla fine delle curve si osservano due picchi di verso opposto nell'angolo di rollio, più o meno pronunciati a seconda dell'inclinazione della bicicletta durante la curva. Quest'inclinazione causa anche un aumento dell'angolo di beccheggio (*pitch*) dovuto alla rotazione della bicicletta attorno all'asse *y* durante la curva. Inoltre, il valore dell'angolo di imbardata (*yaw*) aumenta o decresce a seconda del verso della curva (se si ruota in senso orario o antiorario).

Anche il campo magnetico, che finora non era stato particolarmente rilevante, riesce a fornirci importanti informazioni. Infatti, il magnetometro, agendo come una bussola, ci dice molto riguardo all'orientamento della bicicletta. In particolare l'asse *x*, durante la curva, subisce un rapido aumento o diminuzione a seconda di dove si colloca il nord magnetico terrestre rispetto alla bicicletta.

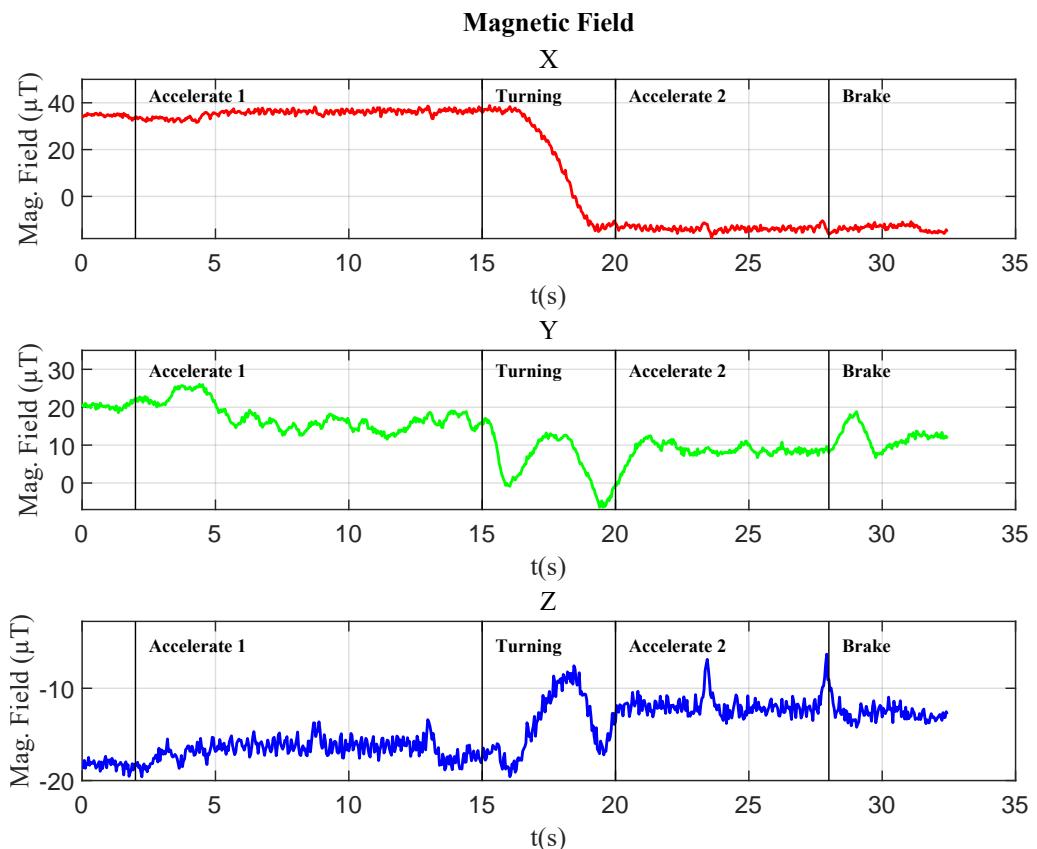


Figura 8: Grafico dei dati del campo magnetico raccolti durante un percorso con curva a U. Dalle immagini si può notare un deciso abbassamento del campo magnetico in *X* dovuto al cambiamento di direzione.

6 Indicatori

Numerosi sono gli studi condotti al fine di comprendere lo stile di guida adottato dal conducente di un veicolo, tuttavia la maggior parte di questi si sono focalizzati sulle automobili. In questi articoli la componente z dell'accelerazione e le rotazioni attorno agli angoli di *rollio* e *beccheggio* sono stati trascurati in quanto ritenuti poco rilevanti per descrivere il comportamento dinamico dalle automobili. Una bicicletta, però, si muove in modo significativamente differente rispetto a un'auto. In particolare, durante le curve, la bicicletta ruota sia attorno all'asse di *rollio* che a quello di *beccheggio* mentre lungo l'asse z è possibile osservare la forza centrifuga.

Negli articoli consultati, gli indicatori più comunemente utilizzati sono risultati essere media, varianza e distanza picco-picco. Oltre a quelli citati, però, ne sono stati utilizzati degli altri. In particolare, l'articolo [1], riguardante lo stile di guida delle automobili, fornisce una lista molto completa di indicatori e sperimenta l'introduzione di nuovi come, per esempio, lo shape factor e il margin factor.

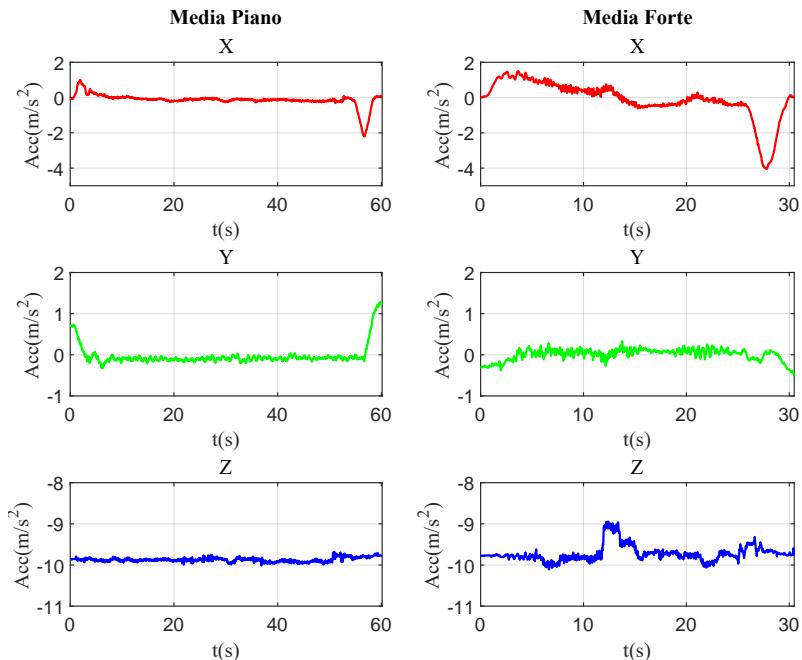


Figura 9: Media dei dati di accelerazione raccolti su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull'asse X è possibile notare come le fasi di accelerazione siano più pronunciate adottando uno stile di guida aggressivo.

Durante questa ricerca sono stati utilizzati i seguenti indicatori:

- Indicatori temporali
 - Media (*mean*), Valor Medio Rettificato (*arv*) e Media Quadratica (*rms*)
 - Varianza (*var*) e Deviazione Standard (*std*)
 - Kurtosis (*krt*)
 - Skewness (*skw*)
 - Massimo (*max*), Minimo (*min*) e Distanza Picco-Picco (*pk*)
- Indicatori adimensionali
 - Shape factor (*sf*)
 - Crest factor (*cf*)
 - Impulse factor (*if*)
 - Margin factor (*mf*)
- Indicatori basati sulla frequenza
 - Ampiezza media (*amp*)
 - Frequency centroid (*cnt*)
 - Varianza delle frequenze(*fvar*)
 - Entropia spettrale (*ent*)

Questi indicatori sono stati applicati ai dati provenienti dall'accelerometro, dal giroscopio e dal magnetometro e alla velocità durante le fasi di accelerazione, curva e frenata. Di seguito verranno descritti gli indicatori che si sono rivelati più interessanti durante le tre fasi appena citate.

