

## Article

# Performance and Biomechanics in the Flight Period of Ski Jumping: Influence of Ski Attitude

Lin Zhang <sup>1</sup>, Xiong Li <sup>2</sup>, Xin Wang <sup>1,\*</sup>, Long Chen <sup>2</sup>, and Tianyu Zhao <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Kinesiology, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, China

<sup>2</sup> Department of Mechanics, Northeastern University, Shenyang 110819, China

\* Correspondence: wangxin@syty.edu.cn (X.W.); zhaotianyu@mail.neu.edu.cn (T.Z.)

## Supplementary Materials:

**Table S1.** The database for the aerodynamic forces and moments of the ski jumping ski.

$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$	$\gamma/^\circ$	$C_L$	$C_D$	$C_L / C_D$	$M_s$	$M_L$	$M_D$
	0	0	$3.84 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$2.98 \times 10^{-2}$	$-4.43 \times 10^{-4}$	$3.04 \times 10^{-4}$	$-7.06 \times 10^{-6}$
		10	$3.77 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$2.92 \times 10^{-2}$	$-1.24 \times 10^{-3}$	$8.96 \times 10^{-5}$	$-7.06 \times 10^{-6}$
		20	$3.59 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$2.78 \times 10^{-2}$	$-1.23 \times 10^{-3}$	$-1.27 \times 10^{-4}$	$-7.06 \times 10^{-6}$
		30	$3.29 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$2.55 \times 10^{-2}$	$-1.19 \times 10^{-3}$	$-3.40 \times 10^{-4}$	$-7.06 \times 10^{-6}$
		40	$2.9 \times 10^{-4}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$2.25 \times 10^{-2}$	$-1.11 \times 10^{-3}$	$-5.41 \times 10^{-4}$	$-7.06 \times 10^{-6}$
	10	0	$8.48 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-2}$	0.554	$-3.38 \times 10^{-3}$	$-8.57 \times 10^{-4}$	$-9.27 \times 10^{-4}$
		10	0.0361	$1.72 \times 10^{-2}$	2.12	$-7.09 \times 10^{-3}$	$-1.97 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-4}$
		20	0.0513	$2.03 \times 10^{-2}$	2.53	$-1.11 \times 10^{-2}$	$-3.89 \times 10^{-3}$	$3.76 \times 10^{-4}$
		30	0.0550	$2.32 \times 10^{-2}$	2.37	$-1.32 \times 10^{-2}$	$-7.15 \times 10^{-3}$	$4.97 \times 10^{-4}$
		40	0.0572	$2.63 \times 10^{-2}$	2.18	$-1.36 \times 10^{-2}$	$-1.02 \times 10^{-2}$	$3.17 \times 10^{-4}$
	20	0	0.0205	$1.99 \times 10^{-2}$	1.03	$-7.85 \times 10^{-3}$	$-2.10 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-3}$
		10	0.114	$2.88 \times 10^{-2}$	3.96	$-2.52 \times 10^{-2}$	$-6.13 \times 10^{-3}$	$5.85 \times 10^{-3}$
		20	0.157	$4.52 \times 10^{-2}$	3.47	$-3.13 \times 10^{-2}$	$-1.34 \times 10^{-2}$	$6.40 \times 10^{-3}$
		30	0.187	$6.63 \times 10^{-2}$	2.83	$-3.84 \times 10^{-2}$	$-2.29 \times 10^{-2}$	$7.70 \times 10^{-3}$
		40	0.208	$8.82 \times 10^{-2}$	2.36	$-3.10 \times 10^{-2}$	$-3.10 \times 10^{-2}$	$6.53 \times 10^{-3}$
	30	0	0.0298	$2.86 \times 10^{-2}$	1.04	$-1.10 \times 10^{-2}$	$-3.60 \times 10^{-3}$	$5.49 \times 10^{-3}$
		10	0.208	$5.12 \times 10^{-2}$	4.06	$-4.35 \times 10^{-2}$	$-1.12 \times 10^{-2}$	$1.87 \times 10^{-3}$
		20	0.291	$9.46 \times 10^{-2}$	3.08	$-5.64 \times 10^{-2}$	$-2.67 \times 10^{-2}$	$2.27 \times 10^{-3}$
		30	0.422	$1.62 \times 10^{-2}$	2.61	$-7.75 \times 10^{-2}$	$-2.42 \times 10^{-2}$	$2.72 \times 10^{-3}$
		40	0.387	$2.07 \times 10^{-2}$	1.87	$-6.89 \times 10^{-2}$	$-6.12 \times 10^{-2}$	$2.45 \times 10^{-3}$
	40	0	0.0338	$4.13 \times 10^{-2}$	0.819	$-1.19 \times 10^{-2}$	$-5.13 \times 10^{-3}$	$8.97 \times 10^{-3}$
		10	0.303	$8.51 \times 10^{-2}$	3.56	$-5.27 \times 10^{-2}$	$-1.55 \times 10^{-2}$	$3.39 \times 10^{-3}$
		20	0.406	$1.57 \times 10^{-2}$	2.59	$-6.72 \times 10^{-2}$	$-3.59 \times 10^{-2}$	$4.08 \times 10^{-3}$
		30	0.497	$2.52 \times 10^{-2}$	1.97	$-7.72 \times 10^{-2}$	$-5.93 \times 10^{-2}$	$4.40 \times 10^{-3}$
		40	0.536	$3.42 \times 10^{-2}$	1.57	$-8.25 \times 10^{-2}$	$-8.27 \times 10^{-2}$	$4.48 \times 10^{-3}$
10	0	0	0.0862	$3.48 \times 10^{-2}$	2.48	$-2.39 \times 10^{-2}$	$7.95 \times 10^{-4}$	$-1.95 \times 10^{-3}$
		10	0.0886	$3.50 \times 10^{-2}$	2.53	$-2.32 \times 10^{-2}$	$-3.25 \times 10^{-3}$	$-2.56 \times 10^{-3}$
		20	0.0876	$3.44 \times 10^{-2}$	2.55	$-2.16 \times 10^{-2}$	$-7.38 \times 10^{-3}$	$-3.29 \times 10^{-3}$

