

日本トップレベルの女子走高跳競技者における踏切動作のキネマティクスの特徴

杉浦澄美¹⁾ 柴田篤志¹⁾ 小山宏之²⁾ 長澤涼介³⁾

1) 筑波大学大学院 2) 京都教育大学 3) 京都教育大学大学院

1. はじめに

国内の女子走高跳は、2001年に今井美樹選手が1m96cmの日本記録を樹立して以来、1m90cmを超える選手は減少し、過去10年間の日本選手権優勝記録の平均は1m81cmである。さらに、世界大会の標準記録は日本記録と同程度の1m94cm前後であり、現時点において日本競技者の出場は厳しい状況にある。また、現在の走高跳に関する資料のほとんどが男子競技者を対象としたものであり、トラック種目や他のフィールド種目と比較しても走高跳に関する情報は少なく、日本の女子競技者を対象とした報告はほぼみられない。

そこで本報告では、2018年国民体育大会で入賞した女子競技者のキネマティクスの特徴について、2017年ロンドン世界陸上決勝進出者の特徴との比較から検討を行うことを目的とした。

2. 方法

2-1 分析対象者および分析対象試技

分析対象者は2018年国民体育大会で成年女子走高跳に出場し、8位までに入賞した女子走高跳競技者11名とし、各競技者の最も記録の高い試技を対象試技とした。対象試技のうち、踏切局面を撮影することができなかった競技者1名の1試技を除外した計10試技を分析対象試技とした。

なお、比較する2017年ロンドン世界陸上女子走高跳決勝のデータは、Nicholson et al. (2018)のデータを用いた。

2-2 データ収集およびデータ処理

競技会における全ての跳躍をマットの右後方および左後方に固定した2台のハイスピードカメラ(LUMIX FZ-300, Panasonic社製)を用いて240fpsで踏切2歩前からバークリアまでを固定撮影した。

撮影範囲はバーの中心を原点に左右(4m)、助走路方向に6mとし、試技の撮影前に撮影範囲内の計測点にキャリブレーションポールを立てて撮影した。なお、この撮影は日本陸上競技連盟科学委員会の活動として行われたものである。

撮影したVTR画像から、踏切2歩前離地の5コマ前からバークリアまでの身体分析点25点をビデオ動作分析システム(Frame DIAS IV, DHK社製)を用いてデジタイズを行った。そして、2台のカメラの身体分析点とコントロールポイントの座標から、3次元DLT法を用いて身体分析点の3次元座標を算出した。なお、3次元座標はバーの中点を原点とし、地面と平行かつバーと水平の軸をX軸、地面と水平かつバーと垂直に交わる軸をY軸、鉛直軸をZ軸とする右手座標系を静止座標系と定義した。これらの身体分析点の座標はWells and Winter (1980)の方法を用いて分析点ごとに最適遮断数周波数を決定し、Butterworth low-pass digital filterを用いて4.0Hzから8.0Hzで平滑化した。

2-3 算出項目

身体分析点の3次元座標から、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて部分および全身の重心座標算出した。それらをもとに以下の項目を算出した。

①身体重心の変位

H0: 踏切接地時の身体重心高

H1: 踏切離地時の身体重心高

H2: 空中における身体重心の上昇高(最大重心高-H1)

最大重心高: 踏切離地時の鉛直速度から $v^2/2g$ の式より算出($g=9.81\text{m/s}^2$)

H3: 最大重心高とバーの高さとの差

②踏切位置: 踏切接地時の踏切足つま先とバーとのY軸方向の距離

③身体重心の速度

身体重心の変位を時間微分することで、身体重心

の水平および鉛直速度を算出した。

- ④水平速度の変化量：踏切接地時の水平速度と踏切離地時の水平速度との差
- ⑤接地時間
- ⑥踏切脚関節角度（伸展および底屈を正，屈曲および背屈を負とする）
- ⑦踏切脚関節平均伸展角速度：踏切後半における脚関節伸展量を踏切後半の時間で除した値
- ⑧踏み込み角度および跳躍角度：身体重心速度ベクトルが水平面となす角度
- ⑨全身および部分の内・後傾角度

