

La coactivació del bíceps femoral limita la força màxima isomètrica d'extensió de genoll en ciclistes de ruta

DAVID GARCÍA-LÓPEZ^a, GUILHERME BRESCIANI^b, SALVADOR CABEZA DE VACA^c, NURIA GARATACHEA^b
I JOSÉ A. DE PAZ^b

^aFacultat de Ciències de la Salut. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid. Espanya.

^bDepartament de Fisiologia. Universitat de Lleó. Lleó. Espanya.

^cFederación Andaluza de Ciclismo. Sevilla. Espanya.

RESUM

Introducció i objectius: L'objecte d'aquest estudi era analitzar la coactivació antagonista (bíceps femoral) durant una contracció màxima isomètrica d'extensió unilateral de genoll en ciclistes de ruta, com també la seva relació amb l'activació agonista (recte femoral, vast medial i vast lateral) i la força manifestada. L'activació dels músculs gastrocnemius també va ser monitoritzada.

Mètodes: Setze ciclistes federats van fer una prova màxima d'extensió isomètrica de genoll. Durant els 5 s de durada del test amb la cama dominant, es va monitoritzar l'activitat electromiogràfica (EMG) de 6 músculs del tren inferior, a més de la força isomètrica manifestada.

Resultats: L'activitat EMG mitjana (EMG_{mit}) del bíceps femoral va suposar un 37,4% de l' EMG_{mit} per mitjana dels 3 agonistes. Per la seva banda, la mitjana d' EMG_{mit} dels gastrocnemius va suposar un 18,2% de la mitjana d' EMG_{mit} dels agonistes. Analitzant per separat l' EMG_{mit} de cadascun dels 3 músculs agonistes, vam observar que aquest paràmetre d'activació va ser estadísticament superior en el recte femoral en comparació amb vast medial i vast lateral. L' EMG_{mit} del bíceps femoral es va mostrar inversament proporcional a la força isomètrica màxima. Amb tot, l'activació de la resta de músculs, tant mitjana com màxima, no va mostrar cap relació amb la força.

Conclusions: L'activació antagonista limita la força màxima isomètrica d'extensió de genoll en ciclistes de ruta. Tant aquest fet com l'excessiva activació del recte femoral poden tenir relació amb les diferències biomecàniques existents entre el pedaleig, gest propi de la modalitat practica- da pels subjectes, i l'extensió de genoll en màquina.

PARAULES CLAU: Coactivació antagonista. Electromiografia de superfície. Força màxima isomètrica. Extensió de genoll. Ciclistes de ruta.

ABSTRACT

Introduction and objectives: The aim of this study was to analyze antagonist coactivation (biceps femoris) during maximal isometric leg extension in road cyclists, and its relationship with agonist activation (rectus femoris, medial vastus, lateral vastus) and the force developed. Gastrocnemius activation was also monitored.

Methods: Sixteen road cyclists carried out a maximum unilateral isometric contraction on a leg-extension machine, using their dominant leg. The test lasted 5 seconds and the isometric force and electromyographic (EMG) activity of 6 lower limb muscles was monitored.

Results: Antagonist and gastrocnemius average EMG activity (EMG_{med}) was 37.4% and 18.2% of the agonist EMG_{med} respectively. Analysis of the EMG_{med} of each of the 3 agonist muscles separately showed that the rectus femoris EMG_{med} was significantly higher than the vastus medialis and vastus lateralis EMG_{med} . Biceps femoris EMG_{med} was negatively correlated with maximal isometric force. However, neither agonist nor gastrocnemius activation was related to the force developed.

Conclusions: Antagonist coactivation limits the maximum isometric force on knee extension in road cyclists. This finding and excessive rectus femoris activation could be related to biomechanical differences between pedaling – the movement practiced by cyclists – and leg extension on the machine.

KEY WORDS: Antagonist coactivation. Surface EMG. Maximal isometric force. Leg extension. Road cyclists.

