

# Modello cinematico e dinamico del salto in lungo

Milan Coh

Università di Lubiana, Facoltà di Sport (Slovenia)

Boris Mikuz

Federazione di Atletica Leggera della Slovenia

Il salto in lungo è costituito da quattro fasi interconnesse: rincorsa, stacco, volo e atterraggio. Secondo alcuni studi (Hay, Miller e Canterna, 1986; Hay e Nohara, 1990; Nixdorf e Bruggemann, 1990; Less, Smith e Fowler, 1994), la rincorsa e lo stacco sono i fattori più importanti che influiscono sul risultato. Il problema fondamentale del salto in lungo, dal punto di vista biomeccanico, risiede nella trasformazione nella fase di stacco della velocità orizzontale in una risultante derivante dalle velocità verticale ed orizzontale. E' molto importante che l'atleta realizzi la velocità verticale più elevata possibile con la perdita di velocità orizzontale minore possibile. La lunghezza del salto è definita secondo il modello teorico (secondo Ballreich e Bruggemann, 1986), dalla distanza dello stacco L1, dalla lunghezza del volo L2 e dalla distanza dell'atterraggio L3. La parabola di volo del CM (Centro di Massa) è definita dai seguenti parametri: altezza relativa del CM allo stacco, risultante della velocità verticale ed orizzontale dello stacco, angolo di stacco e resistenza dell'aria (Hay, Miller e Canterna, 1986).

Parecchi studi di biomeccanica della tecnica del salto in lungo si sono occupati sinora delle caratteristiche cinematiche con film ad alta velocità o videocamere. Tuttavia, vi sono pochi studi su saltatori in lungo di elevatissimo livello che mettono in evidenza le caratteristiche dinamiche dello stacco, che è il

maggior responsabile della prestazione nel salto in lungo. L'obiettivo primario del nostro studio è perciò quello di svolgere un'analisi complessa sia del modello cinematico del salto in lungo che del modello dinamico dello stacco.

## Metodi di modellazione

L'analisi è stata eseguita su due salti di uno dei migliori saltatori in lungo del mondo Gregor Cankar (GC - altezza cm 178,5, peso corporeo kg 69, età 24 anni, migliore prestazione personale m 8,40). La lunghezza del primo salto analizzato era di m 7,93 ed il secondo di m 8,25 (figura 1). I parametri cinematici furono ottenuti con un sistema cinematico

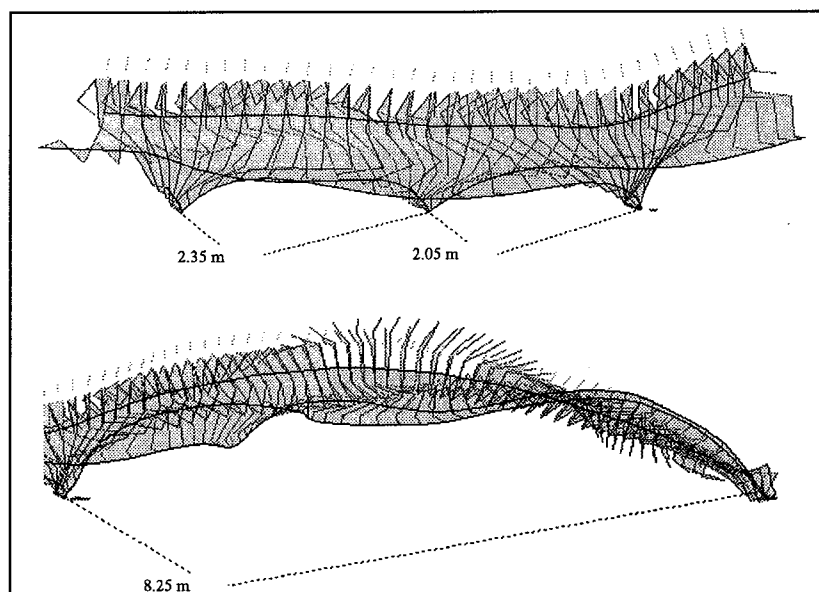


Fig. 1 - Modello tecnico del salto in lungo - G.C., 8.25 m

Ariel 3-D (Ariel Dynamics Inc., USA) con quattro camere sincronizzate "Sony - DVCAM DSR 300 PK), che fotografano a 50 Hz. Le prime due camere, posizionate ad un angolo di  $90^\circ$  rispetto all'oggetto filmato, erano utilizzate per analizzare gli ultimi due appoggi della rincorsa e lo stacco, mentre le altre due per riprendere il volo e l'atterraggio (figura 2). Nell'analisi cinematica, era stato digitalizzato un modello di 15 segmenti. I segmenti del modello rappresen-

in tre direzioni X - orizzontale, Y - verticale e Z - laterale (figura 3). La lunghezza del salto (L) fu misurata dall'impronta della parte anteriore del piede della gamba di stacco sulla piattaforma di forza al punto di contatto del piede nella sabbia della buca di atterraggio. Il pacchetto del programma Matlab (Mathworks Inc., USA) fu utilizzato per analizzare le forze misurate. La frequenza di registrazione sulla piattaforma di forza era di 2000 Hz.