踏切局面における身体重心速度ベクトルの水平成分（静止座標系の X および Y 成分の合成ベクトル）を Y' 軸，地面に水平かつ Y' 軸に直行する軸を X' 軸，鉛直軸を Z 軸とする右手系の移動座標系を定義した。身体重心と踏切脚足関節を結んだ線分，踏切脚股関節と踏切脚足関節を結んだ線分，両肩中点と両股関節中点を結んだ線分を Y' - Z 平面に投影し，鉛直軸となす角度をそれぞれ全身，踏切脚，体幹の後傾角とし，正を後傾，負を前傾とした。また，これらの線分を X' - Z 平面に投影し，鉛直軸となす角度をそれぞれ全身，踏切脚，体幹の内傾角とし，正を内傾，負を外傾とした。（Fig. 1）

2-4 局面定義

踏切脚膝関節の最大屈曲時点を踏切の中間とし，それ以前を踏切前半，以降を踏切後半とした。

2-5 統計処理

日本選手（以下，JP）と世界選手（以下，WL）の比較には対応のない T 検定を行った。統計的有意性は危険率 5% 未満で判定した。

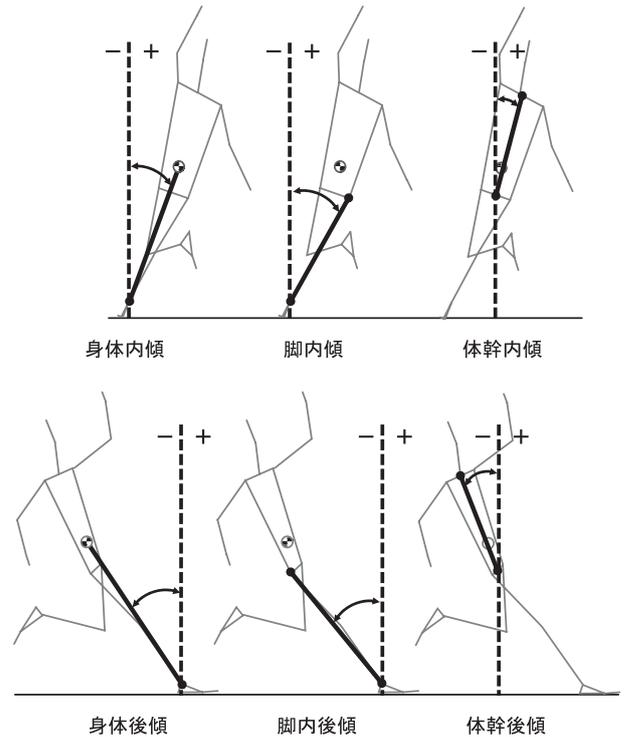


Fig.1 角度定義

3. 結果および考察

3-1 走高跳のパフォーマンスに関するパラメータ

Table1 は，対象者の分析試技の公式記録およびパフォーマンスに関するパラメータを示したものである。走高跳の記録は踏切離地時の身体重心高 (H1)，離地後の身体重心の上昇高 (H2)，およびクリアランス高 (H3) によって決定されるため (Hay, 1973)，パフォーマンスを高めるためにはこれらの 3 つの要因を向上させることが必要である。

身長は平均値は JP が 1.71m，WL が 1.82m と JP が有意に小さかった。JP と WL の H1，H2 および H3 の

Table1 身体重心位置に関するパラメータ

対象者	記録 (m)	身長 (m)	アームアクション [¶]	身体重心高 (m)					H1/身長 (%)	記録に対する割合 (%)			踏切位置 (m)
				最大	踏切接地	H1	H2	H3		%H1	%H2	%H3	
津田	1.83	1.79	s	1.98	0.82	1.23	0.74	-0.15	69.0	67.4	40.6	-8.0	0.61
高橋	1.78	1.72	s	1.94	0.86	1.21	0.73	-0.16	70.3	68.0	40.9	-8.9	0.83
青山	1.78	1.72	s	1.90	0.86	1.20	0.70	-0.12	69.7	67.2	39.6	-6.8	0.91
石岡	1.75	1.73	s	1.89	0.87	1.22	0.67	-0.14	70.9	69.8	38.4	-8.2	0.67
中西	1.72	1.74	s	1.83	0.82	1.19	0.64	-0.11	68.6	69.4	37.2	-6.6	0.75
小野	1.72	1.66	d	1.90	0.77	1.13	0.77	-0.18	68.3	65.9	44.6	-10.5	0.93
京谷	1.72	1.66	s	1.97	0.84	1.17	0.80	-0.25	70.9	68.0	46.4	-14.4	0.83
武田	1.72	1.72	s	1.82	0.85	1.19	0.63	-0.10	69.0	69.0	36.6	-5.6	0.77
武山	1.72	1.70	d	1.84	0.80	1.17	0.66	-0.12	69.1	68.3	38.4	-6.7	0.92
神田	1.72	-	s	1.90	0.83	1.20	0.70	-0.18	-	69.5	40.9	-10.4	1.01
JP_Mean±SD	1.75±0.04	1.71±0.04	s:8 d:2	1.90±0.05	0.83±0.03	1.19±0.03	0.70±0.05	-0.15±0.04	69.5±0.9	68.2±1.2	40.4±3.0	-8.6±2.5	0.82±0.12
WL_Mean±SD	1.95±0.04	1.82±0.07	s:4 d:8	2.06±0.06	0.88±0.05	1.25±0.06	0.81±0.06	-0.11±0.06	68.9±1.9	64.3±3.3	41.4±2.8	-5.7±3.2	0.90±0.19
significant difference	**	**	-	**	**	**	**	n.s	n.s	**	n.s	**	n.s