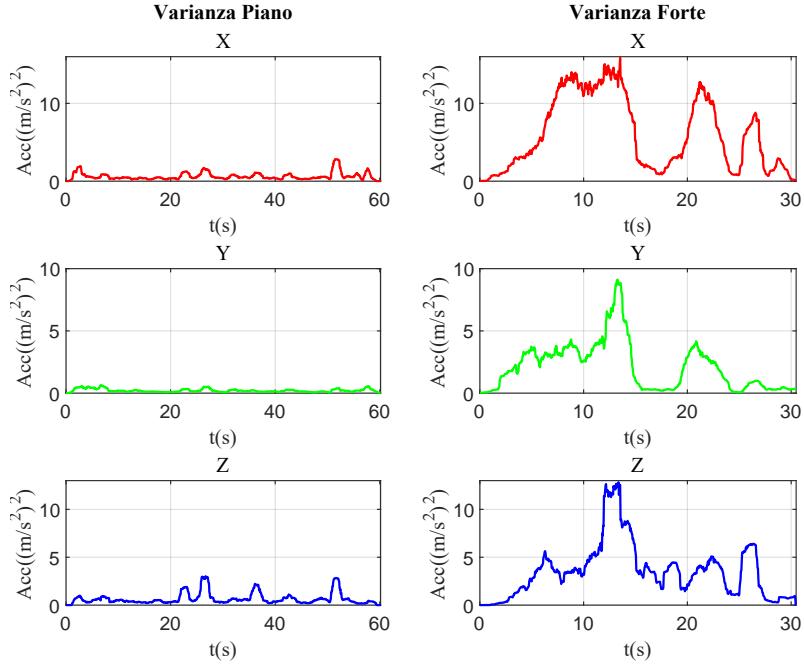


Figura 10: Varianza dei dati di accelerazione raccolti su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull’asse X è possibile notare come le fasi di accelerazione siano più pronunciate adottando uno stile di guida aggressivo. Inoltre, sono osservabili anche le frenate. Sull’asse Y , invece, le frenate non sono osservabili.

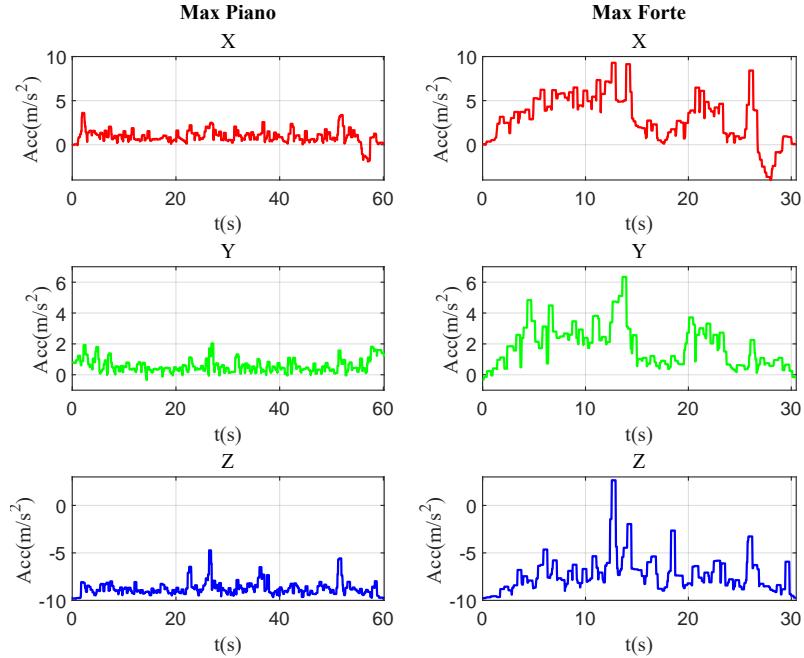


Figura 11: Valore massimo dei dati di accelerazione raccolti su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). L’andamento è simile a quello della varianza (Figura 10) con la differenza che le frenate sono evidenziate con un valore negativo.

6.1 Accelerazione e Frenata

Durante le fasi di accelerazione e frenata gli indicatori che si sono rivelati maggiormente utili sono:

- media accelerazione in x
- varianza accelerazione in x e y
- massimo accelerazione in x
- distanza picco-picco accelerazione in x e y
- varianza velocità in x
- distanza picco-picco velocità in x
- deviazione standard *rollio*
- distanza picco-picco *rollio*

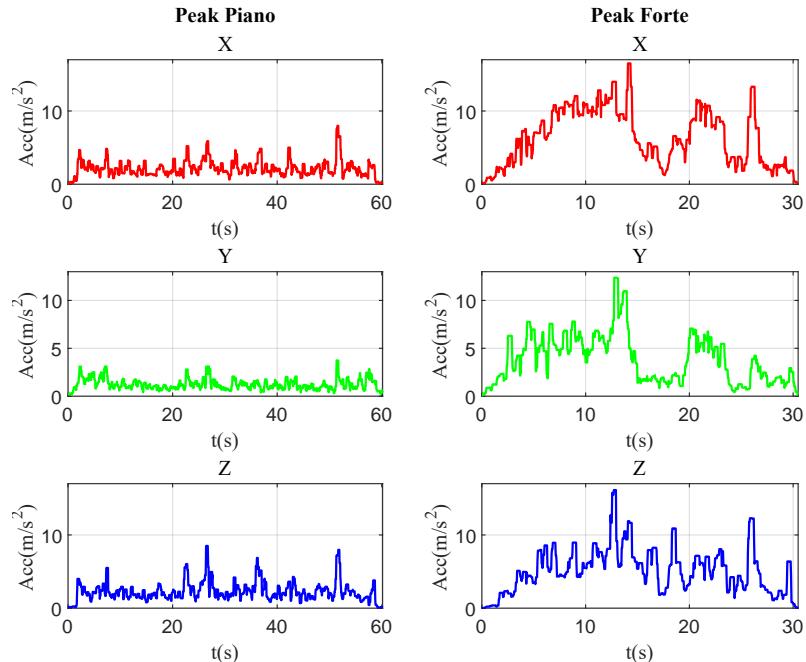


Figura 12: Distanza picco-picco dei dati di accelerazione raccolti su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). L'andamento è simile a quello della varianza (Figura 10).

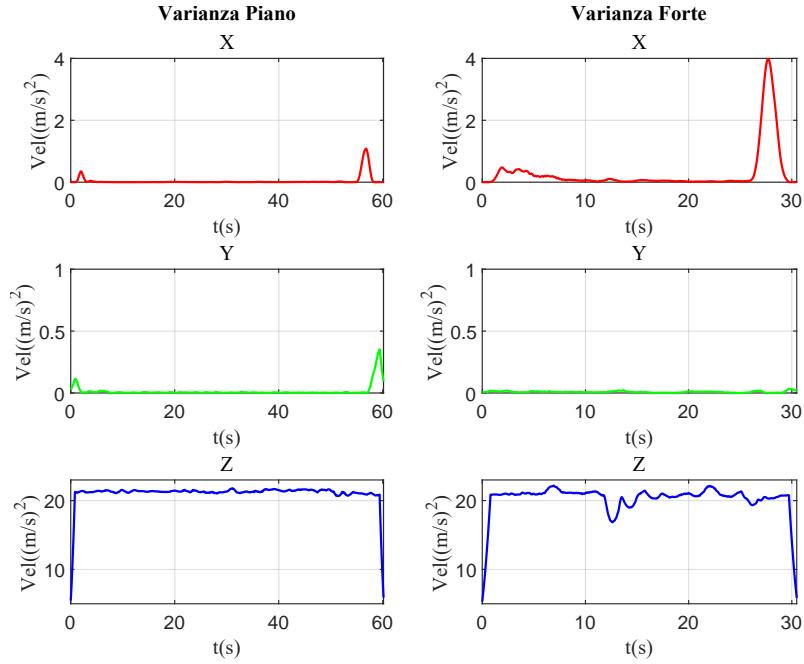


Figura 13: Varianza della velocità su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull'asse X è possibile notare un picco in corrispondenza delle frenate. È, inoltre, possibile osservare un innalzamento in corrispondenza dei forti aumenti di velocità come, per esempio, quando la bicicletta parte da ferma.

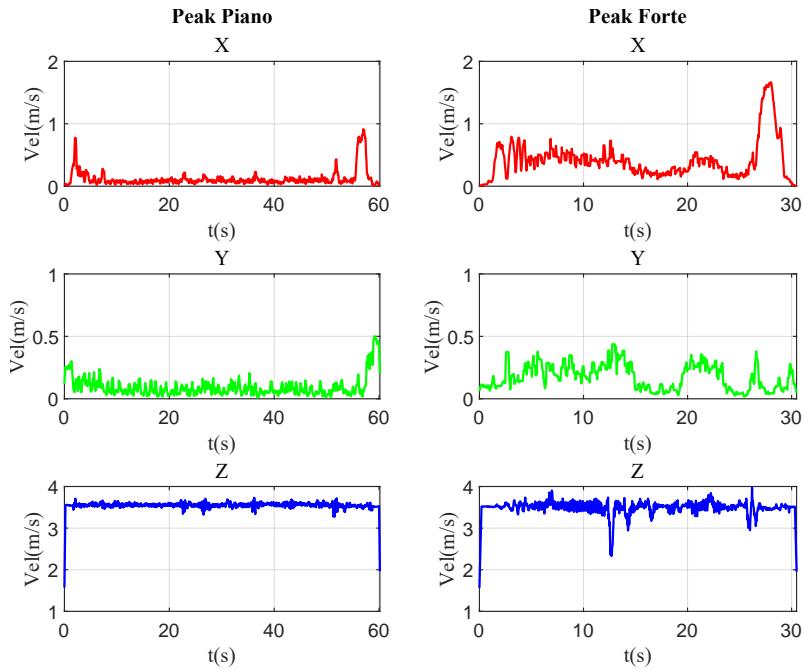


Figura 14: Distanza picco-picco della velocità su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull'asse X è possibile notare un picco in corrispondenza delle frenate. Inoltre, sugli assi X e Y sono visibili le fasi di accelerazione.

