

Effetti della propriocezione del core sugli infortuni al ginocchio

Bohdanna T. Zazulak, Timothy E. Hewett, N. Peter Reeves, Barry Goldberg and Jacek Cholewicki.

### **Introduzione:**

Le atlete femminili hanno una maggior propensione agli infortuni al ginocchio rispetto agli atleti maschi (1,7,9,31,38). Negli Stati Uniti, donne e ragazze subiscono più di 30000 infortuni ai legamenti crociati anteriori (ACL) ogni anno, con costi superiori ai 650 milioni di dollari ogni anno (29). Il meccanismo di infortunio ai legamenti crociati anteriori può includere una combinazione dei seguenti componenti: posizionamento valgo dell'estremità inferiore, estensione relativa con distribuzione non bilanciata del peso, e il centro di massa del corpo posizionato al di fuori della superficie plantare del piede completamente aderente a terra (12,22). Deficit propriocettivi nel core possono contribuire a diminuire il controllo neuromuscolare attivo delle estremità inferiori, portando potenzialmente ad un'angolazione valga e un'incremento dello stress sui legamenti del ginocchio (3,15,19,27,37).

Il core include le strutture passive della spina toraco-lombare, del bacino e un contributo attivo della muscolatura del tronco (35). La stabilità del core è contingente al controllo neuromuscolare del tronco in risposta a forze esterne ed interne, incluse forze generate da parti distali del corpo e da perturbazioni attese o inattese. La core stability, come definita generalmente nella letteratura di medicina sportiva, è un fondamento del controllo dinamico del tronco che permette la produzione, il controllo e il trasferimento della forza e del movimento ai segmenti distali della catena cinetica (20). Per le esigenze di questo studio, è stata formulata una definizione operativa più dettagliata. La core stability viene definita come la capacità del corpo di mantenere o riassumere una relativa posizione del tronco dopo una perturbazione.

Deficit nel controllo neuromuscolare del core possono contribuire a un comportamento instabile o infortunio su tutti i segmenti della catena cinetica (19). Ad esempio, l'affaticamento della muscolatura addominale sembra contribuire al verificarsi di infortuni ai femorali (10). In linea con questi risultati, alcuni studi su soggetti che avevano precedentemente subito distorsioni alle caviglie, hanno dimostrato un ritardo nell'attivazione del gluteo massimo e del gluteo medio (2). Cholewicki et al. (8) hanno osservato come ritardi nella risposta dei riflessi dei muscoli del tronco possa prevedere infortuni della zona lombare in atleti collegiali. Un altro studio su larga scala ha osservato come atlete femminili che avessero subito un infortunio alle caviglie mostrassero una maggiore oscillazione del corpo rispetto ad atlete sane (4). In contrasto, un forte indicatore di potenziale infortunio negli atleti maschi è stato individuato nel range motorio della caviglia e non nel livello di propriocezione (4). Ad oggi, nessuno studio è riuscito a stabilire una correlazione tra controllo neuromuscolare del core e infortuni alle ginocchia.

Molti movimenti atletici, come la corsa, il salto o il cambio di direzione, sono essenzialmente instabili e richiedono un controllo neuromuscolare per mantenere la stabilità e migliorare la performance (25,26). Il controllo neuromuscolare del tronco si basa sul controllo del feedback. Le informazioni inerenti allo stato del sistema, come la posizione di ogni segmento, è ricevuta e utilizzata per modificare i comandi dei movimenti. Un insieme di informazioni sensoriali è utilizzata per monitorare il sistema nel tempo (11). Poiché il controllo è guidato dallo stato percepito e non dallo stato reale, l'accuratezza nella rappresentazione del sistema è di assoluta importanza. Un sistema scarsamente rappresentato non può essere controllato in maniera adeguata e ad un certo punto diventerà instabile. Conseguentemente, una scarsa propriocezione del core può portare ad uno scarso controllo del core, che a sua volta influenza il controllo del ginocchio e può portare ad infortuni al ginocchio.