**：p<0.01，*：p<0.05，n.s：non significant

¶s：single arm action，d：double arm action

Table2 身体重心速度に関するパラメータ

対象者	水平速度 (m/s)			鉛直速度 (m/s)				前半	踏込角度 (deg)	踏切角度(deg)
	接地	離地	変化量	接地	中間	離地	変化量			
津田	6.48	3.14	3.34	-0.30	2.17	3.82	4.11	2.47	-2.6	50.5
高橋	5.60	3.62	1.98	-0.38	2.29	3.78	4.17	2.67	-3.9	46.3
青山	5.85	4.02	1.83	-0.13	2.12	3.72	3.84	2.25	-1.3	42.7
石岡	6.25	4.09	2.16	-0.14	2.00	3.63	3.77	2.14	-1.3	41.6
中西	6.32	3.78	2.54	-0.19	1.94	3.54	3.73	2.12	-1.7	43.2
小野	6.31	3.52	2.79	-0.19	2.30	3.88	4.07	2.49	-1.7	47.8
京谷	5.72	3.43	2.30	-0.20	2.24	3.96	4.16	2.44	-2.0	49.1
武田	5.65	3.26	2.39	-0.11	2.32	3.51	3.63	2.43	-1.1	47.2
武山	6.36	3.39	2.97	-0.52	2.50	3.60	4.12	3.02	-4.7	46.7
神田	6.40	3.84	2.55	-0.15	2.15	3.71	3.87	2.30	-1.4	44.0
JP_Mean±SD	6.21±0.38	3.61±0.30	2.49±0.43	-0.23±0.12	2.20±0.16	3.72±0.14	3.95±0.19	2.43±0.25	-2.2±1.2	45.9±2.8
WL_Mean±SD	6.71±0.17	4.07±0.35	2.63±0.33	-0.46±0.19	—	3.98±0.15	4.44±0.27	—	-3.9±1.6	44.4±2.6
significant difference	**	**	n.s	**	—	**	**	—	*	n.s

**; p<0.01, *; p<0.05, n.s; non significant

平均値を比較すると、JPはWLよりもH1が約6cm、H2が約10cm有意に小さく、身長に対するH1の大きさに有意な差はなかった。また、H1、H2およびH3の記録に対する割合をみると、%H1と%H3に有意な差が認められ、JPはWLと比較すると記録に対するH1の占める割合が大きかった。H1は身長や下肢長などの身体特性や離地姿勢によって大きく影響されることが報告されている(村木, 1982)。JPはWLと比較して身長が約10cm小さいことから、JPがWLと比較してH1が低かったことは身長や下肢長などの身体特性による影響が大きかったと考えられる。一方で、踏切におけるアームアクションに着目すると、WLは12人中8名がダブルアーム、4名がシングルアームであったのに対し、JPは10人中2名がダブルアーム、8名がシングルアームであった。本報告では身長に対するH1の大きさはJPとWLで同程度であったが、一般的に、ダブルアームの方が離地時に両腕を高く挙げることでH1が大きくなることから、H1の差には身体特性だけでなく、このようなアームアクションの違いも影響していた可能性がある。