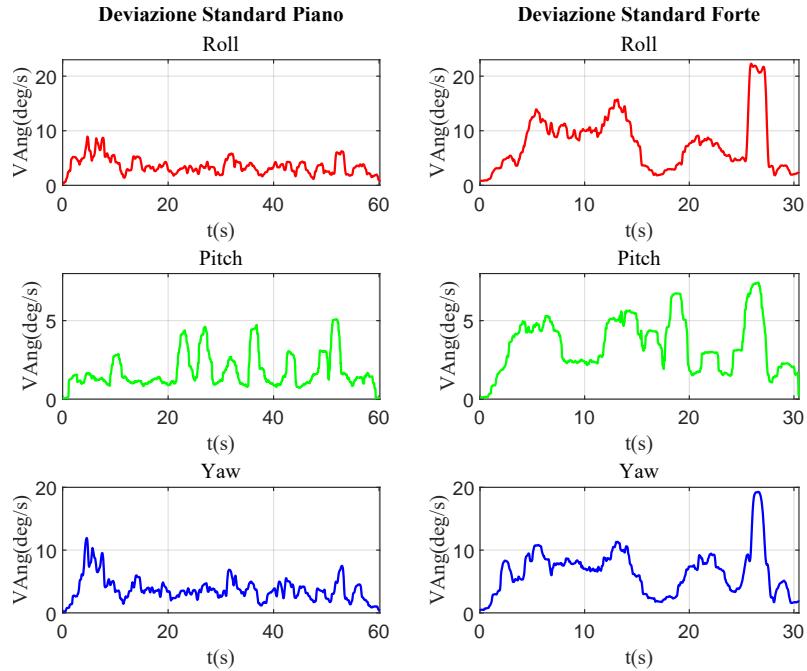


Figura 15: Deviazione Standard della velocità angolare su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sugli assi sono visibili le fasi di accelerazione. Il picco finale è dovuto a una leggera curva.

L’andamento medio dell’accelerazione in x , calcolata come media degli ultimi $1.6s$, mostra un incremento durante le fasi di accelerazione della bicicletta che tende a diminuire fino a 0 all’aumentare della velocità. Risulta essere negativa solo nei momenti in cui il ciclista smette di pedalare, procedendo per inerzia, e quando frena. In quest’ultimo caso è visibile una netta e rapida diminuzione di questo parametro in funzione dell’intensità della frenata.

Per quanto riguarda la media rettificata, la media quadratica, la varianza e la deviazione standard dell’accelerazione lungo gli assi x e y hanno tutte un andamento molto simile. Di questi parametri è stata selezionata la varianza in quanto ha un range di valori più ampio e consente, quindi, una migliore identificazione degli eventi. In particolare la varianza lungo gli assi x e y è in grado di evidenziare lo sforzo del ciclista nel pedalare, con valori tanto più elevati quanto più l’accelerazione lungo questi assi oscilla. La varianza dell’accelerazione in x è inoltre in grado di evidenziare le frenate. Anche il massimo

dell’accelerazione in x si comporta come la varianza, con la differenza che le frenate vengono segnalate con un valore negativo più o meno evidente a seconda del numero di dati utilizzati per calcolarlo. Questo rende più facile distinguere le fasi di accelerazione dalle fasi di frenata.

Comportamento analogo a quello della varianza è stato osservato nella distanza picco-picco dell’accelerazione degli assi x e y .

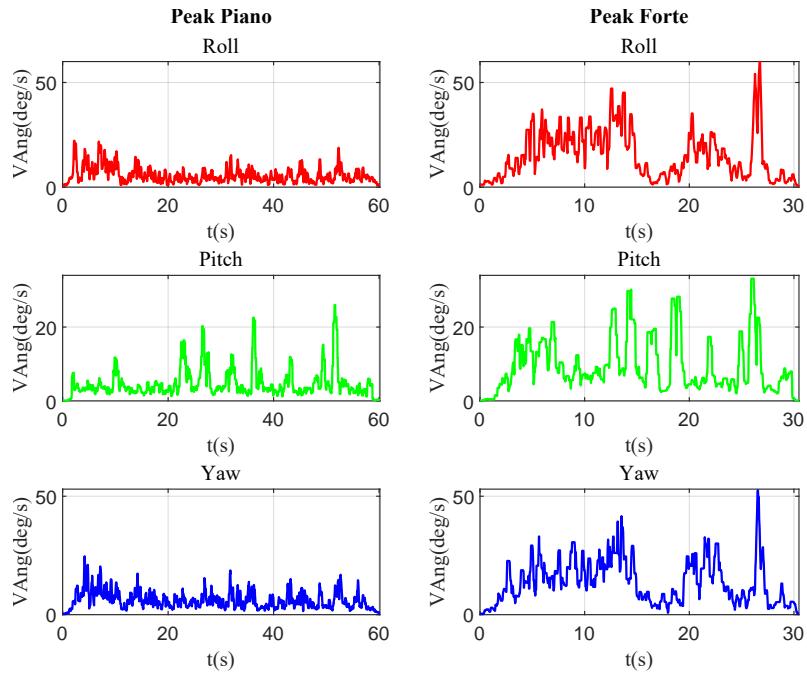


Figura 16: Distanza picco-picco della velocità angolare su un percorso rettilineo in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). L’andamento lungo i 3 assi è simile a quello della deviazione standard (Figura 15)

Per quanto riguarda la velocità, sia la varianza che la deviazione standard identificano molto bene le frenate.

Come per l’accelerazione anche nel caso della velocità angolare dell’angolo di rollio la media rettificata, la media quadratica, la varianza e la deviazione standard hanno comportamenti simili che identificano bene la foga con cui il ciclista pedala, così come la distanza picco-picco del rollio.

Il campo magnetico, infine, non fornisce molte informazioni per quanto riguarda i percorsi rettilinei.

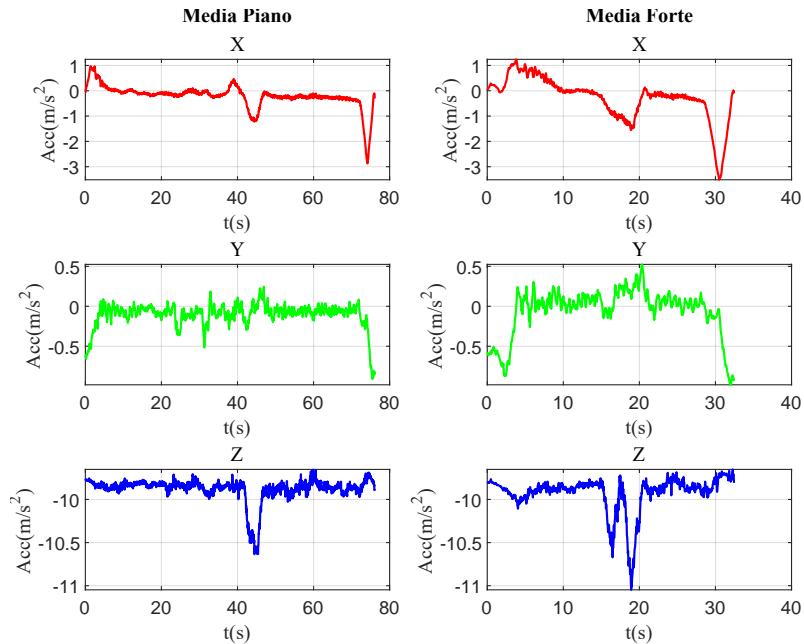


Figura 17: Media dell’accelerazione su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Oltre alle fasi di accelerazione e frenata anche la curva è visibile.

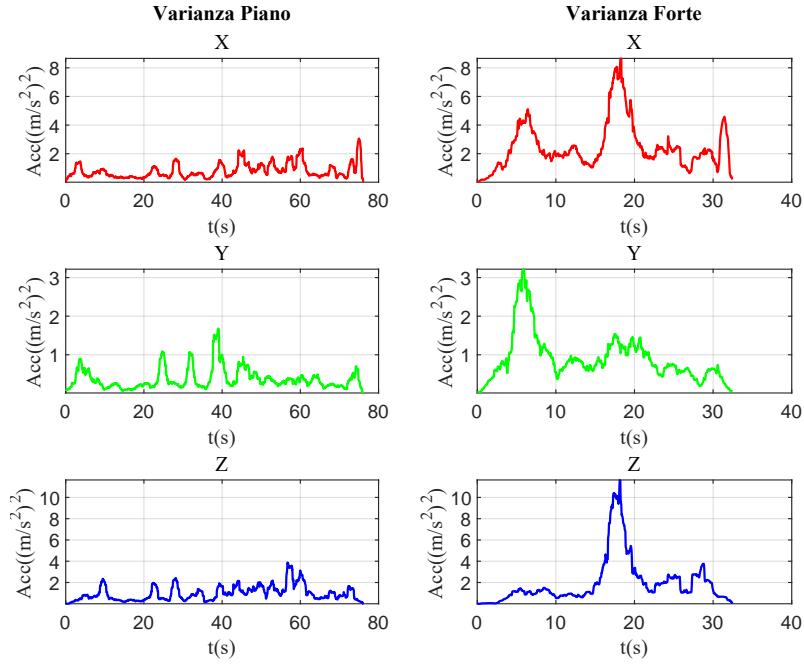


Figura 18: Varianza dell’accelerazione su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull’asse X , oltre alle fasi di accelerazione e frenata, anche la curva è molto evidente. Sull’asse Y le curve sono meno evidenti.