**Citation:** Zhang, L.; Li, X.; Wang, X.; Chen, L.; Zhao, T. Performance and Biomechanics in the Flight Period of Ski Jumping: Influence of Ski Attitude. *Biology* **2022**, *11*, 671. <https://doi.org/10.3390/biology11050671>

Academic Editors: Filip Kukić, Jay Dawes, Robin Orr and Katie M. Heinrich

Received: 4 April 2022

Accepted: 24 April 2022

Published: 27 April 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

		30	0.0816	$3.28 \times 10^{-2}$	2.48	$-1.80 \times 10^{-2}$	$-1.06 \times 10^{-2}$	$-3.90 \times 10^{-3}$
		40	0.0680	$2.98 \times 10^{-2}$	2.27	$-1.38 \times 10^{-2}$	$-1.19 \times 10^{-2}$	$-4.01 \times 10^{-3}$
		0	0.156	$4.80 \times 10^{-2}$	3.25	$-2.92 \times 10^{-2}$	$4.89 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-3}$
		10	0.174	$5.75 \times 10^{-2}$	3.02	$-3.23 \times 10^{-2}$	$-4.63 \times 10^{-3}$	$3.62 \times 10^{-4}$
	10	20	0.166	$6.28 \times 10^{-2}$	2.64	$-3.37 \times 10^{-2}$	$-1.04 \times 10^{-2}$	$-4.34 \times 10^{-4}$
		30	0.136	$6.06 \times 10^{-2}$	2.24	$-3.45 \times 10^{-2}$	$-1.84 \times 10^{-2}$	$-1.36 \times 10^{-3}$
		40	0.111	$5.93 \times 10^{-2}$	1.86	$-2.97 \times 10^{-2}$	$-2.36 \times 10^{-2}$	$-2.67 \times 10^{-3}$
		0	0.248	$7.40 \times 10^{-2}$	3.34	$-5.02 \times 10^{-2}$	$-3.74 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-2}$
		10	0.296	0.102	2.91	$-5.82 \times 10^{-2}$	$-1.19 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-2}$
	20	20	0.347	0.135	2.56	$-5.93 \times 10^{-2}$	$-2.04 \times 10^{-2}$	$8.27 \times 10^{-3}$
		30	0.369	0.172	2.15	$-5.67 \times 10^{-2}$	$-3.10 \times 10^{-2}$	$3.79 \times 10^{-3}$
		40	0.329	0.187	1.75	$-4.54 \times 10^{-2}$	$-3.84 \times 10^{-2}$	$-2.28 \times 10^{-3}$
		0	0.328	0.100	3.28	$-6.42 \times 10^{-2}$	$-9.46 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-2}$
		10	0.422	0.162	2.61	$-7.75 \times 10^{-2}$	$-2.42 \times 10^{-2}$	$2.72 \times 10^{-2}$
	30	20	0.480	0.223	2.15	$-8.86 \times 10^{-2}$	$-4.07 \times 10^{-2}$	$2.84 \times 10^{-2}$
		30	0.554	0.309	1.79	$-8.97 \times 10^{-2}$	$-5.85 \times 10^{-2}$	$2.26 \times 10^{-2}$
		40	0.554	0.396	1.39	$-8.68 \times 10^{-2}$	$-7.73 \times 10^{-2}$	$1.50 \times 10^{-2}$