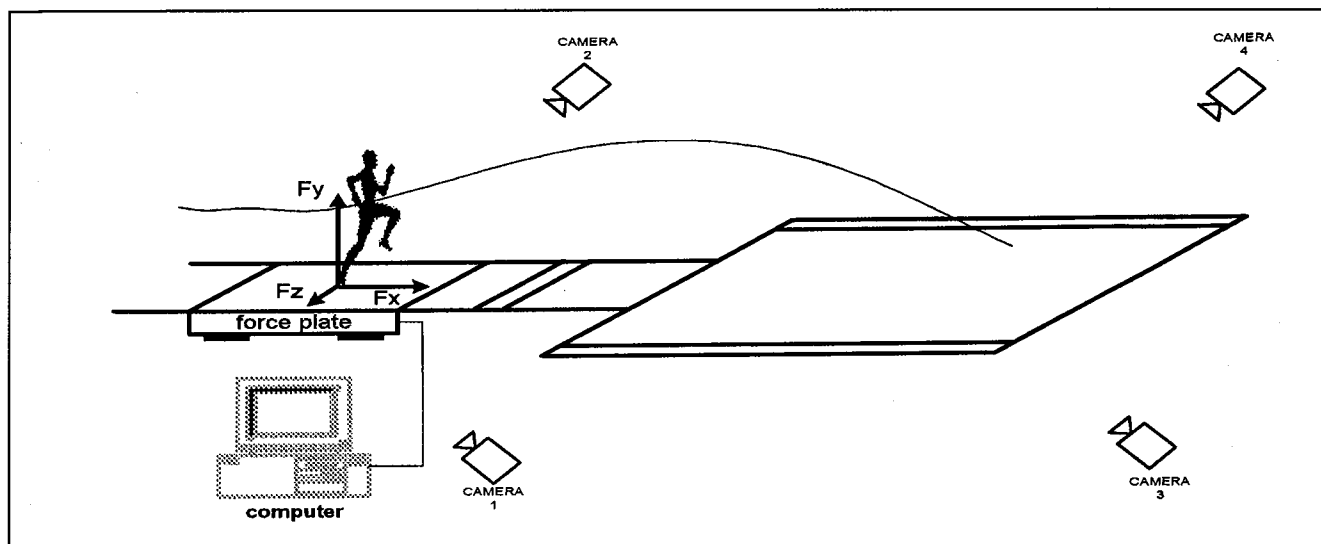


Fig. 2 - Sistema di misurazione dei parametri cinematici e dinamici dello stacco nel salto in lungo

tano le parti del corpo, collegati con i punti delle articolazioni. Le masse ed i centri di gravità dei segmenti ed il centro generale di gravità del corpo (CM) furono calcolati secondo il modello antropometrico di Dempster (1955). Tutti i parametri cinematici furono filtrati con un filtro Butterworth del settimo-livello. I parametri dinamici dello stacco furono registrati con una piattaforma di forza Kistler 9287, dalla superficie di mm 900x600, coperta con una stuoia di tartan ed installata prima dell'asse di battuta sulla pedana del salto in lungo. Le forze furono misurate