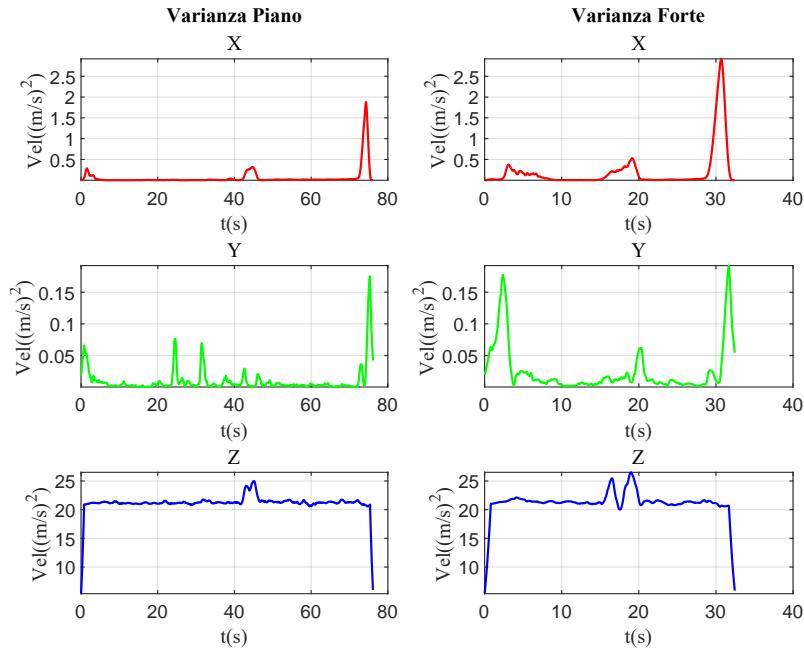


Figura 19: Varianza della velocità su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Della curva al centro è visibile l’effetto che essa ha sulla velocità della bicicletta.

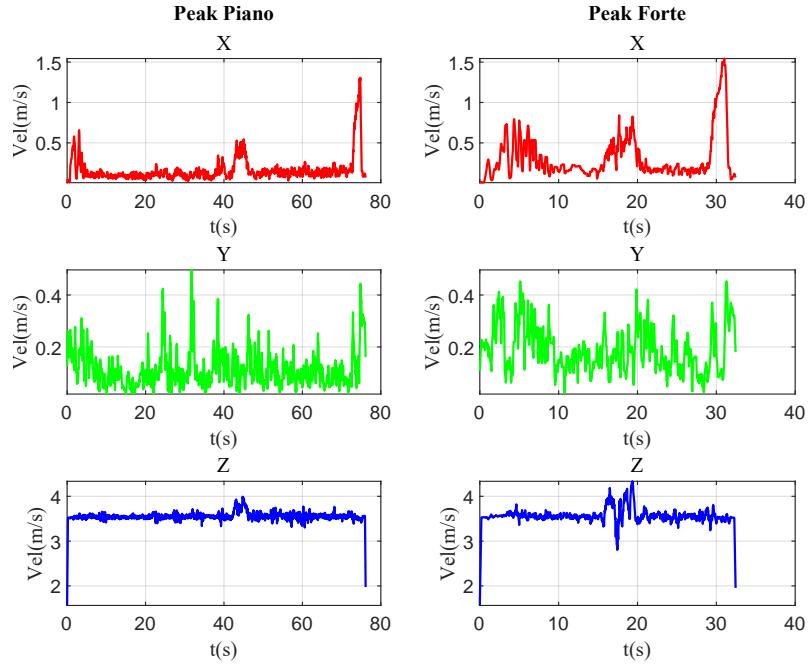


Figura 20: Distanza picco-picco della velocità su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Della curva al centro è visibile l'effetto che essa ha sulla velocità della bicicletta.

6.2 Curva

Durante la fase di curva gli indicatori che si sono rivelati maggiormente utili sono:

- media accelerazione in x
- varianza accelerazione in x
- varianza velocità in x
- distanza picco-picco velocità in x
- media *beccheggio* e *imbardata*
- deviazione standard *rollio* e *imbardata*
- massimo *beccheggio* e *imbardata*
- media campo magnetico in x
- varianza campo magnetico in x

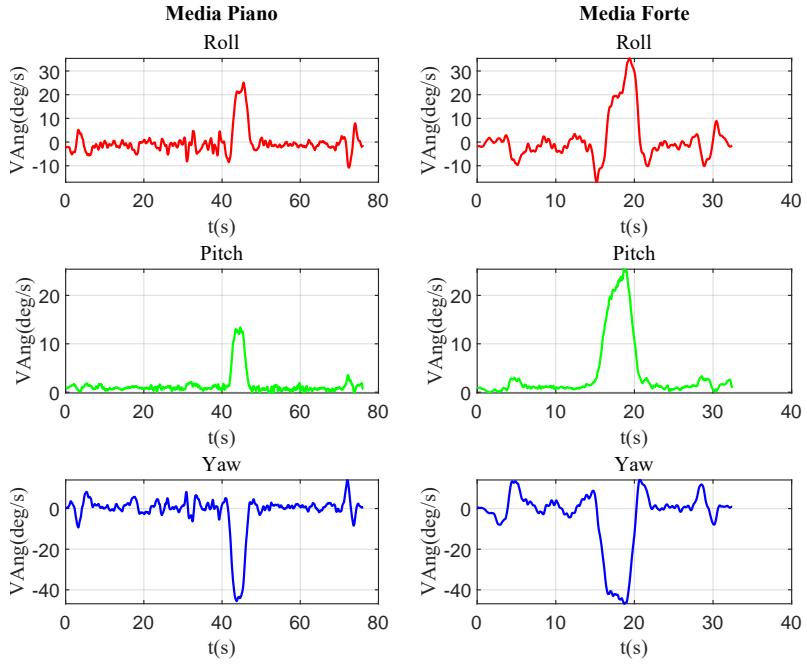


Figura 21: Media della velocità angolare su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull’asse *Roll* sono visibili un picco negativo, all’inizio, e uno positivo, alla fine della curva. Sull’asse *Pitch* è visibile un picco sempre positivo tanto pronunciato quanto più la curva è percorsa velocemente. Sull’asse *Yaw* il picco è positivo quando la curva viene eseguita in senso orario, negativo altrimenti.

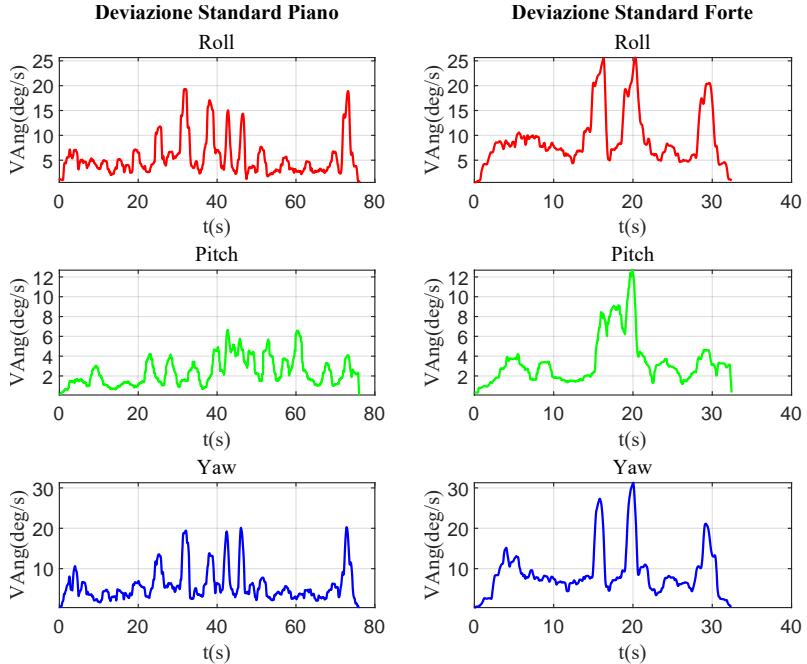


Figura 22: Deviazione standard della velocità angolare su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Oltre agli effetti dell’accelerazione sono visibili due picchi in corrispondenza dell’inizio e della fine della curva.

