

Analisi Probabilistica degli Incidenti Stradali Causati da Attraversamenti Animali (APISCAA)

Vittorio Alzetta

Sommario—Durante la guida notturna in aree rurali, la probabilità di un improvviso attraversamento di animali selvatici rappresenta un rischio significativo. Sorge la domanda se sia preferibile ridurre la velocità, per diminuire lo spazio di frenata, oppure mantenerla elevata per minimizzare il tempo di esposizione al pericolo. La risposta non è intuitiva e richiede un'analisi quantitativa. Questo lavoro presenta uno studio basato su simulazioni Monte Carlo per valutare la probabilità di incidente in funzione della velocità del veicolo. I risultati mostrano una relazione non lineare tra velocità e rischio, identificando una "velocità critica" e una velocità di massimo rischio, fornendo conclusioni rilevanti per la sicurezza stradale.

Index Terms—Incidente stradale, sicurezza stradale, simulazione Monte Carlo, attraversamento animali, analisi del rischio, dinamica del veicolo.

I. INTRODUZIONE

Il conflitto tra veicoli e fauna selvatica è una causa rilevante di incidenti stradali, con implicazioni sia per la sicurezza degli automobilisti sia per la conservazione della fauna. La decisione del conducente sulla velocità da adottare in tratti stradali a rischio è un fattore cruciale che influenza l'esito di un potenziale incontro. Questo studio si propone di analizzare tale dilemma attraverso un approccio modellistico e computazionale, al fine di fornire una base quantitativa per le strategie di guida sicura.

II. MODELLO E METODOLOGIA

La simulazione si basa su un modello semplificato che cattura gli elementi essenziali del problema.

A. Componenti del Modello

Gli elementi chiave della simulazione sono:

- **Veicolo:** Caratterizzato da una velocità costante v .
- **Strada:** Definita da una lunghezza L .
- **Animali:** Caratterizzati da una posizione di attraversamento x_i e un istante di comparsa t_i . Il loro numero totale A in una simulazione è casuale, con un limite superiore A_{max} .

B. Condizione di Incidente

Per ogni animale generato (con posizione x_i e tempo di comparsa t_i), si valuta la posizione del veicolo, che al tempo $t = 0$ si trova in $x = 0$. Un incidente avviene se, all'istante t_i , il veicolo non ha spazio sufficiente per fermarsi prima di raggiungere la posizione dell'animale, ma non ha ancora superato tale punto. La posizione del veicolo al tempo t_i è $x_{auto}(t_i) = v \cdot t_i$. Lo spazio di frenata S_f è calcolato con la

formula: $S_f = \frac{v^2}{k}$, dove $k = 15.7$ è una costante legata al coefficiente d'attrito. La condizione di incidente è quindi:

$$x_i - S_f < v \cdot t_i < x_i \quad (1)$$

Se $v \cdot t_i \geq x_i$, il veicolo ha già superato il punto. Se $v \cdot t_i \leq x_i - S_f$, il veicolo ha spazio per arrestarsi.

III. IMPLEMENTAZIONE DELLA SIMULAZIONE

È stato sviluppato un programma in C per eseguire un gran numero di simulazioni (1 milione di prove per ogni velocità) e stimare la probabilità di incidente.

A. Generazione degli Animali

La funzione `genera_animali` (Listato 1) inizializza lo scenario per ogni prova. Essa genera un numero casuale di animali ($A \leq A_{max}$) e assegna a ciascuno una posizione x_i e un tempo di comparsa t_i distribuiti uniformemente.

```
1 int genera_animali(struct animale animali[], int
  A_max, int L, int T_max) {
2   int animali_generati = rand() % (A_max + 1);
3   for (int i = 0; i < animali_generati; i++) {
4     animali[i].posizione = (rand() % (L*1000))
      /1000.0;
5     animali[i].tempo = (rand() % (T_max*1000))
      /1000.0;
6   }
7   return animali_generati;
8 }
```

Listing 1. Funzione per la generazione casuale di animali.

B. Verifica della Collisione

La funzione `verifica_incidente` (Listato 2) implementa la logica descritta dalla Eq. (1) per un singolo animale.

```
1 bool verifica_incidente(struct animale anim, int
  vel_auto) {
2   double spazio_frenata = (double)vel_auto *
    vel_auto / 15.7;
3   double pos_auto = vel_auto * anim.tempo;
4
5   if ((anim.posizione-spazio_frenata < pos_auto)
    && (pos_auto < anim.posizione)) {
6     return true;
7   }
8   return false;
9 }
```

Listing 2. Funzione per la verifica della condizione di incidente.

C. Ciclo di Simulazione Principale

La funzione `calcolo_prob` (Listato 3) orchestra l'intera simulazione, iterando sulle velocità e contando gli incidenti per calcolare la probabilità finale.

```
1 void calcolo_prob(..., double prob_incidente[]) {
2     for (int v = vel_min; v <= vel_max; v++) {
3         int n_incidenti = 0;
4         for (int p = 0; p < NUM_PROVE; p++) {
5             int n_animali = genera_animali(...);
6             bool incidente_nella_prova = false;
7             for (int i = 0; i < n_animali; i++) {
8                 if (verifica_incidente(animali[i], v
9             )) {
10                 incidente_nella_prova = true;
11                 break;
12             }
13             if (incidente_nella_prova) n_incidenti
14             ++;
15         }
16         prob_incidente[v-vel_min] = (double)
17         n_incidenti / NUM_PROVE;
18     }
19 }
```

Listing 3. Estratto della funzione principale di calcolo.