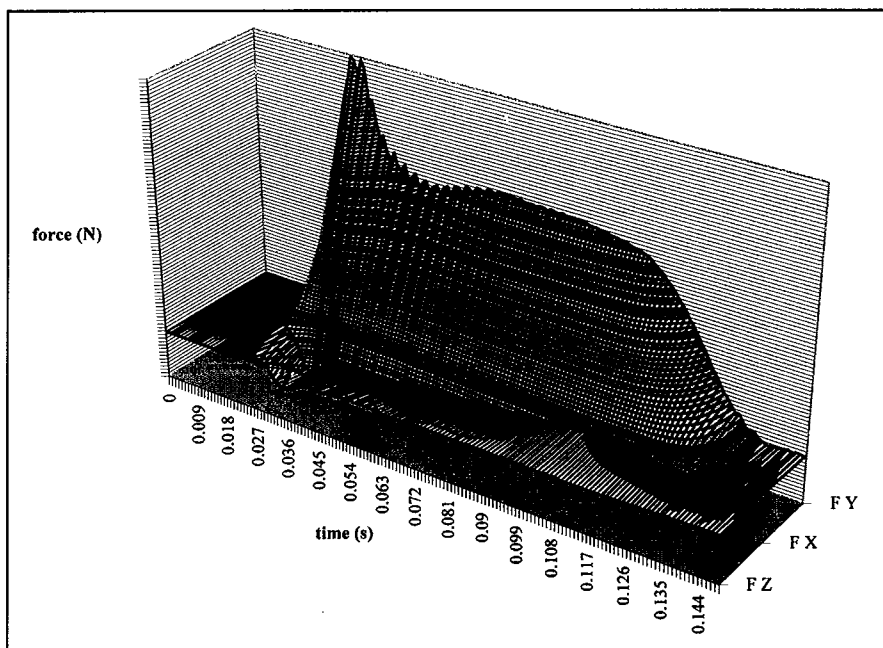


Fig. 3 - Diagramma a superficie 3D della fase di stacco

Tabella 1 - Parametri cinematici dello stacco

PARAMETRI	UNITÀ DI MISURA		RISULTATO
<b>Atterraggio</b>			
Lunghezza dell'ultimo passo	(S1)	m	2.05
Distanza dell'atterraggio	(LTD)	m	0.63
Altezza del CM all'appoggio	(HTD)	m	0.95
Velocità orizzontale all'appoggio	(VXTD)	m·s <sup>-1</sup>	9.46
Velocità verticale all'appoggio	(VYTD)	m·s <sup>-1</sup>	-0.26
Velocità all'appoggio	(STD)	m·s <sup>-1</sup>	9.47
Massimo piegamento del ginocchio	(MKF)	gradi	148.0
Altezza del CM nel massimo piegamento del ginocchio	(HMA)	m	1.01
<b>Stacco</b>			
Distanza dello stacco	(L1)	m	0.29
Altezza del CM allo stacco	(HTO)	m	1.23
Velocità orizzontale allo stacco	(VXTO)	m·s <sup>-1</sup>	8.10
Velocità verticale allo stacco	(VYTO)	m·s <sup>-1</sup>	3.90
Velocità allo stacco	(STO)	m·s <sup>-1</sup>	8.99
Velocità angolare della coscia allo stacco	(AVTO)	gradi·s <sup>-1</sup>	790
Angolo di proiezione allo stacco	(PATO)	gradi	24.1

**Modello cinematico dello stacco**

Lo stacco è una delle chiavi che producono il successo nel salto in lungo. Il modello dello stacco è

definito dai parametri cinematici (tabella 1, figura 4) e dinamici. Essi sono correlati, in armonia con le leggi della biomeccanica. In questa fase, il saltatore deve trasformare in maniera ottimale la velocità orizzontale sviluppata nella rincorsa in velocità di

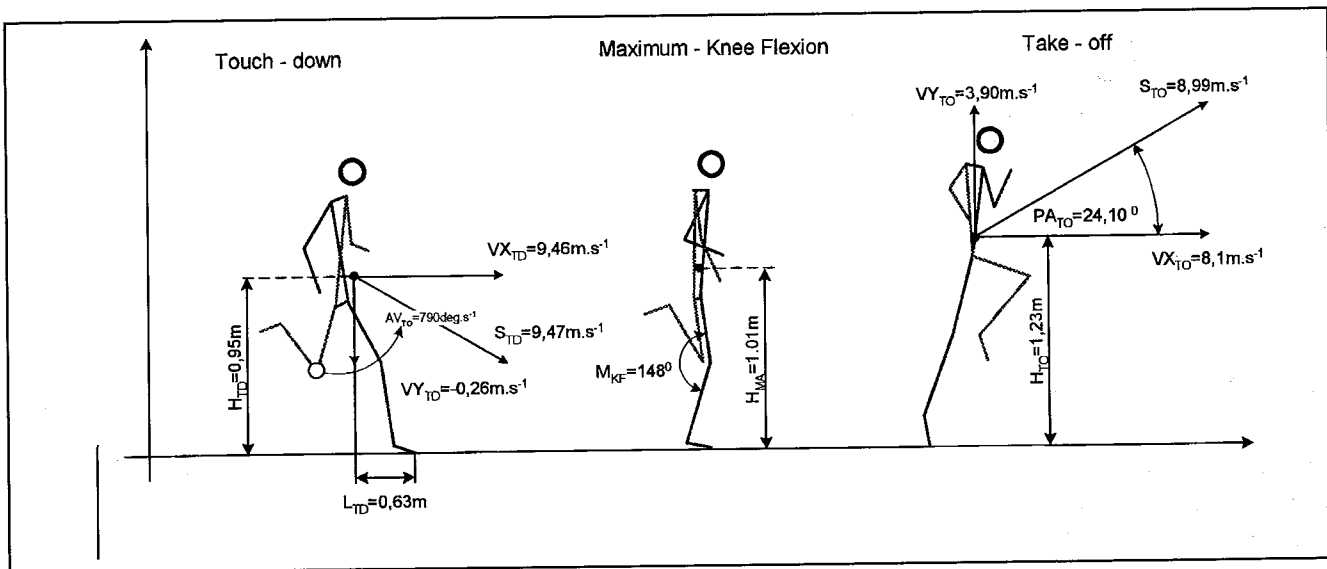


Fig. 4 - Modello cinematico dello stacco (G.C., distanza 8,25 m)  
 Touch - down = Appoggio  
 Maximum - Knee Flexion = Massima flessione del ginocchio  
 Take - off = Stacco