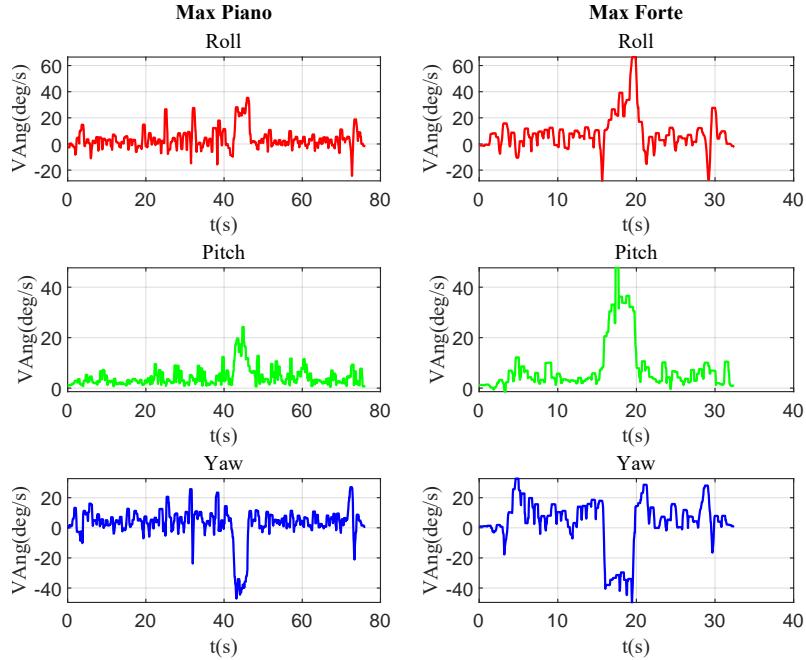


Figura 23: Massimo della velocità angolare su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). L'andamento è simile a quello della media della velocità angolare (Figura 21).

L'accelerazione media lungo l'asse x mostra una decelerazione durante le curve, rendendo così possibile una loro identificazione.

Anche in questo caso media rettificata, media quadratica, varianza e deviazione standard dell'accelerazione lungo x hanno un andamento molto simile e mostrano un picco durante le fasi di curva.

Per quanto riguarda la velocità, gli indicatori varianza e deviazione standard rilevano le curve in corrispondenza del rallentamento della bicicletta durante le stesse.

La velocità angolare è un ottimo modo per riconoscere le curve. La media della velocità angolare degli angoli di *rollio*, *beccheggio* e *imbardata* riesce a fornire una chiara indicazione di quando avviene una curva. Tra questi, si distinguono in particolare gli ultimi due. La media del *beccheggio* fornisce informazioni sull'entità della curva e sulla

velocità alla quale la si sta percorrendo: più ampia è la curva minore sarà il suo valore, maggiore è la velocità della bicicletta più questo sarà elevato. Il *beccheggio* non può, però, fornirci informazioni sul verso della curva stessa. Per risalire a questa informazione è stata selezionata l'*imbardata*. Anche il massimo di questi angoli si comporta in modo analogo.

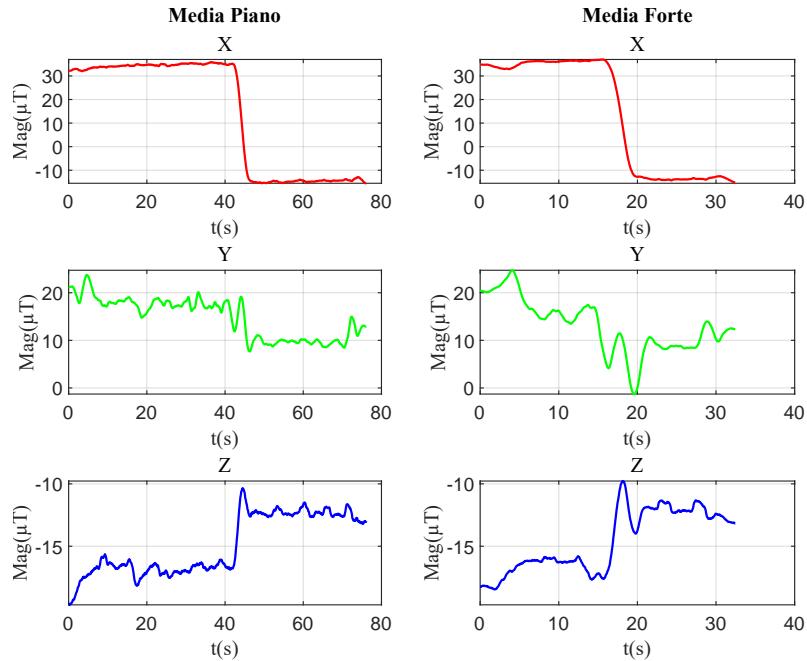


Figura 24: Media del campo magnetico su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull'asse X è visibile il cambio di orientamento della bicicletta durante la curva.

Infine, nella varianza e nella deviazione standard degli angoli di *rollio* e *imbardata* è possibile notare due picchi all'inizio e alla fine della curva.

La varianza del campo magnetico in x mostra dei picchi, più o meno pronunciati, a seconda dell'orientamento della bicicletta all'inizio e alla fine della curva.

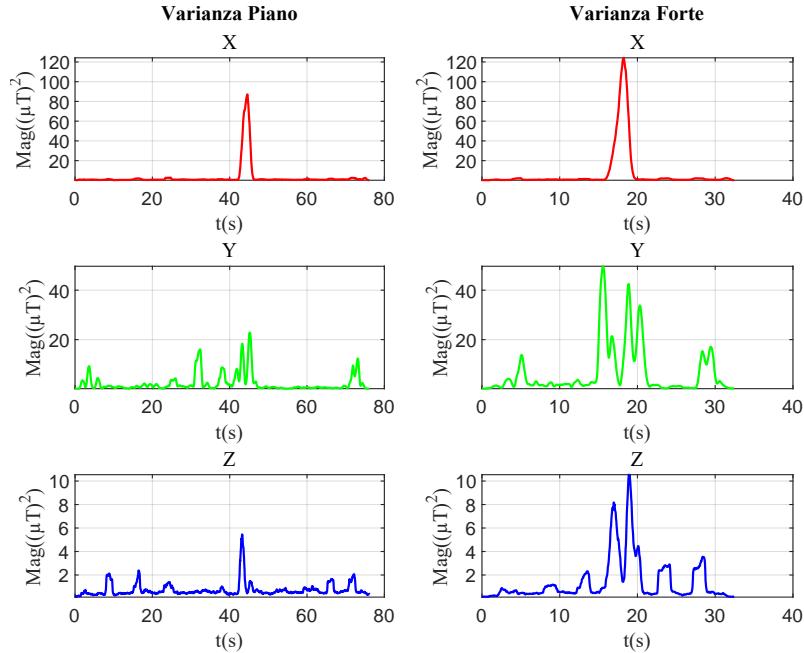


Figura 25: Varianza del campo magnetico su un percorso con una curva a U, al centro, in condizioni di guida tranquilla (a sinistra) e aggressiva (a destra). Sull’asse X è visibile un picco in corrispondenza del cambio di orientamento della bicicletta durante la curva, tanto più evidente quanto più la curva viene percorsa velocemente.

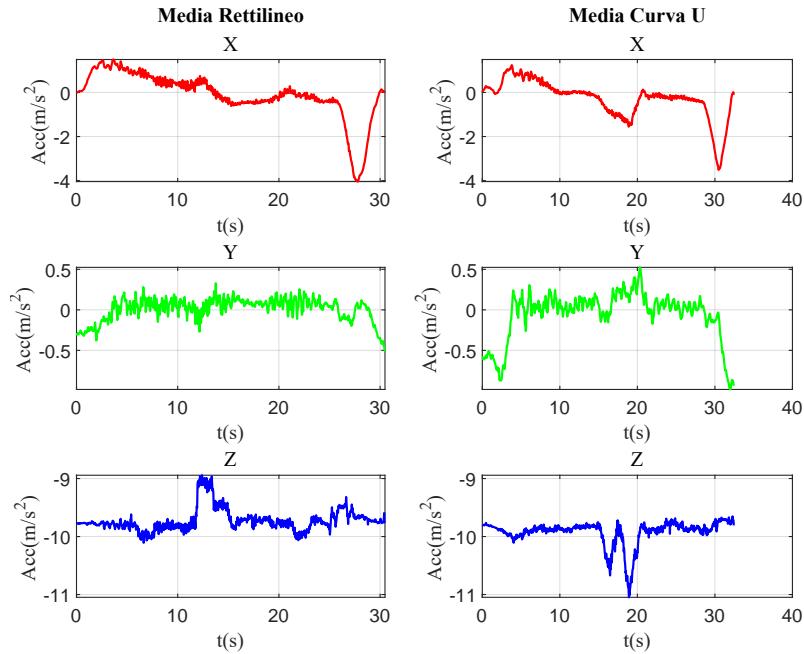


Figura 26: Media dell’accelerazione su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). Dalle immagini è possibile notare come questo indicatore riesca a evidenziare, sull’asse X, sia le accelerazioni, sia le curve e sia le frenate.