H2は踏切離地時における身体重心の鉛直速度による影響が大きく(Dapena, 1990)、身体特性や姿勢の影響は少ない。JPのH2はWLと比較すると約10cm小さいことから、H1と同様にH2も高めることが必要であると考えられる。さらに、1m83cmを跳躍している津田選手に着目すると、H1ではWLと大きな差はないものの、H2でWLとの差が大きいことがわかる。つまり、JP全体としては記録の向上のためにはH2、H1ともに向上させていくことが重要であるが、H1は競技者の身体特性を反映している部分も大きく、JPの中でも個人差があることか

ら、H2を高めることが最も重要な課題であると考えられる。そして、それに加えてアームアクション変更などによるH1の向上についても検討していく必要があるであろう。

3-2 身体重心速度

Table2は、対象者の身体重心速度に関するパラメータを示したものである。踏切離地時における身体重心の鉛直速度の平均値はWLで3.98m/s、JPは3.72m/sであり、WLはJPよりも有意に大きい値であった。また、踏切接地時の水平速度の平均値はWLで6.71m/s、JPで6.21m/sであり、こちらもWLがJPよりも有意に大きい値であった。これらのことから、WLはJPと比較して助走で大きな速度を獲得し、踏切においてより大きな鉛直速度を獲得していたといえる。男子競技者を対象とした研究において、踏切接地時の水平速度と踏切離地時の鉛直速度との間に正の相関関係があることが報告されており(Dapena et al, 1990)、女子競技者においても同様に、鉛直速度の獲得には大きな助走速度の獲得が重要であると考えられる。

ここで各選手に着目し、津田選手と世界選手権優勝者のLasitskene選手を比較すると、Lasitskene選手はH1が1.29m、H2が0.87m、H3が-0.13mであり、H1、H3については大きな差が見られないのに対して、H2ではLasitskene選手が13cmも大きかった。津田選手の身長は1m79cmであり、Lasitskene選手の身長もほぼ同じ1m80cmであることから、20cmの記録の差は踏切離地時の鉛直速度によって決定されるH2にあると考えられる。Fig.2はWLとJPの踏切接地時の水平速度と離地時の鉛直速度の関係を示したものである。Lasitskene選手の踏

切接地時の水平速度と踏切離地時の鉛直速度はそれぞれ 6.71m/s と 4.13m/s であり、どちらも津田選手 (6.52m/s, 3.82m/s) を上回っていた。また、Mcperson 選手は身長が 1m63cm と日本人競技者と比較しても大きくないものの、WL でもトップクラスの踏切接地時の水平速度 (6.98m/s) であり、踏切離地時の鉛直速度も大きく (4.16m/s), H2 も 0.88m と大きかった。Mcperson 選手は H1 が 1.12m と JP と比較して小さいにも関わらず、1m92cm をクリアしていることから、比較的身長の高い日本人競技者においても、大きな H2 を獲得できれば世界レベルに近づくことができる可能性があり、踏切における鉛直速度の獲得を目指すために、助走の速度を向上させることは日本人競技者に共通した課題であることが推察される。

さらに、踏切接地時の鉛直速度と踏込角度についてみると、どちらも WL は JP よりも有意に小さい値、すなわち鉛直下向きの速度および角度が有意に大きかった。これまで、踏切接地時に鉛直速度下向きの速度および角度が大きいことは踏切脚への負荷が大きくなり、膝関節が必要以上に屈曲してしまう「つぶれ」につながると考えられてきたことから、踏切準備から踏切局面にかけての身体重心低下量を小さくし、踏切接地時の下向き鉛直速度を小さくする必要性が指摘されてきた (村木, 1982)。しかし、本報告において、踏切離地時の鉛直速度が大きい WL の方が踏切接地時の下向き鉛直速度および踏込角度が大きかったことから、WL は JP と比較して踏切において鉛直下向きに大きな力を加えるために大きな踏み込み角度で接地し、さらに大きな負荷に対応した踏切動作を行っていた可能性がある。

3-3 接地時間

Table3 は、対象者の踏切接地時間および膝関節角度に関するパラメータを示したものである。踏切全体の接地時間の平均値は JP が 0.157sec, WL が 0.162sec と有意な差は認められなかった。しかし、踏切前半の時間は JP が WL よりも短く、踏切後半は逆に JP が WL よりも長かった。前述したように、踏切接地時における鉛直下向きの速度が大きい WL は、踏切接地時の大きな衝撃を受け止める必要があるため、踏切前半の時間が長くなっていたことが推察される。