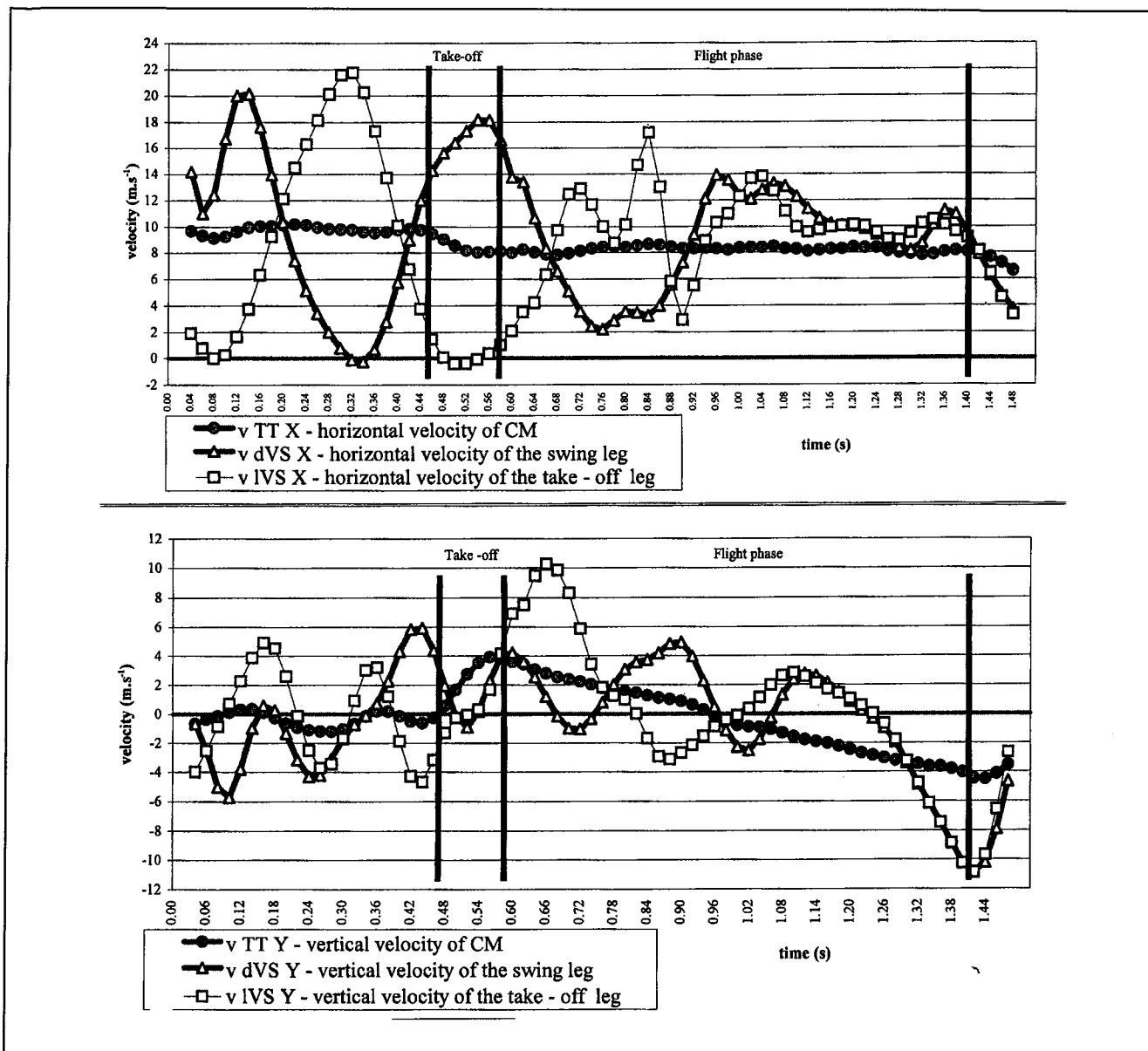


Fig. 5 - Velocità del CM, piede di stacco e gamba libera negli ultimi 2 passi, stacco e fase di volo

Legenda:  $v_{TT Y}$  = velocità verticale del CM

$v_{dVS Y}$  = velocità verticale dell'arto libero

$v_{lVS Y}$  = velocità verticale della gamba di stacco

stacco. La velocità dello stacco è la risultante della velocità orizzontale allo stacco (TO) e della velocità verticale allo stacco (TO) ed è uno dei più importanti predittori di una effettiva lunghezza di salto. Nigg (1974), Hay (1986), Nixdorf e Bruggemann (1990) trovano che la correlazione tra la velocità di stacco ed il risultato finale è fra 0,74 e 0,83. La velocità orizzontale all'appoggio (TD) per l'atleta GC è di

9,46  $m \cdot s^{-1}$ . Nello stacco (TD-TO), avviene una riduzione della velocità orizzontale di 1,36  $m \cdot s^{-1}$ , che rappresenta il 14,3%. Il suo decremento è collegato con l'incremento della velocità verticale allo stacco, che ammonta a 3,90  $m \cdot s^{-1}$  (figura 5). Possiamo concludere che la perdita nella velocità orizzontale è proporzionale all'aumento nella velocità verticale. La velocità verticale all'atterraggio è diretta ver-

so il basso ed ha un segno negativo ( $VYTD = -0,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

La realizzazione della velocità verticale è direttamente collegata con la grandezza della proiezione del CM sulla superficie all'atterraggio (distanza dell'atterraggio = m 0,63).