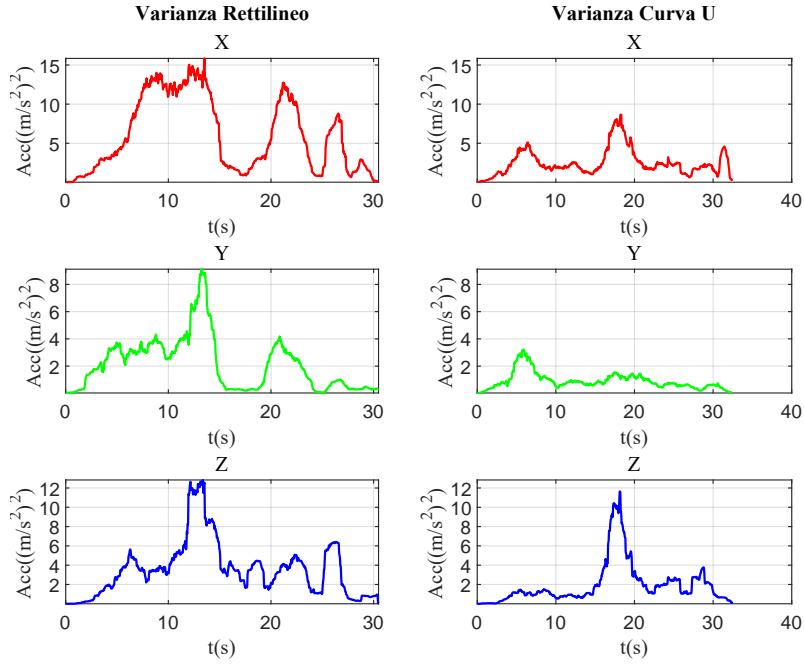


Figura 27: Varianza dell’accelerazione su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). Sull’asse X è possibile notare come questo indicatore riesca a evidenziare, sia le accelerazioni, sia le curve e sia le frenate. Sull’asse Y , invece, riesce a evidenziare solo le accelerazioni.

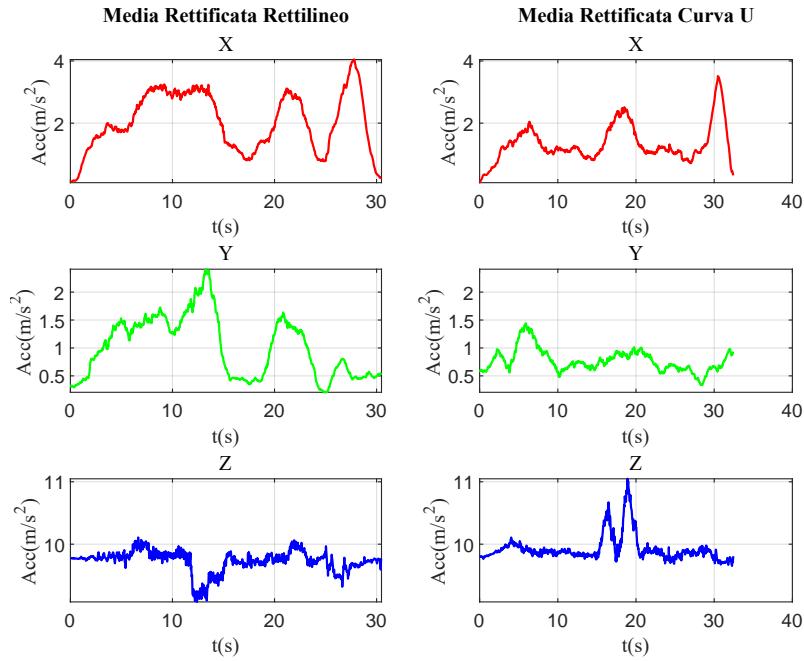


Figura 28: Media Rettificata dell’accelerazione su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). l’andamento dei tre assi è del tutto simile a quello della varianza (Figura 27) ma le frenate risultano un po’ più pronunciate.

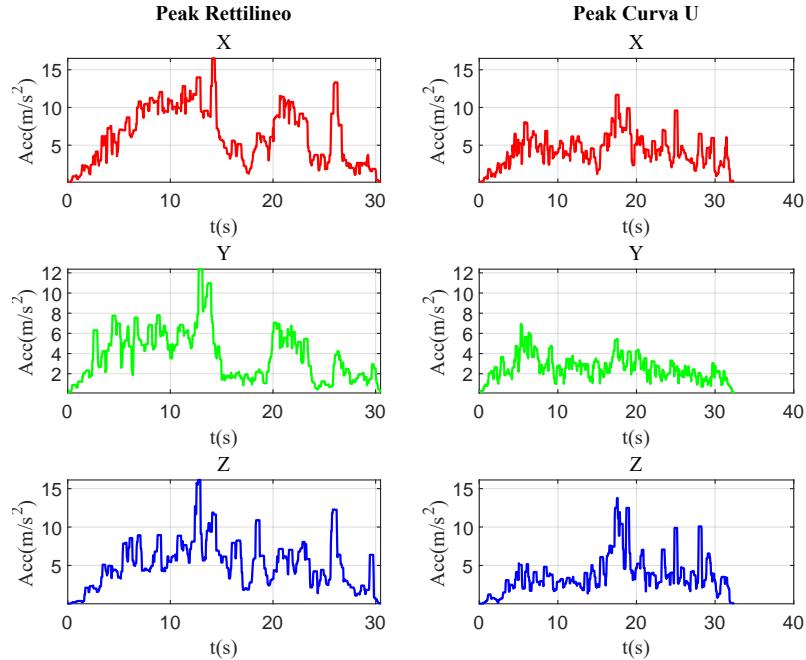


Figura 29: Distanza picco-picco dell’accelerazione su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). L’andamento dei tre assi è del tutto simile a quello della varianza (Figura 27).

6.3 Utilizzo degli Indicatori

Lo studio fatto serve per selezionare un’insieme di indicatori che consentano di dedurre l’impegno che il ciclista mette nel pedalare o in grado di identificare uno specifico evento come curve e frenate.

Dalla varianza dell’accelerazione dell’asse x è possibile rilevare in modo efficace l’oscillazione della stessa, dovuta alla foga che il ciclista mette nel pedalare. Maggiore è la varianza, tanto più il ciclista sta pedalando velocemente. Di conseguenza, quando il ciclista procede per inerzia senza pedalare, la varianza risulta essere molto bassa.

Grazie alla media dell’accelerazione in x si può, invece, dedurre l’efficacia della pedalata: più la media è elevata, maggiore è l’accelerazione della bicicletta e, quindi, maggiore è l’utilità dello sforzo del ciclista.

L’accoppiata varianza e media dell’accelerazione in x sono quindi in grado di determinare lo sforzo impiegato nel pedalare e la sua efficacia.

Dalla sola varianza non è però possibile distinguere la foga del ciclista dalle curve e dalle frenate. In queste occasioni, infatti, la varianza si comporta nello stesso modo.

Questo problema si può risolvere utilizzando la varianza dell’accelerazione lungo

l'asse y , che, pur con meno precisione, registra principalmente l'impegno del ciclista escludendo curva e frenate.

Un'altra possibilità è controllare quando la media dell'accelerazione diventa negativa. Questo succede solamente in quei momenti in cui la bicicletta rallenta, ovvero quando procede per inerzia e, soprattutto, quando curva o frena.

In alternativa, accoppiando la varianza dell'accelerazione dell'asse x con altri indicatori, in grado di rilevare specificatamente curve e frenate, è possibile discernere se il valore è riferibile alla foga o meno.

Analogo discorso si può fare con gli indicatori distanza picco-picco e media rettificata che hanno un andamento simile a quello della varianza.