3-4 踏切脚関節角度と身体の傾き

Table4 は踏切脚の足関節角度、膝関節角度および踏切後半の平均角速度のパラメータを、Table5

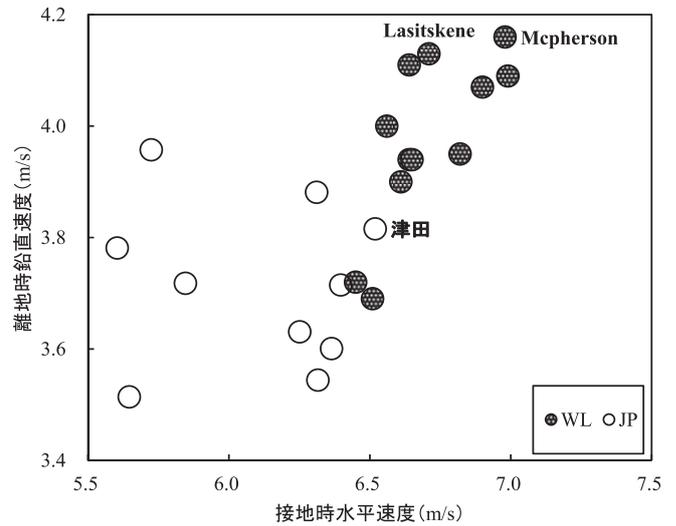


Fig. 2 踏切接地時の水平速度と踏切離地時の鉛直速度の関係

Table3 接地時間に関するパラメータ速度の関係

対象者	接地時間(sec)		
	全体	前半	後半
津田	0.175	0.070	0.105
高橋	0.160	0.075	0.085
青山	0.145	0.060	0.085
石岡	0.140	0.052	0.088
中西	0.168	0.072	0.096
小野	0.144	0.060	0.084
京谷	0.140	0.060	0.080
武田	0.164	0.084	0.080
武山	0.176	0.092	0.084
神田	0.156	0.068	0.088
JP_Mean±SD	0.157±0.013	0.069±0.012	0.088±0.007
WL_Mean±SD	0.162±0.013	0.096±0.019	0.068±0.015
significant difference	n.s	**	**

**; p<0.01, *; p<0.05, n.s; non significant

は身体の内後傾のパラメータを示したものである。足関節角度には踏切の各時点で有意な差がみられたが、WL のデータにおける足関節角度の定義が不明確なため、データの解釈には注意が必要であろう。一方で、背屈および底屈量に有意な差はみられなかった。膝関節角度は踏切接地時および踏切離地時の角度、屈曲量および伸展量については JP と WL で差は認められず、踏切局面における最小角度にのみ有意な差が認められた。また、踏切接地時の身体、体幹の後傾角度には WL と JP で有意な差は認められず、踏切接地における姿勢には大きな差がなかった。踏切接地および離地時の膝関節の角度に大きな差はなく、踏切接地および離地時の姿勢は類似していた。しかし、WL は踏切後半での膝関節の伸展量が JP よりも約 5 度大きく、さらに踏切後半の膝関節平均伸

Table4 関節角度に関するパラメータ

対象者	足関節角度 (deg)					膝関節角度(deg)					膝関節平均 伸展角速度 (deg/s)
	接地	最小	離地	背屈量	底屈量	接地	中間	離地	屈曲量	伸展量	
津田	140.9	115.1	157.7	25.8	42.6	176.8	147.0	177.8	29.8	30.8	293.1
高橋	144.7	118.1	155.1	26.6	37.1	156.6	138.6	168.5	18.0	29.9	351.8
青山	139.4	121.0	149.4	18.4	28.4	176.1	162.7	178.4	13.3	15.7	184.1
石岡	138.8	112.7	156.5	26.1	43.8	171.1	145.5	171.1	25.6	25.6	290.9
中西	139.8	115.4	157.9	24.4	42.5	169.4	143.5	172.7	25.8	29.2	304.2
小野	143.1	121.4	156.4	21.6	34.9	173.2	148.5	177.3	24.7	28.8	342.4
京谷	140.3	112.9	155.9	27.4	43.0	163.0	138.8	171.4	24.2	32.7	408.4
武田	132.3	130.5	151.1	1.9	20.6	162.2	146.2	169.8	16.0	23.7	295.9
武山	122.8	116.5	154.3	6.2	37.7	166.3	144.5	175.9	21.9	31.4	374.1
神田	134.7	126.2	148.8	8.5	22.6	170.8	148.0	160.5	22.8	12.4	141.2
JP_Mean±SD	137.7±6.0	119.0±5.5	154.3±3.2	18.7±9.1	35.3±8.2	168.5±6.1	146.3±6.4	172.3±5.2	22.2±4.8	26.0±6.5	298.6±77.8
WL_Mean±SD	126.8±7.5	107.3±6.2	138.3±3.8	19.4±8.5	30.9±7.0	163.3±6.5	138.6±7.0	169.6±3.9	24.8±6.2	31.0±8.1	464.6±111.7
significant difference	**	**	**	n.s	n.s	n.s	**	n.s	n.s	n.s	**