Uno dei problemi biomeccanici chiave dello stacco è come garantire la velocità verticale più elevata possibile, mentre si provvede a ridurre al minimo la velocità orizzontale. Il rapporto delle componenti della velocità dello stacco ( $VXTO : VYTO$ ) per l'atleta GC è di 2,08 : 1. I risultati di qualche studio simile (Hay, Miller e Canterna, 1986; Ballreich e Bruggemann, 1986; Muller e Hommel, 1997) ci mostrano che questo atleta possiede un'ottima velocità verticale allo stacco ed una velocità orizzontale ( $VXTO$ ) che è un po' troppo bassa per permettere salti più lunghi. La conseguenza

del CM dei finalisti del Campionato del Mondo del 1997 ad Atene fu di 8 cm (Muller e Hommel, 1997). Questo abbassamento del CM nel penultimo appoggio aumenta la lunghezza dell'accelerazione verticale nella fase di stacco.

Un fattore molto importante, che contribuisce all'efficacia dello stacco, è la velocità angolare dell'arto libero (AGTO), 790 gradi  $\cdot \text{s}^{-1}$  per l'atleta GC. Questa velocità non è costante, ma cambia. E' più alta nella parte centrale dell'ampiezza di oscillazione, più bassa alla fine dell'oscillazione, quando il movimento della gamba libera viene arrestato. La conseguenza

Tabella 2 - Parametri dinamici dello stacco

PARAMETRI		UNITÀ DI MISURA	RISULTATO
Tempo di contatto	(TD-TO)	ms	127
Tempo del momento di caricamento	(TD-MKF)	ms	84
Tempo del momento di spinta	(MKF-TO)	ms	43
Massima forza in X - asse orizzontale	(FXMAX)	N	4581
Massima forza in Y - asse verticale	(FYMAX)	N	5132
Massima forza in Z - asse laterale	(FZMAX)	N	1396
Forza d'impulso nel momento di caricamento	(FIMCP)	N · s	-101.9
Forza d'impulso nel momento di spinta	(FIMLP)	N · s	8.1
Forza totale d'impulso	(TFIMP)	N · s	328.8

za di una relativamente alta velocità verticale allo stacco è anche l'ampiezza dell'angolo di proiezione allo stacco (PATO) = 24,10 gradi. Questa ampiezza dell'angolo di proiezione allo stacco definisce la parabola del CM del saltatore. Il nostro atleta possiede una parabola del CM molto alta, con il punto più alto HMT = m 1,88.

La realizzazione di un'elevata velocità verticale può essere collegata con una efficace elevazione del CM allo stacco. La differenza tra la posizione più bassa del CM all'atterraggio ed allo stacco è di cm 28. Questa è anche aumentata con un favorevole rapporto tra la lunghezza degli ultimi due passi (m 2,35 : m 2,05) e l'abbassamento del CM di 11 cm nel penultimo appoggio. La media di abbassamento

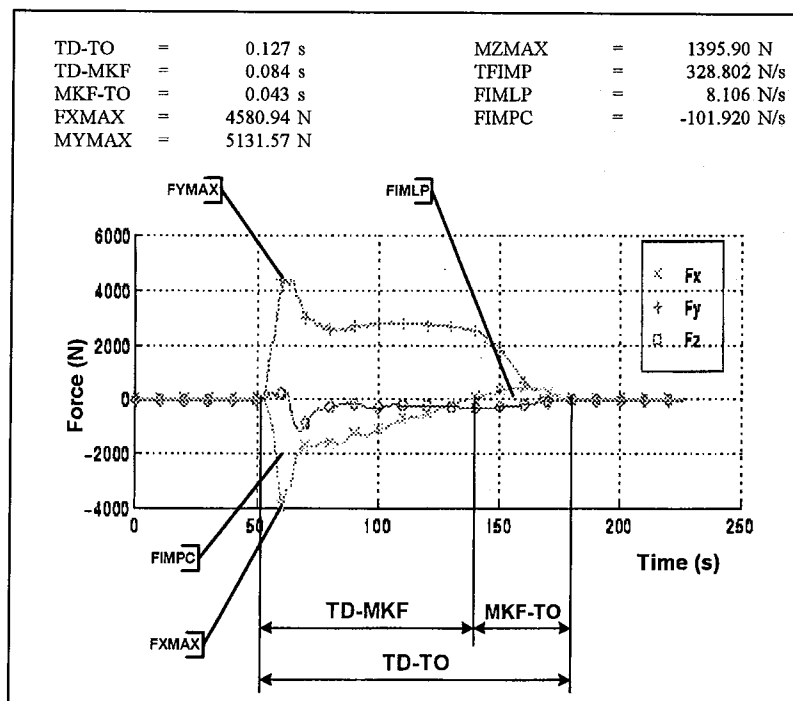


Fig. 6 - Diagramma di forza della fase di stacco

di ciò è il trasferimento della forza d'inerzia della massa di questo segmento (la gamba rappresenta, secondo il modello antropometrico di Dempster, il 16,1% dell'intera massa corporea) al centro generale di gravità del saltatore. Popov (1983) stabilisce che il contributo dell'arto libero sull'intero impulso dello stacco è tra il 17% ed il 20%.