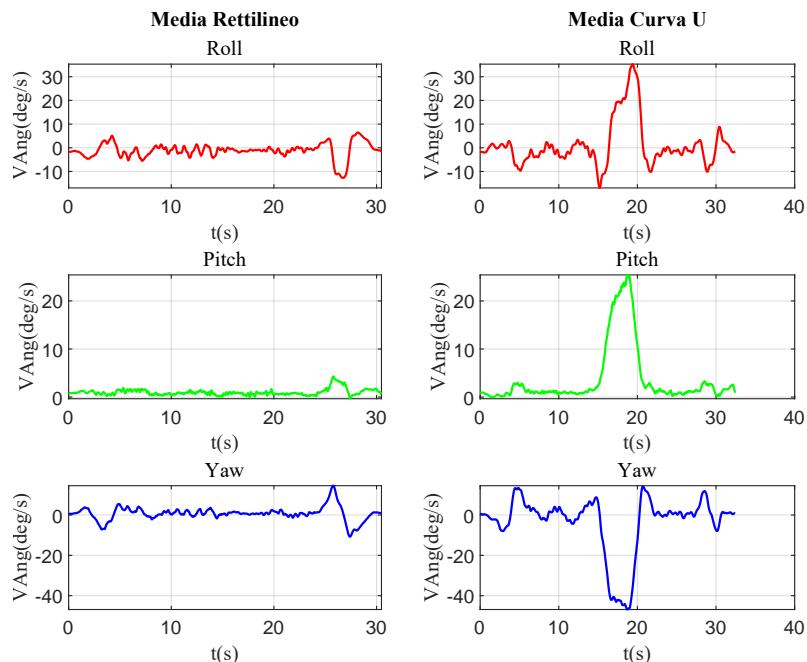


Figura 30: Media della velocità angolare su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). Dalle immagini si può notare come questo indicatore evidenzi molto bene le curve.

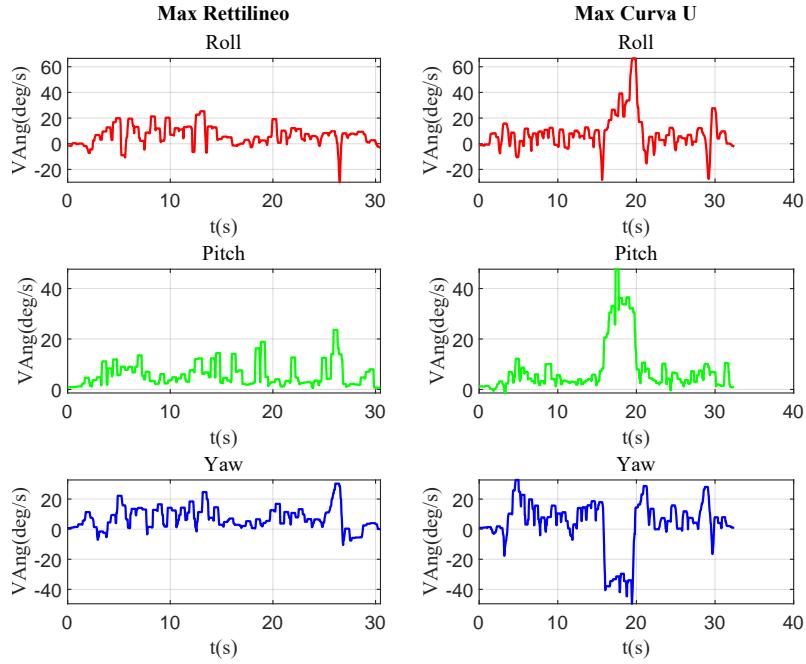


Figura 31: Massimo della velocità angolare su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). L’andamento di questo indicatore è molto simile a quello della media della velocità angolare (Figura 30).

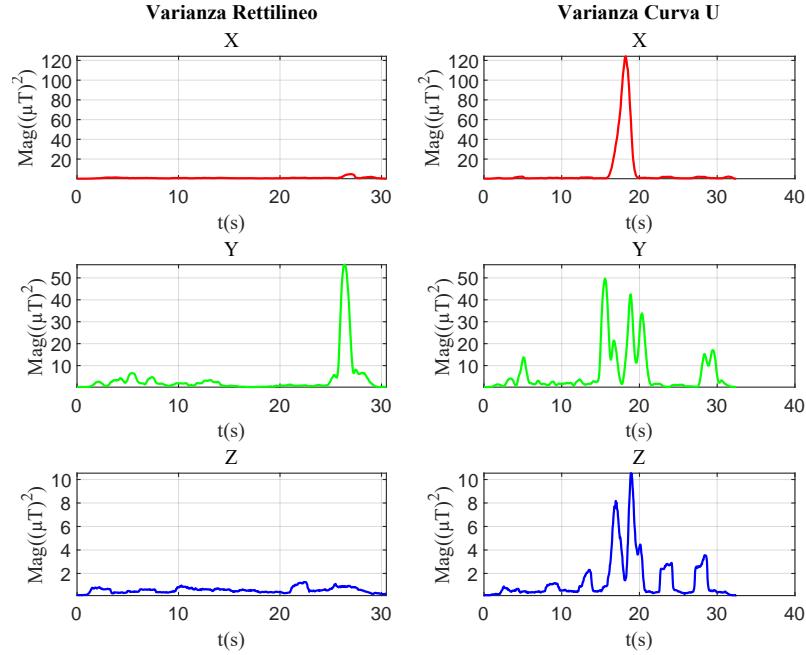


Figura 32: Varianza del campo magnetico su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). Sull’asse X è visibile un picco in corrispondenza del cambio di orientamento della bicicletta durante la curva, tanto più evidente quanto più la curva viene percorsa velocemente. Sui percorsi rettilinei, invece, non ci sono variazioni.

Per quanto riguarda il rilevamento delle curve e della loro intensità abbiamo la media o il massimo della velocità angolare di *beccheggio* e *imbardata*. In particolare il primo

si dimostra molto efficace a identificare la velocità alla quale viene percorsa in quanto, in base a quest'ultima, cambia l'inclinazione della bicicletta e, quindi, la velocità di rotazione attorno all'angolo di *beccheggio*. Grazie all'*imbardata*, invece, possiamo capire il verso di rotazione della bicicletta.

La varianza del campo magnetico lungo l'asse x , infine, riesce a identificare la differenza tra l'orientamento iniziale e finale della curva.

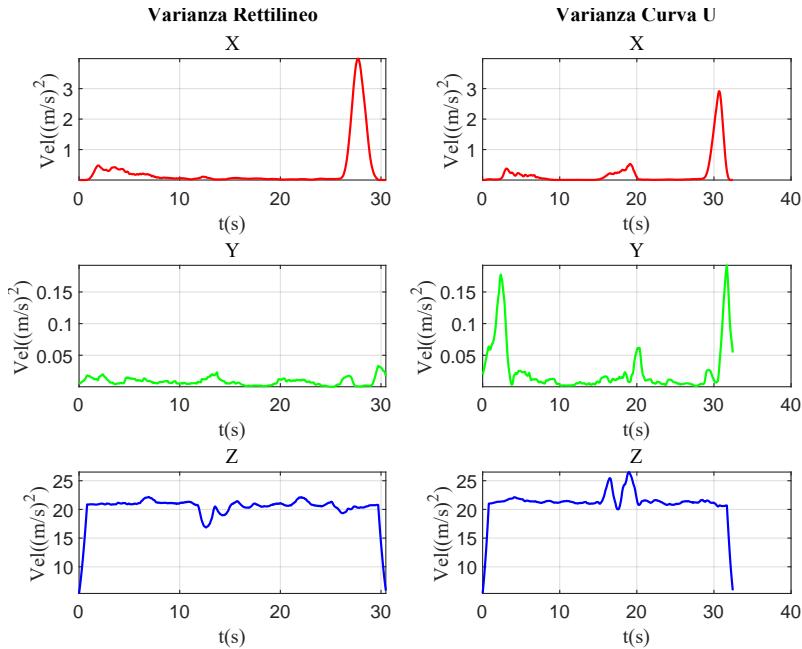


Figura 33: Varianza della velocità su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). Sull'asse X è visibile un picco in corrispondenza delle frenate. Inoltre, è possibile notare un leggero aumento in corrispondenza di forti aumenti di velocità. Questo si verifica quando la bicicletta parte da ferma o quando esce da una curva.

La frenata, invece, si rileva in modo efficace grazie varianza della velocità in x , che mostra un picco tanto più evidente quanto maggiore è la differenza di velocità della bicicletta prima e dopo la frenata. Per questo motivo è in grado di evidenziare anche curve e i momenti di forte aumento di velocità, in particolare quando la bicicletta parte da ferma, seppur in modo molto meno marcato.

Discorso analogo può essere fatto con la distanza picco-picco e con la deviazione standard, in questo caso, però, è meno evidente la differenza tra frenate e curve.

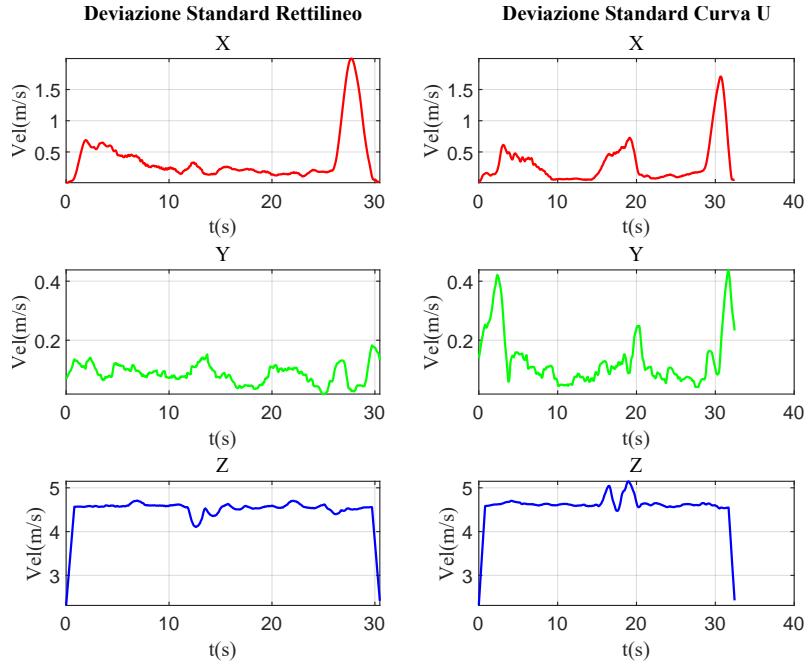


Figura 34: Deviazione Standard della velocità su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). L'andamento è simile a quello della varianza della velocità (Figura 33) con la differenza che i forti aumenti di velocità e l'uscita dalle curve risulta più evidente.