INTRODUCCIÓ

L'activació dels músculs antagonistes durant una acció determinada és un fet comú¹, principalment quan la contracció agonista és forta i/o ràpida², i quan els subjectes no estan acostumats a aquesta tasca³. Aquesta coactivació pot col·laborar amb els lligaments en l'estabilització articular durant contraccions fortes², i d'alguna manera esdevé necessària a fi de prevenir potencials danys⁴. Tanmateix, tot excés de coactivació antagonista és clarament perjudicial respecte de la producció de força màxima, ja que a més de suposar una tensió aplicada en sentit contrari al desitjat⁵, impedeix, per inhibició recíproca, la completa activació agonista⁶. Macaluso et al⁷ han demostrat recentment que la pèrdua de força d'extensió de genoll que s'esdevé amb el pas dels anys, no sols té com a causa una disminució de la massa muscular, sinó també una major coactivació antagonista. De totes maneres, diversos autors han demostrat que la coactivació antagonista es pot reduir amb l'entrenament^{8,9}.

D'altra banda, sembla que els músculs que actuen sobre l'articulació del genoll segueixen patrons d'activació diferents en funció del tipus de cadena cinètica que comporti l'activitat. Així, els diversos músculs del quàdriceps s'activen més homogèniament durant una contracció màxima isomètrica en màquina d'extensió de genoll (cadena cinètica oberta) que no pas en una contracció màxima isomètrica en premsa (cadena cinètica tancada)¹⁰. Atès que el pedaleig és un dels exemples més clars de cadena cinètica tancada, podem pensar que l'activació muscular d'agonistes, antagonistes i sinergistes no és la més eficaç en subjectes acostumats a aquest gest (ciclistes) quan es reclama una contracció màxima isomètrica en màquina d'extensió de genoll.

Per tant, l'objectiu d'aquest estudi va ser analitzar la coactivació antagonista (bíceps femoral [BF]) durant una contracció màxima isomètrica d'extensió unilateral de genoll en ciclistes de ruta, com també la seva relació amb l'activació agonista (recte femoral [RF], vast medial [VM] i vast lateral [VL]) i la força manifestada.

MÈTODES

Subjectes

En l'estudi van participar 16 homes, ciclistes de ruta. Tots participaven regularment en competicions d'àmbit nacional, en categoria júnior. Cap tenia experiència amb el treball en màquina d'extensió de genoll. Tots els subjectes van

ser informats prèviament de les característiques i els objectius de l'estudi en què havien de participar, i s'hi van inscriure voluntàriament.

Procediments

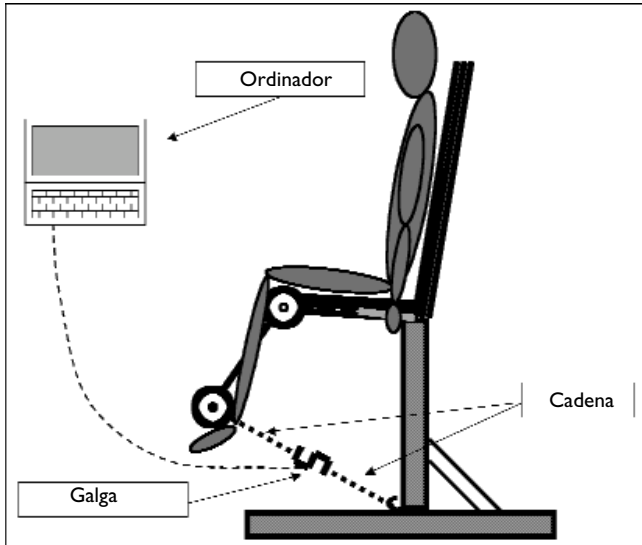
La fase experimental de l'estudi va ser duta a terme en 2 sessions de laboratori, amb 72 h de separació entre cadascuna. Durant la primera sessió es van obtenir les dades descriptives, incloent-hi edat, altura (estadímetre Detecto D52®, Estats Units), pes (bàscula Còbol 20®, Barcelona, Espanya) i percentatge de greix corporal, que va ser calculat amb el mesurament de 3 plecs cutanis (plicòmetre Lafayette Instruments®, Estats Units), emprant l'equació desenvolupada per Jackson i Pollock¹¹. Un cop finalitzada la valoració antropomètrica, els individus van fer un escalfament estàndard de 10 minuts de durada, i després es van assegurar a la màquina d'extensió de genoll (Salter®, Barcelona, Espanya) per a l'ajustament del respall (90° d'angulació de maluc) i del corró (90° d'angulació de genoll), amb aquest en contacte amb l'extrem distal de la tibia, la qual cosa permetia una posició neutra a l'articulació del turmell. En aquesta posició, cadascun dels subjectes va fer 3 contraccions màximes isomètriques d'extensió unilateral (cama dominant) de genoll. Aquests intents, de 5 segons de durada i separats entre si de 3 minuts, tenien l'objectiu de familiaritzar els individus amb el test.