Lo scopo di questa investigazione è quello di identificare fattori potenziali correlati al controllo

propriocezione del core possa giocare un ruolo nella stabilità dinamica delle estremità inferiori e negli infortuni alle ginocchia. La prima ipotesi è che scarsa propriocezione aumenti il rischio di infortuni alle ginocchia. La seconda ipotesi è che deficit di propriocezione possano predire il rischio di infortuni alle ginocchia nelle atlete femminili ma non negli atleti maschi. Deficienze misurabili nella propriocezione del core potrebbero identificare fattori di rischio neuromuscolari modificabili che predispongono gli atleti ad infortuni alle ginocchia.

## **Metodi:**

### **Soggetti**

I partecipanti volontari a questo studio erano 277 atleti della Yale University. Tra loro vi erano 140 donne (età media  $19.4 \pm 1.0$  anni; altezza media  $170 \pm 0.08$  m.; massa corporea media  $65.6 \pm 8.7$  kg; BMI medio  $22.6 \pm 2.2$  kg/m<sup>2</sup>) e 137 uomini (età media  $19.3 \pm 1.8$  anni; altezza media  $1.83 \pm 0.08$  m.; massa corporea media  $79.9 \pm 11.9$  kg; BMI medio  $23.8 \pm 2.8$  kg/m<sup>2</sup>). Gli atleti sono stati testati inizialmente e quindi monitorati per un periodo di 3 anni osservando qualsiasi infortunio alle ginocchia. Prima della fase di testing iniziale, ogni soggetto ha completato un questionario di 45 domande su informazioni personali, esperienza atletica e storia personale di infortuni. Nessuno degli atleti partecipanti allo studio aveva subito precedenti infortuni alle ginocchia. Infortuni alle ginocchia sono stati definiti come qualsiasi infortunio legamentoso, meniscale o patellofemorale, diagnosticati dallo staff medico universitario. Contusioni e fratture sono state escluse dalla lista. Gli infortuni alle ginocchia sono quindi stati ulteriormente suddivisi in meniscali e/o legamentosi, e quindi solo infortuni al legamento crociato anteriore. Tutti gli infortuni legamentosi e meniscali sono stati confermati tramite risonanza magnetica (MRI). Tutti i soggetti hanno acconsentito in pieno allo studio, che è stato approvato dallo Human Investigation Committee.

### **Esperimento Propriocettivo**

La propriocezione del core è stata valutata utilizzando un apparecchio precedentemente validato come descritto da Taimela et al. (Fig.1)(23,24,33). L'apparecchio è stato disegnato per produrre un movimento passivo della spina lombare nel piano trasverso. I soggetti venivano posizionati su questo apparecchio in modo che l'asse di rotazione verticale si estendesse attraverso le vertebre L4/L5. Il sedile era mosso da un motore ad una velocità lenta e costante. Il contributo del sistema vestibolare veniva eliminato poiché la parte alta del corpo rimaneva attaccata allo schienale con una cintura ancorata in 4 punti e la parte bassa del corpo si muoveva in un asse parallelo al suolo. Sono state inoltre prese precauzioni per eliminare input auditivi e visivi derivanti dal movimento dell'apparecchio. In questo modo il test propriocettivo si focalizzava principalmente sul feedback dei mecanorecettori articolari e muscolare del tronco.

I soggetti sono stati inizialmente ruotati di 20° rispetto alla postura neutrale della spina (ad una velocità di 2° al secondo) e brevemente mantenuti in questa posizione per 3 secondi. Nel test passivo i soggetti venivano lentamente ruotati verso la posizione originale dal motore (ad una velocità di 1° al secondo). Nel test attivo i soggetti ruotavano autonomamente una volta che il motore veniva disattivato. In entrambi i test i partecipanti fermavano l'apparecchio una volta che percepivano di essere rientrati nella posizione neutrale iniziale. Ogni soggetto ha effettuato 4 movimenti di prova prima di ogni test, 2 in ogni direzione. Successivamente, 5 test randomizzati in ogni direzione venivano effettuati per ogni test.