**: p<0.01, *: p<0.05, n.s; non significant

Table5 内後傾角度に関するパラメータ

対象者	後傾角度 (deg)			内傾角度 (deg)		
	身体	脚	体幹	身体	脚	体幹
津田	44.3	49.7	22.5	2.1	11.6	6.5
高橋	34.4	41.4	11.3	-4.6	3.0	1.1
青山	31.5	39.2	13.4	-5.9	-0.1	3.9
石岡	32.1	40.0	14.4	-4.9	1.2	6.9
中西	36.8	43.2	13.9	-6.0	3.7	0.4
小野	35.6	43.8	14.1	-4.4	6.3	-5.1
京谷	30.4	37.8	16.3	-0.6	7.3	6.0
武田	35.6	44.2	8.8	-3.5	7.6	-5.2
武山	37.9	43.1	6.0	-8.1	4.2	-14.7
神田	35.0	42.3	12.5	-6.1	4.0	-2.0
JP_Mean±SD	35.4±3.7	42.4±3.1	13.3±4.2	-4.2±2.8	4.9±3.2	0.2±6.4
WL_Mean±SD	36.4±2.6	-	15.1±3.9	-	-	-
significant difference	n.s	-	n.s	-	-	-

**: p<0.01, *: p<0.05, n.s; non significant

展角速度も有意に大きかったことから、踏切後半において膝関節を素早く伸展させていたといえる。踏切接地時の水平速度、鉛直下向きの速度および踏込角度が大きいWLは踏切の前半で踏切脚に大きな負荷がかかるため膝関節の屈曲が大きくなるが、踏切後半において踏切脚を短時間で大きく伸展させることで大きな鉛直速度を獲得しており、踏切接地における大きな負荷に対して踏切後半で踏切脚を伸展することができるようなパワー発揮の特性や踏切技術を有している可能性がある。

4. まとめ

本報告では、日本トップレベルの女子走高跳競技者を対象に、2017年ロンドン世界陸上決勝進出者との比較からキネマティクスの特徴について検討を行うことを目的とした。

本報告によって得られた結果から、JPはH1とH2がWLより小さく、特にH2の獲得が最も重要な課題であり、さらに、アームアクションの変更などによ

るH1の向上についても検討する必要があることが示唆された。

また、JPはWLと比較して踏切接地時の水平速度と離地時の鉛直速度が小さく、踏切接地時の下向き鉛直速度および踏込角度も小さかった。さらに、WLは踏切接地時の大きな負荷に対して踏切後半において短時間で素早く膝関節を伸展させることで、助走で獲得した大きな水平速度を踏切局面で鉛直速度へと変換していたと考えられる。

以上のことから、今後は日本の女子競技者は助走で大きな水平速度を獲得することと、それに伴う踏切における負荷の増大に対応した踏切技術を獲得することが課題となるだろう。

参考文献:

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. Japanese Journal of Sports Science, 15 (3): 155-162.
Dapena, J., McDnald, C. and Cappaert, J.

- (1990) A regression analysis of high jumping technique. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6: 246-261.
- 村木 柁人 (1982) 現代スポーツコーチ実践講座 2 陸上競技 (フィールド). ぎょうせい: 東京, pp. 280-296.
- Nicholson, G., Bissas, A. and Merlino, S. (2018) Women's high jump - 2017 IAAF World Championships Biomechanical report. 1-36.
- Wells, R. P. and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics normal, pathological and sporting gaits. In: *Human Locomotion 1* (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian Society of Biomechanics). pp. 92-93.