### Modello dinamico dello stacco

I parametri dinamici dello stacco (tabella 2, figura 6) vengono misurati direttamente con una piattaforma della forza. In questo modo misuriamo le forze sviluppate dal saltatore al momento dello stacco in una situazione reale, che rappresenta una rarità negli studi di questo tipo.

Il tempo complessivo della fase di contatto è di 127 ms. A questo punto, il rapporto tra il tempo di caricamento (84 ms) ed il tempo di spinta (43 ms) è importante – questo era 66% : 34% per il nostro atleta, che rappresenta un buon indicatore dell'efficacia dello stacco (Less et al. 1994), per quel che riguarda la dinamica del salto.

Il momento di caricamento per definizione dura dall'istante in cui il piede della gamba di stacco viene posta sul terreno fino al momento di massimo piegamento del ginocchio della gamba di stacco (TD-MKF). Il momento di spinta si verifica da quell'istante fino allo stacco (MKF-TO). Nel momento di caricamento, il nostro atleta sviluppa una forza massima di 4581 N in direzione orizzontale e 5132 N in direzione verticale. Il regime muscolare è eccentrico nel momento di caricamento e concentrico in quella di spinta. Lo stacco del salto in lungo rappresenta un tipico esempio di una contrazione muscolare a due fasi eccentrico-concentrica, la cui efficacia dipende principalmente da due fattori fisiologici. Il primo nella fase di inversione – l'utilizzazione dell'energia potenziale elastica è utilizzabile soltanto per un certo intervallo di tempo. Questo periodo viene definito dal tempo di permanenza dei ponti di actina e miosina nei sarcomeri, che va da 15 a 100 ms. Se la contrazione concentrica non seguisse quella eccentrica in un tempo sufficientemente rapido, non ci sarebbe trasferimento di energia elastica

dalla prima alla seconda fase. Studi hanno dimostrato che l'energia elastica è la più importante produzione di forza nella fase eccentrica (caricamento) e l'energia chimica dei muscoli nella fase concentrica (spinta). Una efficace integrazione fra energia elastica ed energia chimica nei muscoli e nei tendini può determinare una forza risultante più grande del 40% (Tihanyi, 1987).

Il secondo fattore di una redditizia contrazione eccentrico-concentrica risiede nella capacità dei muscoli di resistere alla estensione rapida (stiffness). La stiffness, come meccanismo nervoso, fa affidamento principalmente sulla pre-attivazione muscolare e sull'azione dei riflessi: miotatico e riflesso tendineo dovuti ai corpuscoli del Golgi (Gollhofer, 1991). Alla luce delle caratteristiche biomeccaniche, la stiffness elastica determinata da un intervallo breve (Short-Range Elastic Stiffness) è tipica dello stacco del salto in lungo, in quanto essa è l'oggetto di un immediato meccanismo di risposta del muscolo attivato da una contrazione eccentrica. Nella nostra sperimentazione, abbiamo trovato che il tempo di contrazione eccentrica è di 84 ms e che l'atleta sviluppa in questa fase una forza massima di reazione sul terreno pari a 5132 N. Questa forza è quasi 7,5 volte la massa corporea dell'atleta. Un importante criterio cinematico dell'efficienza dei muscoli mentre sopportano lo stiramento (abbassamento del CM) è l'angolo di piegamento del ginocchio della gamba di stacco (MKF) = 148 gradi. Quest'angolo deve essere sufficientemente ampio. Un marcato abbassamento del CM nella fase di MKF determina un prolungamento del momento di caricamento ed in conseguenza di ciò una coordinazione inefficace dell'azione muscolare eccentrica e concentrica.

I risultati negli studi di Less et al. (1994) dimostrano che l'impulso nel momento di caricamento è il principale indicatore della velocità verticale nel momento di spinta. Uno studio di Bruggeman et al. (1982) ha evidenziato con precisione una correlazione molto più alta tra la velocità verticale dello stacco con effettiva lunghezza del salto ( $r = 0,89$ ), che con la velocità orizzontale dello stacco ( $r = 0,21$ ). L'impulso nel momento di caricamento per l'atleta GC è  $-101,9 \text{ N} \cdot \text{s}$ .