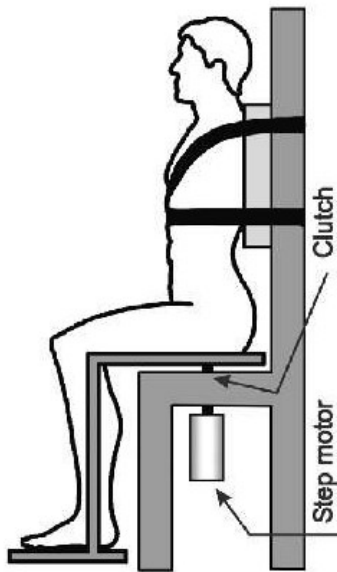


Fig.1

### Analisi statistica

L'errore medio di riposizionamento di tutti i 10 test sono stati calcolati. Per determinare il set di parametri più appropriati per l'analisi regressiva, è stato utilizzato un 2-factor ANOVA with Tukey's post-hoc test per utilizzare le misurazioni che differivano significativamente tra atleti infortunati e non ( $P \leq 0.05$ ). I 2 factors erano i seguenti: infortunio alle ginocchia contro non-infortunio alle ginocchia, e femmine contro maschi. Le misurazioni dipendenti erano l'errore assoluto medio nel riposizionamento propriocettivo attivo (APR) e nel riposizionamento propriocettivo passivo (PPR). Una precedente analisi  $\Lambda$  ha determinato che 21 infortuni erano necessari per ottenere una potenza adeguata di 0.8.

La riproducibilità di entrambe le misure è stata testata calcolando i coefficienti di correlazione intraclasse (ICC) (2, k) tra le medie dei primi 5 test e gli ultimi 5 per ognuno dei 277 soggetti. La riproducibilità del APR e del PPR era buona come indicato dal ICC di rispettivamente 0.61 e 0.58.

### Risultati:

Nel periodo di controllo di 3 anni, 25 dei 277 atleti hanno subito infortuni alle ginocchia; 11 atleti femmine e 14 atleti maschi (Tabella 1). Ci sono stati 16 infortuni legamentosi e/o meniscali; 7 sono stati subiti da donne e 9 da uomini. Di questi, 11 erano infortuni ai legamenti. Sei soggetti hanno subito rotture del legamento crociato anteriore, 4 erano femmine e 2 maschi. Tutti gli infortuni al crociato anteriore sono stati confermati con risonanza magnetica.

TABLE 1  
Description of the Injured Athletes<sup>a</sup>

Athlete	Sex	Injury	Classification		
			Knee	Lig/Men	ACL
1	F	ACL	X	X	X
2	M	ACL/MCL	X	X	X
3	M	PF	X		
4	M	MCL	X	X	
5	F	ACL/MCL/MEN	X	X	X
6	F	PF	X		
7	M	PF	X		
8	M	LCL/MEN	X	X	
9	M	PF	X		
10	F	PF	X		
11	F	PF	X		
12	F	PF	X		
13	F	MEN	X	X	
14	M	PF	X		
15	F	PF/MEN	X	X	
16	M	PF/MEN	X	X	
17	M	MEN	X	X	
18	M	MCL/MEN	X	X	
19	F	ACL/MEN	X	X	X
20	F	PF/MEN	X	X	
21	M	PF	X		
22	M	MEN	X	X	
23	M	ACL/MEN	X	X	X
24	M	MCL	X	X	
25	F	ACL/MEN	X	X	X

<sup>a</sup>Lig/men, ligament and meniscus; MEN, meniscus; ACL, anterior cruciate ligament; F, females; M, males; MCL, medial collateral ligament; PF, patellofemoral; LCL, lateral collateral ligament.

Tabella 1

L'ANOVA ha mostrato un'interazione significativa tra il sesso dei partecipanti e gli infortuni alle ginocchia. Deficit in APR sono stati osservati nei soggetti femmine con infortuni alle ginocchia (2.2°) e legamentosi/meniscali (2.4°) paragonati con con atlete non infortunate (1.5°,  $P < .05$ )(Fig. 2). Non è stata riscontrata nessuna differenza significativa nell'errore medio di APR tra soggetti maschi infortunati e non ( $P > .05$ )(Fig. 2). Notabilmente, le atlete femmine non infortunate hanno mostrato un errore medio di APR significativamente inferiore rispetto agli atleti maschi non infortunati (1.5° contro 1.7°,  $P \leq .05$ )(Fig. 2). Non è stata osservata nessuna differenza nell'errore medio di PPR tra soggetti infortunati e non ( $P \geq .05$ ).