IV. ANALISI DEI RISULTATI

Le simulazioni sono state eseguite per un tratto di strada di $L = 1$ km, un intervallo di tempo di comparsa $T_{max} = 60$ s e un range di velocità da 60 km/h a 160 km/h. La Fig. 1 mostra i risultati per diversi valori di A_{max} (da 1 a 5).

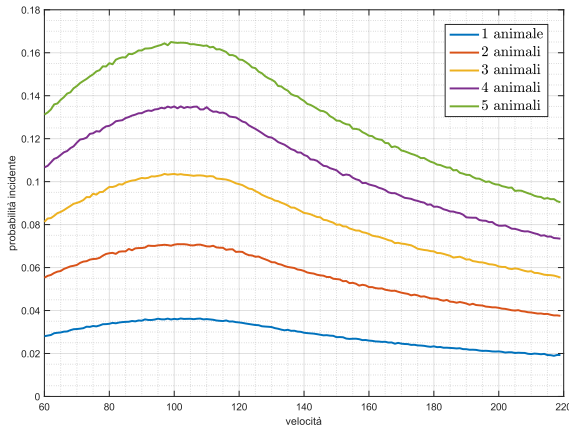


Figura 1. Probabilità di incidente in funzione della velocità del veicolo per diversi valori di A_{max} (numero massimo di animali). Simulazione su una strada di $L = 1$ km con un tempo massimo di comparsa $T_{max} = 60$ s. La probabilità prima cresce con la velocità, raggiunge un picco, e poi decresce.

A. Andamento della Probabilità

Come visibile in Fig. 1, tutte le curve mostrano un andamento simile e controintuitivo:

- 1) **Fase Crescente:** A basse velocità, un aumento di v incrementa lo spazio di frenata S_f più rapidamente di quanto riduca il tempo di esposizione al rischio.

- 2) **Picco di Rischio:** La probabilità raggiunge un massimo a circa $v_{max_risk} = 103$ km/h. A questa velocità, il rischio è il più elevato.
- 3) **Fase Decrescente:** Superato il picco, l'aumento della velocità riduce drasticamente il tempo di permanenza sul tratto stradale, e di conseguenza la probabilità d'incidente.

B. Velocità Critica

Un punto di particolare interesse è la "velocità critica" (v_{crit}), la velocità alla quale la probabilità di incidente ritorna ad essere uguale a quella di riferimento ($v_{ref} = 60$ km/h). Per le condizioni testate, $v_{crit} \approx 148$ km/h. Ciò implica che, nel modello, guidare a 148 km/h comporta lo stesso rischio di collisione che guidare a 60 km/h.

C. Indipendenza da A_{max}

Il fatto che v_{max_risk} e v_{crit} non dipendano da A_{max} può essere spiegato osservando che A_{max} agisce come un fattore di scala. Come mostrato in Fig. 2, le curve per $A_{max} > 1$ sono approssimabili moltiplicando la curva base ($A_{max} = 1$) per un coefficiente.

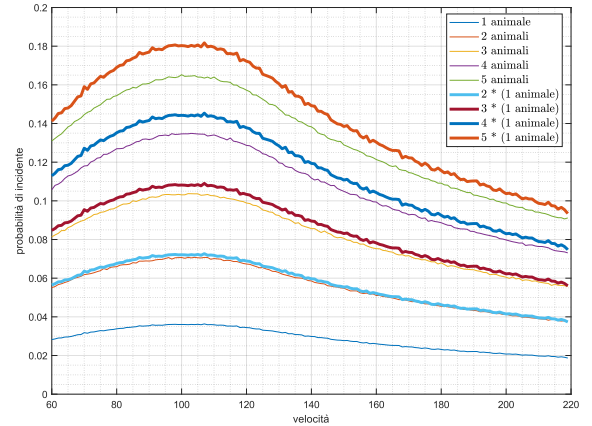


Figura 2. Confronto tra la curva di probabilità per $A_{max} = 1$ e le sue versioni scalate. La somiglianza con le curve simulate in Fig. 1 suggerisce che il numero di animali agisce come fattore di scala, senza alterare la posizione dei punti critici.

V. CONCLUSIONI

Questo studio ha dimostrato la complessa relazione tra velocità e rischio di incidenti con fauna selvatica. I risultati indicano l'esistenza di una velocità di massimo rischio (≈ 103 km/h) e di una "velocità critica" (≈ 148 km/h).

È fondamentale sottolineare che il modello non tiene conto della severità dell'impatto. Pertanto, sebbene a 148 km/h la probabilità di incidente sia la stessa che a 60 km/h, le conseguenze sarebbero catastrofiche. Le conclusioni a cui si giunge non intendono rappresentare un invito a superare i limiti di velocità, ma mirano a offrire una comprensione più articolata delle dinamiche del rischio. Che poi da questa analisi emerga una certa, curiosa, giustificazione alla guida ad alte velocità... è, naturalmente, del tutto incidentale.