		0	0.382	0.125	3.06	$-6.58 \times 10^{-2}$	$-1.32 \times 10^{-2}$	$4.01 \times 10^{-2}$
		10	0.501	0.214	2.35	$-8.27 \times 10^{-2}$	$-3.35 \times 10^{-2}$	$4.54 \times 10^{-2}$
	40	20	0.587	0.313	1.88	$-9.49 \times 10^{-2}$	$-5.56 \times 10^{-2}$	$4.72 \times 10^{-2}$
		30	0.630	0.403	1.56	-0.102	$-7.78 \times 10^{-2}$	$4.59 \times 10^{-2}$
		40	0.613	0.530	1.16	-0.109	-0.113	$4.26 \times 10^{-2}$
		0	0.239	0.114	2.11	$-5.92 \times 10^{-2}$	$2.46 \times 10^{-3}$	$-5.47 \times 10^{-3}$
		10	0.251	0.118	2.13	$-6.10 \times 10^{-2}$	$-8.33 \times 10^{-3}$	$-9.32 \times 10^{-3}$
	0	20	0.308	0.140	2.20	$-4.92 \times 10^{-2}$	$-1.26 \times 10^{-2}$	$-1.25 \times 10^{-2}$
		30	0.307	0.139	2.22	$-4.33 \times 10^{-2}$	$-2.07 \times 10^{-2}$	$-1.75 \times 10^{-2}$
		40	0.246	0.115	2.14	$3.91 \times 10^{-2}$	$-2.81 \times 10^{-2}$	$-1.82 \times 10^{-2}$
		0	0.432	0.186	2.33	$-6.18 \times 10^{-2}$	$4.37 \times 10^{-5}$	$-7.21 \times 10^{-4}$
		10	0.340	0.164	2.07	$-6.49 \times 10^{-2}$	$-1.12 \times 10^{-2}$	$-2.04 \times 10^{-3}$
	20	20	0.266	0.145	1.84	$-6.52 \times 10^{-2}$	$-2.26 \times 10^{-2}$	$-4.18 \times 10^{-3}$
		30	0.240	0.144	1.67	$-5.89 \times 10^{-2}$	$-3.31 \times 10^{-2}$	$-8.32 \times 10^{-3}$
		40	0.242	0.159	1.52	$-5.32 \times 10^{-2}$	$-4.14 \times 10^{-2}$	$-1.34 \times 10^{-2}$
		0	0.515	0.220	2.34	$-9.01 \times 10^{-2}$	$-6.13 \times 10^{-3}$	$1.75 \times 10^{-2}$
		10	0.581	0.289	2.01	$-9.74 \times 10^{-2}$	$-1.96 \times 10^{-2}$	$1.34 \times 10^{-2}$
	20	20	0.569	0.330	1.72	$-8.60 \times 10^{-2}$	$-2.96 \times 10^{-2}$	$4.22 \times 10^{-3}$
		30	0.382	0.263	1.45	$-7.85 \times 10^{-2}$	$-4.75 \times 10^{-2}$	$-1.33 \times 10^{-3}$
		40	0.279	0.236	1.18	$-6.85 \times 10^{-2}$	$-5.89 \times 10^{-2}$	$-6.73 \times 10^{-3}$
		0	0.561	0.255	2.20	$-9.79 \times 10^{-2}$	$-1.77 \times 10^{-2}$	$3.44 \times 10^{-2}$
		10	0.634	0.338	1.88	-0.115	$-3.60 \times 10^{-2}$	$3.58 \times 10^{-2}$
	30	20	0.729	0.475	1.54	-0.121	$-5.72 \times 10^{-2}$	$2.76 \times 10^{-2}$
		30	0.715	0.569	1.26	-0.108	$-7.35 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-2}$
		40	0.441	0.451	0.977	$-9.33 \times 10^{-2}$	$-8.61 \times 10^{-2}$	$3.70 \times 10^{-3}$