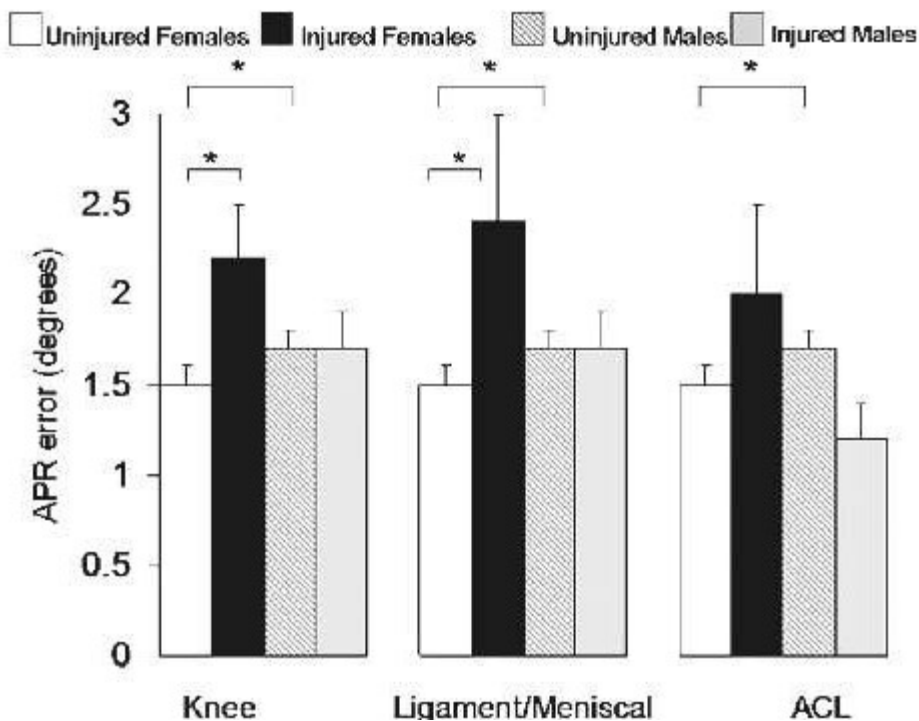


Fig. 2

Per ogni incremento di un grado nell'errore medio di APR, è stato osservato un incremento di 2.9 volte della probabilità di infortuni alle ginocchia ( $P=.005$ ) e un incremento di 3.3 volte della probabilità di infortuni meniscali/legamentosi ( $P=.007$ ). Il riposizionamento propriocettivo attivo (APR) ha predetto infortuni alle ginocchia con una sensibilità del 90% e una specificità del 56%, e infortuni legamentosi/meniscali con una sensibilità del 86% e una specificità del 61% nelle atlete femminili (Tabella 2).

TABLE 2  
Results of a Logistic Regression Analysis for Predicting Knee Injuries<sup>a</sup>

	Women				Men			
	Knee	Lig/Men	Lig	ACL	Knee	Lig+Men	Lig	ACL
APR error ( <i>P</i> value)	0.006	0.007	—	—	0.914	0.852	—	—
Odds ratio	2.91	3.31	—	—	—	—	—	—
Overall <i>P</i> value	0.005	0.007			0.913	0.851		
Concordant observations	72.9%	74.0%			38.1%	39.8%		
Sensitivity	90%	86%			62%	75%		
Specificity	56%	61%			53%	40%		

<sup>a</sup>LigMen, ligament and meniscus; Lig, ligament; ACL, anterior cruciate ligament; APR, active proprioceptive repositioning.

Tabella 2

I risultati di questo studio dimostrano che errori nella propriocezione del core sono associati con un incremento del rischio di infortuni alle ginocchia, il che supporta la nostra prima ipotesi. La scarsa APR del tronco nelle atlete che hanno successivamente subito infortuni alle ginocchia supporta la nostra seconda ipotesi e indica che la ridotta propriocezione del core può alterare la stabilità dinamica e può aiutare a spiegare l'incremento nel rischio di infortuni alle ginocchia durante l'attività sportiva in questa popolazione già a rischio. I deficit propriocettivi sono stati osservati in APR e non in PPR nelle atlete femminili infortunate. I test attivi (APR) e passivi (PPR) differiscono tra di loro relativamente al contributo dell'input sensoriale dei recettori muscolari. Nel test attivo, i muscoli del tronco generano il movimento e mantengono il drive dei fusimotori, coinvolgendo così il feedback dei fusi muscolari (11). Ad ogni modo, durante il test passivo, quando i muscoli non sono attivi, l'attività dei fusimotori e il feedback sensoriale dei fusi muscolari è inferiore. Quindi, l'input da recettori cutanei e articolari ha un ruolo più importante nel feedback sensoriale (11). In questo modo il livello di input dai fusi muscolari durante la riproduzione della posizione del tronco sarà diversa nei test attivi e passivi. I deficit osservati in propriocezione attiva possono essere connessi a manovre atletiche attive associate con infortuni alle ginocchia.