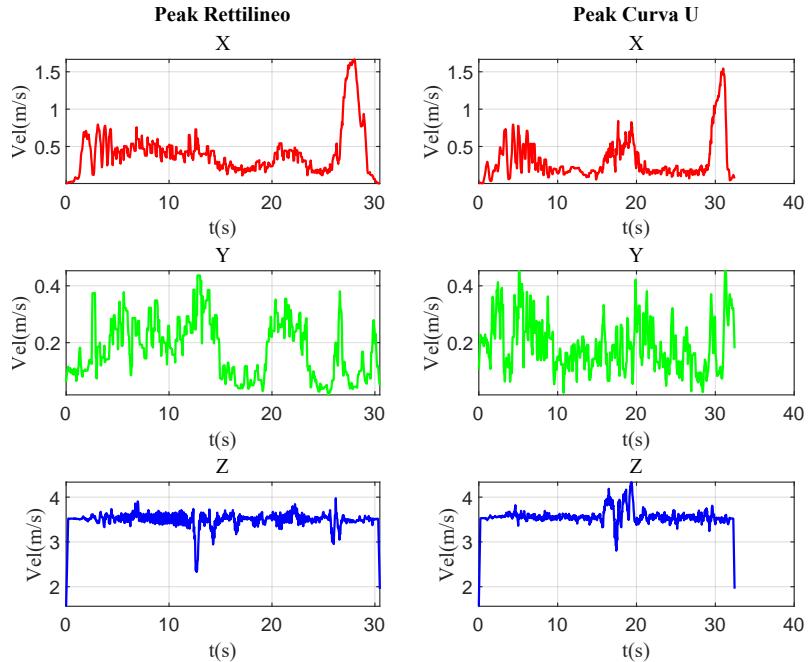


Figura 35: Distanza picco-picco della velocità su un percorso rettilineo (a sinistra) e curvo (a destra). L'andamento in X è simile a quello della deviazione standard della velocità (Figura 34).

7 Sviluppi Futuri

In questo capitolo andremo a trattare degli ulteriori rilievi che possono essere fatti al fine di migliorare la comprensione di ciò che sta accadendo. Inoltre faremo alcuni esempi di come è possibile interpretare i dati ottenuti dagli indicatori.

7.1 Ulteriori Rilievi

Per quanto riguarda la guida in piano, potrebbe essere interessante effettuare dei test relativi al cambio dei rapporti in corsa e analizzare come questo si riflette sugli indicatori. Probabilmente, l'effetto sarebbe visibile sulla media dell'accelerazione lungo l'asse x come una rampa, dovuta a una maggiore efficacia nel trasferimento della forza dai pedali alla ruota. Questo effetto si rifletterebbe anche sulla velocità e sarebbe, quindi, visibile anche nella varianza della stessa come un leggero picco, facilmente distinguibile dalle frenate, evento per cui la varianza è stata scelta come indicatore.

Un altro aspetto interessante da analizzare è l'effetto delle salite e delle discese sui dati raccolti. Questi cambi di pendenza infatti, variando l'angolo di *beccheggio*, influenzano tutte le misure prese. Affrontando una salita o una discesa si osserverebbe una variazione nella velocità angolare di questo angolo in funzione della velocità con cui ci avviciniamo alla pendenza e all'inclinazione stessa.

Inoltre, la rotazione attorno all'angolo di *beccheggio* è visibile nelle misure di accelerazione. Come discusso nella sezione relativa alla fisica, il sensore percepisce la gravità come un vettore orientato verso l'alto. Di conseguenza, durante una discesa, si rileva un'accelerazione costante diretta dietro al ciclista, mentre durante una salita, l'accelerazione sarà diretta in avanti.

Il problema dell'effetto della pendenza sulle misure di accelerazione può essere affrontato in due modi.

Si può rimuovere il vettore gravità dalle misure ma, durante le discese, la bicicletta sembrerebbe ferma in quanto, in questi tratti, la componente principale del movimento è proprio la gravità.

In alternativa si può cercare di capire quando ci stiamo muovendo su di un piano inclinato e aggiustare i dati di conseguenza. A tal fine si può utilizzare, per esempio, un sensore di pressione. Se la pressione aumenta, significa che ci si sta muovendo in discesa; se diminuisce, si sta affrontando una salita.

7.2 Utilizzo degli Indicatori

Gli indicatori precedentemente individuati possono essere utilizzati in diversi modi.

Un modo semplice è l'introduzione di valori soglia. Quando gli indicatori superano un determinato valore, si può dedurre che un certo evento si sia verificato. Per esempio, quando la media della velocità angolare supera una certa soglia, si sa che la bicicletta sta curvando; oppure, quando la varianza della velocità supera un certo livello, si può dedurre che la bicicletta sta frenando.

Questo approccio è stato utilizzato nell'articolo [2] al fine di dividere i rilievi fatti in categorie. Le categorie così ottenute sono state poi impiegate per addestrare un algoritmo di machine learning affinché potesse riconoscere gli eventi catalogati.

In letteratura, gli algoritmi comunemente utilizzati per riconoscere se delle misure appartengono a un determinato evento sono il K-Nearest Neighbors [3] e il Dynamic Time Warping [4, 5].

8 Conclusioni

In questa tesi abbiamo affrontato il tema dell'individuazione di indicatori per la caratterizzazione dello stile di guida di una bicicletta. Questo tipo di studio può avere diverse applicazioni, in particolare nell'ambito della sicurezza e dell'attività sportiva.

Grazie agli indicatori individuati è possibile stabilire l'aggressività di un ciclista e la sua abitudine ad adottare comportamenti pericolosi come zig-zagare, impennare e, grazie all'integrazione di ulteriori sensori come una videocamera, andare contromano.

Introducendo un sensore in grado di rilevare efficacemente la velocità della bicicletta, per esempio un GPS o un sensore magnetico agganciato alla ruota, è possibile calcolare la traiettoria della bicicletta.

Monitorando l'attività e lo stile di guida di un atleta è possibile migliorare le sue prestazioni. Integrando il sistema con sensori biometrici è possibile raccogliere informazioni sullo stato di salute e affaticamento del ciclista, permettendo così di adattare l'allenamento in base alle esigenze.

Un ulteriore campo di applicazione può essere il riconoscimento del pilota all'interno di un gruppo ristretto di persone, come un nucleo familiare, ricostruendo le abitudini e i pattern tipici nel modo di guidare del ciclista.

Bibliografia

- [1] Yao Chen, Ke Wang, and Jian John Lu. “Feature selection for driving style and skill clustering using naturalistic driving data and driving behavior questionnaire”. In: *Accident Analysis & Prevention* 185 (2023), p. 107022. ISSN: 0001-4575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107022>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457523000696>.
- [2] Yongfeng Ma, Wenlu Li, Kun Tang, Ziyu Zhang, and Shuyan Chen. “Driving style recognition and comparisons among driving tasks based on driver behavior in the online car-hailing industry”. In: *Accident Analysis & Prevention* 154 (2021), p. 106096. ISSN: 0001-4575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106096>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457521001275>.
- [3] Yuri USAMI, Kazuaki ISHIKAWA, Toshinori TAKAYAMA, Masao YANAGISAWA, and Nozomu TOGAWA. “Bicycle Behavior Recognition Using 3-Axis Acceleration Sensor and 3-Axis Gyro Sensor Equipped with Smartphone”. In: *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* E102.A (Aug. 2019), pp. 953–965. DOI: [10.1587/transfun.E102.A.953](https://doi.org/10.1587/transfun.E102.A.953).
- [4] Derick A. Johnson and Mohan M. Trivedi. “Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform”. In: (2011), pp. 1609–1615. DOI: [10.1109/ITSC.2011.6083078](https://doi.org/10.1109/ITSC.2011.6083078).
- [5] Thajchayapong S. Saiprasert C. Pholprasit T. “Detection of Driving Events using Sensory Data on Smartphone.” In: *Int. J. ITS Res.* 15 (2017), pp. 17–28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13177-015-0116-5>.