Tres dies després els subjectes van tornar al laboratori per repetir el test d'extensió màxima isomètrica de genoll, aquesta vegada amb el registre de la força i de l'activitat electromiogràfica (EMG) de 6 músculs del membre inferior dominant: RF, VM, VL, BF, gastrocnemi medial (GM) i gastrocnemi lateral (GL). Prèviament a la fase d'escalfament (un escalfament semblant al de la primera sessió de laboratori) i amb cada subjecte assegut, es va preparar la pell (afaitat i netejat) i col·locació dels elèctrodes de superfície (Ag/AgCl, Skintact®, Àustria), per a la qual cosa es demanava a l'individu una contracció isomètrica de baixa intensitat, amb vista a la localització anatòmica del ventre de cadascun dels músculs que s'havien de sotmetre a estudi¹². Cada parell d'elèctrodes, amb una separació interelèctrode de 2 cm¹³, va ser col·locat en sentit longitudinal a la direcció de les fibres musculars, d'acord amb la bibliografia específica¹⁴. L'elèctrode de referència (un per cada múscul) es va situar en una àrea neutral.

Una vegada col·locats els elèctrodes i finalitzat el període d'escalfament, cadascun dels subjectes va fer el test

Figura 1

Esquema del test de força màxima isomètrica en màquina d'extensió de genoll.



de força màxima isomètrica unilateral a la mateixa màquina d'extensió de genoll en què va tenir lloc la familiarització. Així, durant els 5 s de durada del test es va registrar tant l'activitat EMG dels músculs seleccionats (ME6000®, Mega Electronics, Kuopio, Finlàndia) com la força isomètrica d'extensió de genoll (galga extensiomètrica Globus Ergo Meter®, Globus, Codogne, Itàlia) (fig. 1). La prova es va repetir 2 vegades, tot considerant per a l'anàlisi aquella en què s'havia obtingut un valor de força màxima més alt. Així, del millor dels intents es va agafar el valor de força isomètrica màxima (FI_{\max}) i mitja (FI_{mit}), essent aquest últim calculat mitjançant la integral de l'àrea existent sota la corba força-temps.

L'anàlisi de l'activitat EMG corresponent als 5 segons del test seleccionat es va dur a terme per mitjà d'un programari específic (MegaWin V 2.21, Mega Electronics, Kuopio, Finlàndia). D'aquesta manera, del senyal EMG cru, se'n va fer la mitjana per obtenir l'amplitud mitjana (EMG_{mit}). Aquest senyal cru es va normalitzar mitjançant de l'arrel quadràtica, a fi d'obtenir el pic màxim d'activació (EMG_{\max}).