La seconda ipotesi è che deficit propriocettivi avrebbero predetto il rischio di infortuni alle ginocchia nelle atlete femminili. Abbiamo ipotizzato come questa relazione non sarebbe stata osservata negli atleti maschi per molteplici ragioni. Innanzitutto uomini e donne hanno diverse incidenze di infortuni al crociato anteriore e potenzialmente anche diversi meccanismi intrinseci di infortuni al ACL (22). Inoltre dati raccolti in precedenza dimostrano come l'oscillazione del corpo fosse nettamente peggiore nelle donne che avevano sofferto infortuni al crociato rispetto agli uomini (16). In linea con i dati precedentemente riscontrati, le atlete femminili che non hanno subito infortuni alle ginocchia hanno mostrato una migliore abilità propriocettiva del tronco rispetto agli atleti maschili non infortunati. In aggiunta, i risultati trovati da Beynnon et al. (4) relativi agli infortuni alle caviglie mostrano come uomini e donne abbiano indicatori di rischio di infortunio significativamente diversi. L'oscillazione del corpo (body sway) è stata individuata come un forte indicatore di infortuni alle caviglie nelle atlete femminili ma non in quelli maschili (4).

Hewett et al. (14,16) suggeriscono come l'allenamento neuromuscolare dinamico che aumenti il controllo del core possa migliorare la stabilità dinamica dell'articolazione del ginocchio. Deficit propriocettivi e neuromuscolari sono stati osservati dopo la rottura del legamento crociato anteriore e quasi fino alla fine del periodo riabilitativo post-operatorio. Pazienti con deficit al ACL hanno limitazioni nell'oscillazione posturale. Donne con problemi al ACL e dopo la ricostruzione del legamento crociato possiedono maggiori deficit di controllo propriocettivo e neuromuscolare rispetto alle loro controparti maschili (16).

La letteratura pubblicata che tratta di oscillazione posturale e differenze di sesso è equivoca, poiché altri 2 studi riportano come non ci siano differenze tra i sessi in oscillazione posturale su piattaforme di forza quando i soggetti sono sani (5,13). Al contrario Hewett et al. (16,17) ha esaminato l'equilibrio monopodalico di soggetti maschi e femmine sani e ha riportato come le donne avessero un miglior equilibrio su un piano instabile dinamico rispetto agli uomini. D'altro canto nei soggetti con problemi al ACL, gli uomini riuscivano ad ottenere una performance preoperatoria migliore rispetto alle donne (16,17). I risultati sulle differenze propriocettive tra i sessi sottolineano importanti questioni. Per prima cosa le donne con ginocchia intatte hanno un miglior equilibrio monopodalico rispetto agli uomini con ginocchia intatte. Questa differenza è attribuibile alla posizione più bassa del centro di gravità presente nelle donne (21). Ad ogni modo, dopo un infortunio al ACL, le donne mostrano deficit di stabilità più rimarcati rispetto agli uomini (16). Inoltre, il processo di riacquisto dell'equilibrio dopo la ricostruzione del crociato è più lento nelle donne rispetto agli uomini (16).

Hewett et al. (16) pone un importante problema, se i soggetti femmine con rotture del crociato anteriore avessero deficit di equilibrio o controllo posturale prima dell'infortunio, il che creerebbe una predisposizione all'infortunio, oppure la possibilità alternativa che l'infortunio al ACL sia più traumatico ai

possibilità che le atlete femminili con deficit propriocettivi possiedano una maggiore propensione per gli infortuni alle ginocchia e ci sia quindi bisogno di uno screen preventivo prima della partecipazione nell'attività sportiva per calcolare il rischio di infortunio. Esistono numerose prove che il controllo neuromuscolare del tronco e delle estremità inferiori possa essere migliorato con un allenamento neuromuscolare (18,28,30,34,36).