		0	0.590	0.282	2.10	$-9.76 \times 10^{-2}$	$-2.85 \times 10^{-2}$	$5.30 \times 10^{-2}$
		10	0.679	0.387	1.75	-0.114	$-5.02 \times 10^{-2}$	$5.50 \times 10^{-2}$
	40	20	0.703	0.492	1.43	-0.125	$-7.69 \times 10^{-2}$	$5.22 \times 10^{-2}$
		30	0.678	0.622	1.09	-0.132	-0.111	$4.30 \times 10^{-2}$
		40	0.581	0.703	0.826	-0.114	-0.123	$2.20 \times 10^{-2}$
30	0	0	0.414	0.272	1.52	$-9.75 \times 10^{-2}$	$6.05 \times 10^{-3}$	$-9.49 \times 10^{-3}$
		10	0.437	0.286	1.52	-0.102	$-9.12 \times 10^{-3}$	$-1.82 \times 10^{-2}$
		20	0.604	0.386	1.56	$-8.85 \times 10^{-2}$	$-2.24 \times 10^{-2}$	$-3.23 \times 10^{-2}$
		30	0.560	0.359	1.56	$-9.48 \times 10^{-2}$	$-4.02 \times 10^{-2}$	$-4.27 \times 10^{-2}$
		40	0.441	0.288	1.53	$-7.89 \times 10^{-2}$	$-4.81 \times 10^{-2}$	$-4.47 \times 10^{-2}$
	10	0	0.634	0.408	1.56	$-9.99 \times 10^{-2}$	$4.09 \times 10^{-3}$	$1.92 \times 10^{-3}$
		10	0.445	0.311	1.43	-0.105	$-1.84 \times 10^{-2}$	$-4.71 \times 10^{-3}$
		20	0.406	0.305	1.33	$-9.84 \times 10^{-2}$	$-3.26 \times 10^{-2}$	$-1.27 \times 10^{-2}$
		30	0.427	0.344	1.23	$-9.44 \times 10^{-2}$	$-4.82 \times 10^{-2}$	$-2.40 \times 10^{-2}$
		40	0.499	0.431	1.16	$-8.69 \times 10^{-2}$	$-6.20 \times 10^{-2}$	$-3.99 \times 10^{-2}$
	20	0	0.813	0.515	1.58	-0.134	$-1.22 \times 10^{-2}$	$2.18 \times 10^{-2}$
		10	0.794	0.571	1.40	-0.123	$-2.87 \times 10^{-2}$	$6.35 \times 10^{-3}$
		20	0.502	0.420	1.20	-0.118	$-4.99 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-4}$
		30	0.408	0.395	1.03	-0.101	$-6.17 \times 10^{-2}$	$-1.09 \times 10^{-2}$
		40	0.360	0.414	0.870	$-9.64 \times 10^{-2}$	$-7.91 \times 10^{-2}$	$-2.28 \times 10^{-2}$
	30	0	0.726	0.456	1.59	-0.136	$-2.86 \times 10^{-2}$	$4.56 \times 10^{-2}$
		10	0.766	0.585	1.31	-0.155	$-5.72 \times 10^{-2}$	$3.90 \times 10^{-2}$
		20	0.749	0.690	1.09	-0.138	$-7.03 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$
		30	0.506	0.571	0.887	-0.122	$-8.81 \times 10^{-2}$	$3.25 \times 10^{-3}$
		40	0.382	0.548	0.698	-0.102	$-9.68 \times 10^{-2}$	$-1.12 \times 10^{-2}$
	40	0	0.730	0.459	1.59	-0.126	$-4.11 \times 10^{-2}$	$6.49 \times 10^{-2}$
		10	0.752	0.588	1.28	-0.142	$-7.03 \times 10^{-2}$	$6.01 \times 10^{-2}$
		20	0.723	0.721	1.002	-0.148	-0.101	$4.59 \times 10^{-2}$
		30	0.605	0.774	0.781	-0.134	-0.112	$2.38 \times 10^{-2}$
		40	0.435	0.756	0.575	-0.114	-0.127	$1.52 \times 10^{-3}$
40	0	0	0.556	0.509	1.09	-0.135	$-8.70 \times 10^{-2}$	$-1.25 \times 10^{-2}$
		10	0.579	0.531	1.09	-0.142	$-6.99 \times 10^{-3}$	$-2.80 \times 10^{-2}$
		20	0.734	0.664	1.10	-0.133	$-2.06 \times 10^{-2}$	$-4.66 \times 10^{-2}$
		30	0.653	0.592	1.10	-0.140	$-4.74 \times 10^{-2}$	$-6.81 \times 10^{-2}$
		40	0.495	0.454	1.09	-0.111	$-5.67 \times 10^{-2}$	$-7.09 \times 10^{-2}$
	10	0	0.619	0.564	1.10	-0.149	$-3.78 \times 10^{-3}$	$4.31 \times 10^{-3}$
		10	0.553	0.537	1.03	-0.137	$-2.24 \times 10^{-2}$	$-1.10 \times 10^{-2}$
		20	0.532	0.553	0.963	-0.138	$-4.10 \times 10^{-2}$	$-2.57 \times 10^{-2}$
		30	0.577	0.640	0.901	-0.131	$-5.65 \times 10^{-2}$	$-4.47 \times 10^{-2}$
		40	0.514	0.618	0.834	-0.131	$-8.18 \times 10^{-2}$	$-6.73 \times 10^{-2}$
	20	0	0.776	0.701	1.11	-0.169	$-2.30 \times 10^{-2}$	$2.59 \times 10^{-2}$
		10	0.628	0.642	0.979	-0.154	$-4.23 \times 10^{-2}$	$7.04 \times 10^{-3}$