Anàlisi estadística

L'anàlisi estadística de l'activitat EMG es va dur a terme mitjançant un ANOVA d'una via, utilitzant el test de Bonferroni *a posteriori* per establir les diferències concretes entre agonistes (mitjana de l'activitat EMG d'RF, VM i VL), antagonistes (BF) i gastrocnemis (mitjana de l'activitat EMG de GM i GL). A més, mitjançant un altre ANOVA, amb la mateixa anàlisi *post-hoc*, es van estudiar les diferències entre cadascun dels 6 músculs per separat. L'estudi de les correlacions es va dur a terme mitjançant el test de Pearson. Totes les proves estadístiques es van fer amb l'ajuda del programari SPSS® 13.0 (Chicago, Estats Units), tot mantenint-se un nivell de significació de $P < 0,05$. Tots els valors presentats en text i en les taules apareixen com a mitjana \pm SD.

RESULTATS

Tant els valors descriptius de la mostra (edat, talla, massa i percentatge de greix corporal) com el valors de FI_{\max} i FI_{mit} apareixen reflectits en la taula I.

Com es pot observar en la figura 2, l' EMG_{mit} dels músculs agonistes durant els 5 s de la prova va ser estadísticament superior ($p < 0,01$) a l' EMG_{mit} d'antagonistes i gastrocnemis. D'aquesta manera, l' EMG_{mit} del BF va suposar un 37,4% de la mitjana d' EMG_{mit} dels 3 agonistes (RF, VM i VL). Per la seva banda, la mitjana d' EMG_{mit} dels gastrocnemis (GM i GL) va suposar un 18,2% de la mitjana d' EMG_{mit} dels agonistes. Si comparem l' EMG_{mit} de cadascun dels 3 músculs agonistes per separat, s'observa que aquest paràmetre d'activació és estadísticament superior ($p < 0,01$) en l'RF en comparació amb VM i VL.

Observant el pic d'amplitud (EMG_{\max}) (figura 3), es constata un comportament semblant al de l' EMG_{mit} . Així, els agonistes mostren una EMG_{\max} estadísticament superior ($p < 0,01$) a antagonistes i gastrocnemis. Aquests darrers, al contrari del que s'esdevenia amb l' EMG_{mit} , van assolir una EMG_{\max} superior a la dels antagonistes, si bé aquesta diferència no va aconseguir significació estadística. Analitzant el pic d'activació de cadascun dels 3 agonistes per separat, vam

Taula I

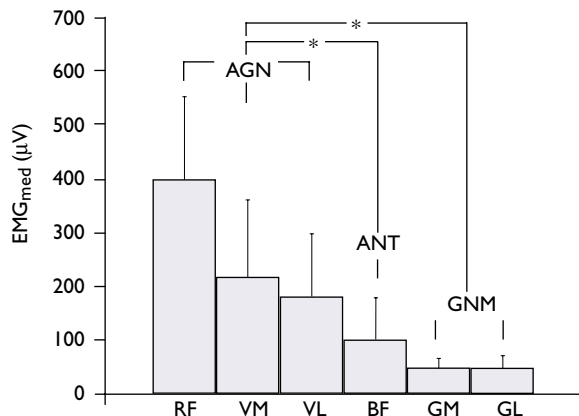
Valors descriptius de la mostra, força isomètrica màxima (FI_{\max}) i força isomètrica mitjana (FI_{mit})

Edat	Talla	Massa	Greix corporal	FI_{\max}	FI_{mit}
16,9 \pm 2,2	173,6 \pm 5,5	65,8 \pm 6,6	9,06 \pm 0,7	528,5 \pm 190,1	407,9 \pm 163,5

Valors expressats com mitjana \pm desviació estàndard.

Figura 2

EMG_{mit} (mV) de cadascun dels sis músculs estudiats, agrupats en agonistes (AGN), antagonistes (ANT) i gastrocnemis (GNM).
* $p < 0,01$



BF: bíceps femoral; GL: gastrocnemi lateral; GM: gastrocnemi medial; RF: recte femoral; VL: vast lateral; VM: vast medial.

comprovar que l'EMG_{màx} de l'RF va ser estadísticament superior ($p < 0,01$) a l'EMG_{màx} del VL.