Il nostro studio ha avuto un numero relativamente basso di infortuni, in particolar modo del ACL. Questo numero così basso potrebbe aver precluso potenzialmente la nostra abilità di individuare scarsa APR come indicatore di potenziale infortuni alle ginocchia o ACL. I test di propriocezione nella spina lombare sono stati condotti in condizioni e con posture relativamente artificiali. Il bacino è stato immobilizzato per isolare il movimento del tronco. La maggior parte dei test clinici sull'oscillazione posturale e propriocezione sono condotti con il soggetto in equilibrio su una gamba, il che coinvolge tutti i segmenti inferiori del corpo e il tronco. Tutti questi fattori possono essere potenziali variabili che creano confusione rispetto alla propriocezione isolata del core in questi test clinici (32). In opposizione, il metodo da noi riportato indica una misura più diretta della propriocezione del core.

### **Conclusioni:**

Carenze nella propriocezione attiva del core hanno predetto infortuni alle ginocchia nelle atlete femminili. Gli atleti dovrebbero essere valutati per potenziali deficit propriocettivi all'inizio della stagione e nel caso inseriti in un programma di allenamento neuromuscolare attivo specifico. Esercitazioni che incorporino allenamento neuromuscolare del core ed esercizi propriocettivi, possono ridurre significativamente il rischio di infortuni alle ginocchia in questa popolazione di atleti ad alto rischio. Investigazioni future dovrebbero indagare su modalità di allenamento neuromuscolare disegnata espressamente per migliorare la propriocezione del core.

### **Referenze:**

1. Arendt E, Dick R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer: NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med.* 1995;23:694-701.

