

An Integrated Modelling and Simulation Framework for Alpine Skiing Dynamics: Combining Empirical Data and Cellular Automaton Approaches



Doctoral thesis

for

the award of the doctoral degree

of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences

of the University of Cologne

submitted by

Buchuan Zhang

accepted in the year 2025

Reviewers:

Prof. Dr. Andreas Schadschneider

Prof. Dr. Michael Schreckenberg

Abstract

This doctoral dissertation advances the understanding of alpine skiing dynamics by developing an integrated framework that combines conceptual modelling, empirical trajectory analysis, and advanced simulations to explore skier movement and efficiency under diverse environmental and physical conditions. Motivated by the increasing importance of safety and slope management in modern skiing, this research addresses a critical gap: the lack of comprehensive models that capture both the environmental forces acting on skiers and their behavioural responses on the slopes.

The research unfolds in four interrelated stages. First, it introduces a foundational modelling concept designed to simulate skier traffic on alpine slopes, using principles inspired by pedestrian and vehicular flow models but adapted to the unique dynamics of skiing. In the second phase, the focus shifts to the extraction and correction of real-world skier trajectory data. Leveraging video footage from various skiing environments, the study applies rigorous correction techniques to address distortions caused by camera angles, lens effects, and perspective errors. The third stage conducts a comprehensive statistical analysis of the corrected trajectory data. Here, the research identifies key behavioural markers such as turning points, defined by combinations of velocity shifts and curvature changes; minimum distances between skiers, which reveal patterns of interaction and implicit safety margins; and the fundamental diagram, illustrating the relationship between skier density, speed, and flow. Notably, the findings draw intriguing parallels between skier traffic and other self-driven systems, such as pedestrian crowds and ant trails, highlighting underlying universal principles.

Building upon this empirical foundation, the fourth phase develops a cellular automaton (CA)-based simulation model that integrates six crucial factors: slope angle, surface friction, boundary constraints, terrain curvature, aerodynamic drag, and directional inertia. Results demonstrate that slope angle serves as the primary driver of speed, while surface friction and aerodynamic drag increase resistive forces, thereby reducing overall efficiency. Boundary effects, although minimal on wide slopes, play a significant role in shaping lateral motion and path optimization. Terrain curvature affects turning dynamics, especially on irregular or challenging surfaces, while directional inertia enhances straight-line motion but limits a skier's adaptability when responding to slope variations.

In conclusion, the research offers valuable contributions to sports science, particularly in improving slope design, enhancing safety protocols, and informing athlete training strategies. Beyond practical applications, the findings also enrich our theoretical understanding of human-environment interactions in high-speed, outdoor sports settings.

Zusammenfassung

Diese Dissertation fördert das Verständnis der Dynamik des alpinen Skisports durch die Entwicklung eines integrierten Rahmens, der konzeptionelle Modellierung, empirische Trajektorienanalyse und fortschrittliche Simulationen kombiniert, um die Bewegung und Effizienz von Skifahrern unter verschiedenen Umwelt- und physikalischen Bedingungen zu untersuchen. Motiviert durch die zunehmende Bedeutung von Sicherheit und Pistenmanagement im modernen Skisport, schließt diese Forschung eine kritische Lücke: den Mangel an umfassenden Modellen, die sowohl die auf Skifahrer einwirkenden Umweltkräfte als auch deren Verhalten auf der Piste erfassen.

Die Forschung verläuft in vier miteinander verbundenen Phasen. Zunächst wird ein grundlegendes Modellierungskonzept zur Simulation des Skifahrerverkehrs auf alpinen Pisten vorgestellt. Dabei werden Prinzipien verwendet, die von Fußgänger- und Fahrzeugflussmodellen inspiriert, aber an die einzigartige Dynamik des Skifahrens angepasst sind. In der zweiten Phase liegt der Fokus auf der Extraktion und Korrektur realer Skifahrer-Trajektoriendaten. Anhand von Videomaterial aus verschiedenen Ski-umgebungen wendet die Studie rigorose Korrekturtechniken an, um Verzerrungen durch Kamerawinkel, Linseneffekte und Perspektivfehler zu beheben. In der dritten Phase erfolgt eine umfassende statistische Analyse der korrigierten Trajektoriendaten. Die Forschung identifiziert dabei wichtige Verhaltensmarker wie Wendepunkte, definiert durch Kombinationen von Geschwindigkeits- und Krümmungsänderungen; Mindestabstände zwischen Skifahrern, die Interaktionsmuster und implizite Sicherheitsmargen aufzeigen; und das Fundamentaldiagramm, das den Zusammenhang zwischen Skifahrerdichte, Geschwindigkeit und Verkehrsfluss veranschaulicht. Die Ergebnisse ziehen insbesondere faszinierende Parallelen zwischen dem Skifahrerverkehr und anderen selbstfahrenden Systemen wie Fußgängermengen und Ameisenstraßen und verdeutlichen die zugrunde liegenden universellen Prinzipien.

Aufbauend auf dieser empirischen Grundlage entwickelt die vierte Phase ein auf einem zellulären Automaten (CA) basierendes Simulationsmodell, das sechs entscheidende Faktoren integriert: Hangneigung, Oberflächenreibung, Randbedingungen, Geländekrümmung, Luftwiderstand und Richtungsträgheit. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hangneigung der Haupttreiber der Geschwindigkeit ist, während Oberflächenreibung und Luftwiderstand die Widerstandskräfte erhöhen und dadurch die Gesamteffizienz

verringern. Randeffekte, obwohl auf breiten Pisten minimal, spielen eine bedeutende Rolle bei der Gestaltung der Querbewegung und der Wegoptimierung. Die Geländekrümmung beeinflusst die Kurvendynamik, insbesondere auf unregelmäßigen oder anspruchsvollen Oberflächen. Die Richtungsträgheit hingegen verbessert die geradlinige Bewegung, schränkt jedoch die Anpassungsfähigkeit des Skifahrers an Hangvariationen ein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Forschung wertvolle Beiträge zur Sportwissenschaft liefert, insbesondere zur Verbesserung der Pistengestaltung, der Verbesserung von Sicherheitsprotokollen und der Entwicklung von Trainingsstrategien für Athleten. Über die praktische Anwendung hinaus bereichern die Ergebnisse auch unser theoretisches Verständnis der Mensch-Umwelt-Interaktionen im Hochgeschwindigkeitssport im Freien.