## Modello cinematico della fase di volo

Sulla base dei parametri cinematici (tabella 3, figura 7) osserviamo diversi contributi della componente individuale per conseguire il risultato finale. Per l'atleta GC, la lunghezza del volo (L2) ha la più grande quota assoluta e relativa nella lunghezza complessiva del salto -88%, quindi la distanza dell'atterraggio (L3) -7,7% e la più piccola parte è riservata alla distanza dello stacco (L1) -3,5. La lunghezza del volo è definita come la di-

Tabella 3 - Parametri cinematici della fase di volo

PARAMETRI	UNITÀ DI MISURA		RISULTATO
Lunghezza del salto	(L)	m	8.25
Lunghezza ufficiale del salto	(OD)	m	8.10
Lunghezza del volo	(L2)	m	7.33
Massima altezza del CM durante il volo	(HMF)	m	1.88

co, che ammonta a 71,9 gradi ed il rapporto tra la componente della velocità verticale (VYTO) ed orizzontale (VXTO) allo stacco. La relativamente ampia quota della distanza di atterraggio (L3) può essere attribuita alla tecnica molto economica di atterraggio. Nella fase di volo, il salto in lungo in

hang-style è caratteristico per l'atleta GC, che adopera molto efficacemente come preparazione all'atterraggio. Un'alta parabola di volo del CM può essere osservata in quest'atleta, che risulta essere la conseguenza di un angolo di stacco (PA TO = 24,1 gradi). Il più alto punto della parabola è 65 cm oltre l'altezza del CM

allo stacco. Le caratteristiche della fase di volo sono ovviamente influenzate anche da altri fattori, in primo luogo dalla resistenza dell'aria, che non è oggetto di studio in questa ricerca.

## Modello cinematico della fase di atterraggio

Una tecnica economica di atterraggio è caratterizzata da: la distanza dell'atterraggio (L3), l'altezza del CM al momento del contatto del piede con la sabbia (HLA) e la lunghezza dell'atterraggio alla fine del volo (L4) - tabella 5, figura 7. Una delle più importanti variabili nell'atterraggio è la lunghezza orizzontale di atterraggio, definita dalla

Tabella 4 - Lunghezze parziali del salto in lungo

TAC (HAY, MILLER, CANTERNA)	C. LEWIS	NOSTRO STUDIO
*	**	
L1 0.41 m (5.1%)	0.46 m (5.2%)	0.29 m (3.5%)
L2 7.22 m (90%)	7.77 m (88.4%)	7.33 m (88.8%)
L3 0.39 m (4.9%)	0.56 m (6.4%)	0.63 m (7.7%)
L 8.02 m	8.79 m	8.25
* Risultati rappresentanti la media dei valori di 12 finalisti		
** Risultati nel medesimo studio		

stanza orizzontale tra il punto CM al momento dello stacco e lo stesso punto al momento del contatto con la sabbia.

Il confronto può essere effettuato con i risultati dello studio condotto da Hay, Miller e Canterna (1986) su un campione di finalisti del Campionato Nazionale Americano (TAC). Le differenze possono essere osservate soprattutto nelle quote relative dello stacco e della distanza dell'atterraggio (tabella 4).

La piccola quota parziale della distanza dello stacco dell'atleta GC è la conseguenza dell'angolo di stac-

Tabella 5 - Parametri cinematici dell'atterraggio

PARAMETRI	UNITÀ DI MISURA		RISULTATO
Distanza dell'atterraggio	(L3)	m	0.63
Altezza del CM al momento dell'atterraggio	(HLA)	m	0.92
Lunghezza dell'atterraggio alla fine del volo	(L4)	m	1.28
Distanza della caduta indietro	(LFB)	m	0.15