	20	0.531	0.618	0.860	-0.138	$-5.80 \times 10^{-2}$	$-1.05 \times 10^{-2}$
	30	0.470	0.632	0.743	-0.133	$-7.59 \times 10^{-2}$	$-2.68 \times 10^{-2}$
	40	0.420	0.675	0.623	-0.126	$-9.43 \times 10^{-2}$	$-4.81 \times 10^{-2}$
30	0	0.770	0.688	1.12	-0.170	$-4.61 \times 10^{-2}$	$5.09 \times 10^{-2}$
	10	0.725	0.771	0.939	-0.167	$-6.69 \times 10^{-2}$	$2.99 \times 10^{-2}$
	20	0.588	0.758	0.776	-0.152	$-8.41 \times 10^{-2}$	$7.55 \times 10^{-3}$
	30	0.467	0.744	0.627	-0.134	$-9.56 \times 10^{-2}$	$-1.28 \times 10^{-3}$
	40	0.363	0.759	0.478	-0.125	-0.113	$-3.30 \times 10^{-2}$
40	0	0.784	0.687	1.14	-0.148	$-5.80 \times 10^{-2}$	$6.81 \times 10^{-2}$
	10	0.7445	0.819	0.909	-0.156	$-8.50 \times 10^{-2}$	$5.20 \times 10^{-2}$
	20	0.639	0.896	0.714	-0.152	-0.108	$2.91 \times 10^{-2}$
	30	0.488	0.9110	0.536	-0.139	-0.124	$3.32 \times 10^{-3}$
	40	0.338	0.905	0.373	-0.122	-0.133	$-1.97 \times 10^{-2}$