2. Beckman SM, Buchanan TS. Ankle inversion injury and hypermobility: effect on hip and ankle muscle electromyography onset latency. *Arch Phys Med Rehabil.* 1995;76:1138-1143.
3. Bendjaballah MZ, Shirazi-Adl A, Zukor DJ. Finite element analysis of human knee joint in varus-valgus. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1997;12:139-148.
4. Beynon B, Vacek PM, Abate JA III, Murphy D, Paller D. A prospective study of risk factors for first-time ankle inversion ankle ligament trauma. In: *The Thirty-second Annual Meeting of the American Orthopaedic Society for Sports Medicine.* Hershey, Pa; 2006.
5. Black FO, Wall C 3rd, Rockette HE Jr, Kitch R. Normal subject postural sway during the Romberg test. *Am J Otolaryngol.* 1982;3:309-318.
6. Bullock-Saxton JE, Janda V, Bullock MI. The influence of ankle sprain injury on muscle activation during hip extension. *Int J Sports Med.* 1994;15:330-334.
7. Chandy TA, Grana WA. Secondary school athletic injury in boys and girls: a 3-year comparison. *Phys Sportsmed.* 1985;13(3):106-111.
8. Cholewicki J, Silfies SP, Shah RA, et al. Delayed trunk muscle reflex responses increase the risk of low back injuries. *Spine.* 2005;30:2614-2620.
9. Deitch JR, Starkey C, Walters SL, Moseley JB. Injury risk in professional basketball players: a comparison of Women's National Basketball Association and National Basketball Association athletes. *Am J Sports Med.* 2006;34:1077-1083.
10. Devlin L. Recurrent posterior thigh symptoms detrimental to performance in rugby union: predisposing factors. *Sports Med.* 2000;29:273-287.
11. Gandevia SC, McCloskey DI, Burke D. Kinaesthetic signals and muscle contraction. *Trends Neurosci.* 1992;15:62-65.
12. Griffin LY, American Academy of Orthopaedic Surgeons. *Prevention of Noncontact ACL Injuries.* Rosemont, Ill: Academy; 2001.
13. Hellenbrandt FA, Braun GL. The influence of sex and age on the postural sway of man. *Am J Phys Anthropol.* 1939;14:347-360.
14. Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: part 2, a meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention. *Am J Sports Med.* 2006;34:490-498.
15. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am J Sports Med.* 2005;33:492-501.
16. Hewett TE, Paterno MV, Myer GD. Strategies for enhancing proprioception and neuromuscular control of the knee. *Clin Orthop.* 2002;402:76-94.
17. Hewett TE, Paterno MV, Noyes FR. Differences in single leg balance on an unstable platform between female and male normal, ACL-deficient, and ACL-reconstructed knees. In: *The Twenty-fifth Annual Meeting of the American Orthopaedic Society for Sports Medicine.* Traverse City, Mich; 1999.
18. Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, Noyes FR. Plyometric training in female athletes: decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med.* 1996;24:765-773.
19. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD, Ford KR. A review of electromyographic activation levels, timing differences, and increased anterior cruciate ligament injury incidence in female athletes. *Br J Sports Med.* 2005;39:347-350.
20. Kibler WB, Press J, Sciascia A. The role of core stability in athletic function. *Sports Med.* 2006;36:189-199.
21. Klafs CE, Arnheim DD. *Modern Principles of Athletic Training 7th Edition.* St Louis, Mo: C V. Mosby; 1989.
22. Krosshaug T, Nakame A, Boden B, et al. Mechanisms of ACL injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med.* In press.
23. Leinonen V, Kankaanpaa M, Luukkonen M, et al. Lumbar paraspinal muscle function, perception of lumbar position, and postural control in disc herniation-related back pain. *Spine.* 2003;28:842-848.
24. Leinonen V, Maatta S, Taimela S, et al. Impaired lumbar movement perception in association with postural stability and motor- and somatosensory-evoked potentials in lumbar spinal stenosis. *Spine.* 2002;27:975-983.
25. Loram ID, Kelly SM, Lakie M. Human balancing of an inverted pendulum: is sway size controlled by ankle impedance? *J Physiol.* 2001;532:879-891.
26. Loram ID, Lakie M. Human balancing of an inverted pendulum: position control by small, ballistic-like, throw and catch movements. *J Physiol.* 2002;540:1111-1124.
27. Markolf KL, Burchfield DM, Shapiro MM, Shepard MF, Finerman GA, Slaughterbeck JL. Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *J Orthop Res.* 1995;13:930-935.
28. Myer GD, Ford KR, Brent JL, Hewett TE. The effects of plyometric versus dynamic balance training on power, balance, and landing force in female athletes. *J Strength Cond Res.* 2006;20:345-353.
29. Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Rationale and clinical techniques for anterior cruciate ligament injury prevention in female athletes. *J Athl Train.* 2004;39(4):352-364.
30. Myer GD, Ford KR, Palumbo JP, Hewett TE. Comprehensive neuromuscular training improves both performance and lower-extremity biomechanics in female athletes. *J Strength Cond Res.* 2005;19:51-60.
31. NCAA. *NCAA Injury Surveillance System Summary.* Indianapolis, Ind: National Collegiate Athletic Association; 2002.
32. Preuss R, Grenier S, McGill S. The effect of test position on lumbar spine position sense. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2003;33:73-78.
33. Taimela S, Kankaanpaa M, Luoto S. The effect of lumbar fatigue on the ability to sense a change in lumbar position: a controlled study. *Spine.* 1999;24:1322-1327.
34. Wilder DG, Aleksiev AR, Magnusson ML, Pope MH, Spratt KF, Goel VK. Muscular response to sudden load: a tool to evaluate fatigue and rehabilitation. *Spine.* 1996;21:2628-2639.
35. Willson JD, Dougherty CP, Ireland ML, Davis IM. Core stability and its relationship to lower-extremity function and injury. *J Am Acad Orthop Surg.* 2005;13:316-325.
36. Wojtyls EM, Huston LJ, Taylor PD, Bastian SD. Neuromuscular adaptations in isokinetic, isotonic, and agility training programs. *Am J Sports Med.* 1996;24:187-192.
37. Zazulak BT, Ponce PL, Straub SJ, Medvecky MJ, Avedisian LA, Hewett TE. The effect of gender on hip muscle activity during landing. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2005;35:292-299.
38. Zelisko JA, Noble HB, Porter M. A comparison of men's and women's professional basketball injuries. *Am J Sports Med.* 1982;10:297-299.