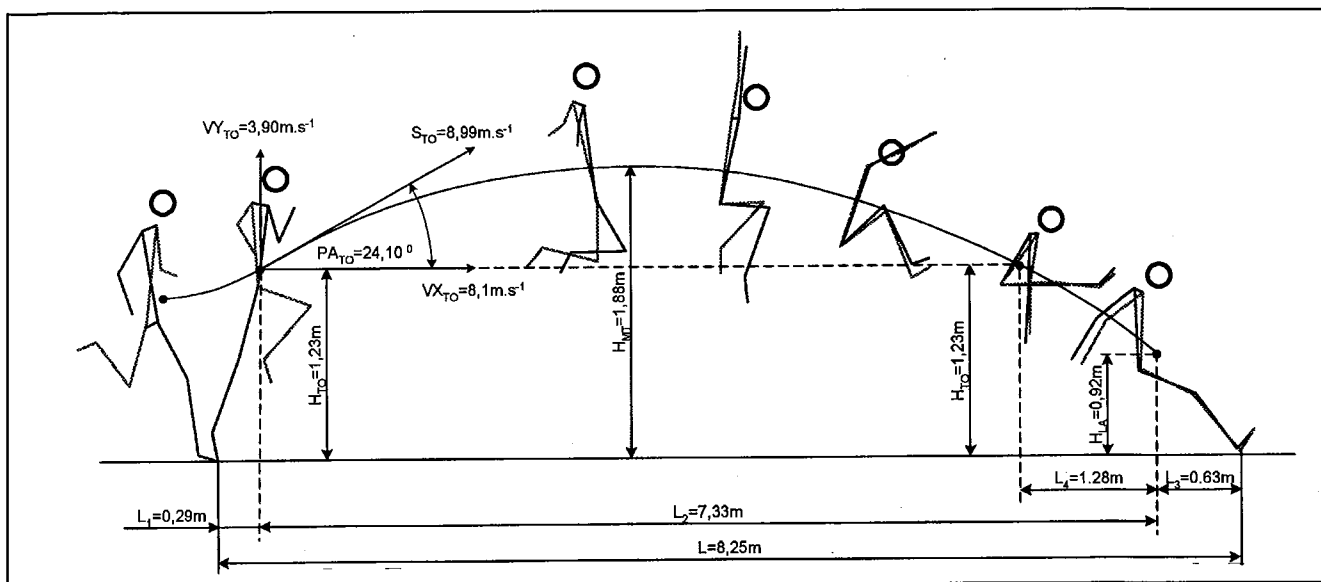


Fig. 7 - Modello cinematico del volo e dell'atterraggio (G.C., distanza 8,25 m)

proiezione del punto del CM ed il contatto iniziale con la sabbia diminuita dalla distanza perduta dall'atleta per la caduta indietro o altrimenti toccando la sabbia sul punto di chiusura in relazione all'asse di battuta rispetto al punto iniziale di contatto (LFB). L'indice di economia tecnica è:  $IR = L_3 - LFB$ . Hay et al. (1986) trovarono, su un campione rappresentativo composto dai 12 migliori saltatori in lungo americani, che la media della distanza della caduta indietro è di 11 cm, per il nostro atleta questa distanza è di 15 cm. Questo ci porta a concludere che la sua tecnica è economica ed efficace. Anche Mendoza (1989) trovò che i valori della distanza di atterraggio ( $L_3$ ) tra 57 e 65 cm indicano un atterraggio molto economico. L'atleta può contribuire in gran parte al risultato agonistico utilizzando una buona tecnica di atterraggio, questa fase essendo dipendente dalle capacità motorie specifiche, specialmente dalla potenza dei flessori delle anche e dai muscoli addominali, delle caratteristiche morfologiche, delle capacità coordinative dell'atleta ed anche dalla qualità della zona di atterraggio.

#### GREGOR CANKAR (Slovenia)

**Data nascita:** 25-1-1975

**Statura:** 178 cm

**Peso:** 69 kg

**Club:** AD Klavivar Cetis

**Allenatore:** Srdjan Djordjević

**Salto in lungo:** 8.40 m

**Salto in alto:** 2.13 m

**Salto triplo:** 16.35 m

#### Progressione:

1989 6.00 m

1990 6.70

1991 7.35

1992 7.51

1993 7.60 (7.65 w)

1994 7.92 (8.04 w)

1995 8.04 (8.18 w)

1996 8.30

1997 8.40

1998 8.07

1999 8.36 (Siviglia '99 - Medaglia di bronzo)



## Bibliografia

- Ballreich R., Bruggemann G. (1986), Biomechanik des Weitsprungs. *Biomechanik der Leichtathletik*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart (pp. 28-47).
- Dempster W. (1955), Space requirements of the seated operator. *WADC Technical Report*, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, pp. 5-159.
- Gollhofer A., Kyrolainen H. (1991), Neuromuscular control of the human leg extensor muscles in jump exercises under various stretch-load conditions. *IJSM*, 12, pp. 34-40.
- Grahman-Smith P., Less A. (1997), A comparison of the information quality between cinematography and videography long jump technique analysis. *Biology of Sport*, 14 (3), pp. 213-225.
- Hay J., Miller J., Canterna R. (1986), The techniques of elite male long jumpers. *Journal of Biomechanics*, 19, pp. 855-866.
- Hay J., Nohara H. (1990), Techniques used by elite long jumpers in preparation for take-off. *Journal of Biomechanics*, 23, pp. 229-239.
- Less A., Smith G., Fowler N. (1994), A Biomechanical Analysis of Last Stride, Touchdown, and Takeoff Characteristics of the Men's Long Jump. *Journal of Applied Biomechanics*, 10 (1), pp. 61-78.
- Mendoza L. (1989), Individuelle Optimierung der Landeweite beim Weitsprung mit Hilfe der Computersimulation. *Leistungssport*, 6, pp. 35-40.
- Muller H., Hommel H. (1997), Biomechanical Research Project at the VIth World Championships in Athletics, Athens 1997: Preliminary Report. *New Studies in Athletics*, 2/3, pp. 43-73.
- Nixdor E., Bruggeman P. (1990), Biomechanical analysis of the long jump. *Scientific Research Project at the Games of the XXIVth Olympiad - Seoul 1988*. International Athletic Foundation (pp. 263-302).
- Popov V. (1983), The long jump run-up. *Track Technique*, 85, pp. 2708-2709.
- Tihanyi J. (1987), Die physiologische und mechanische Grundprinzipien des Krafttraining. *Leistungssport*, 17 (2), pp. 38-44.