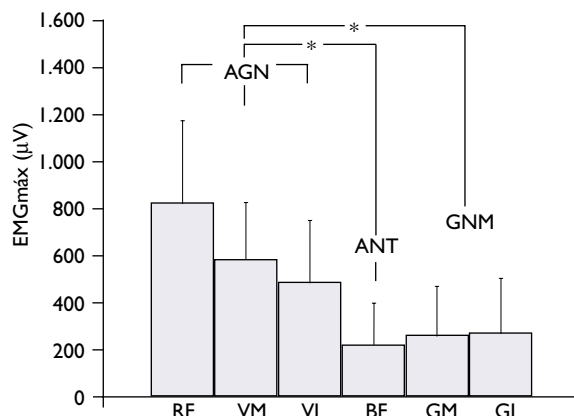
Respecte de l'estudi de les correlacions, l'EMG_{mit} del BF va mostrar una correlació significativa ($p < 0,05$; $r = -0,58$) amb la FI_{màx}. L'activació EMG de la resta de músculs, tant EMG_{mit} com EMG_{màx}, no va mostrar cap relació amb la FI_{med} o FI_{màx}. En comparar l'activació dels diversos músculs entre si, vam constatar una correlació significativa pel que fa a ambdós gastrocnemis, tant en EMG_{mit} ($p < 0,05$, $r = 0,59$) com en EMG_{màx} ($p < 0,01$; $r = 0,83$). S'esdevé el mateix amb el VM i el VL ($p < 0,05$, $r = 0,50$ i $p < 0,05$, $r = 0,53$ per a EMG_{mit} i EMG_{màx}, respectivament). Per l'últim, crida l'atenció la correlació significativa que mostra l'activació del VM amb l'activació del BF, tant en EMG_{mit} ($p < 0,05$, $r = 0,62$) com en EMG_{màx} ($p < 0,05$, $r = 0,56$)

Discussió

L'activació dels músculs agonistes no va mostrar cap relació amb la FI_{màx} o FI_{mit} exercida pels subjectes. Diversos autors no hi troben una relació lineal, entre l'FI d'extensió de genoll i l'activació dels músculs del quàdriceps^{15,16}. En aquest estudi, el resultat més cridaner és la correlació negativa trobada entre l'EMG_{mit} del múscul antagonista (BF) i el valor d'FI_{màx}. Això ve a indicar que, en ciclistes de ruta, l'FI_{màx} d'extensió de genoll està limitada per l'activació antagonista. Per trobar una explicació a aquest fet, cal analitzar la mecànica del gest reclamat (extensió de genoll) i del gest propi de la modalitat esportiva practicada assíduament pels

Figura 3

EMG_{màx} (mV) de cadascun dels sis músculs estudiats, agrupats en agonistes (AGN), antagonistes (ANT) i gastrocnemis (GNM).
* $p < 0,01$



BF: bíceps femoral; GL: gastrocnemi lateral; GM: gastrocnemi medial; RF: recte femoral; VL: vast lateral; VM: vast medial.

subjectes (ciclisme). El BF té dos caps, un dels quals monoarticular, que actua com a flexor del genoll, i un de biarticular, que funciona com agonista del quàdriceps en alguns exercicis, com el pedaleig¹⁷. De fet, Takaishi et al¹⁸ van demostrar que ciclistes experimentats són capaços d'activar més el BF durant el pedaleig que subjectes no ciclistes, la qual cosa contribueix a alleujar l'esforç dels extensors del genoll durant aquest gest. En la mateixa línia, Lutz et al¹⁹ van demostrar una major activació dels isquiotibials en tasques de cadena cinètica tancada (pedaleig, *squat*, etc.), en comparació amb tasques de cadena cinètica oberta (extensió de genoll). Per tant, és lògic pensar que els ciclistes, acostumats a un gest en què els músculs isquiotibials participen de forma activa, tendeixin a activar en excés aquest grup muscular durant una activitat aparentment semblant però biomecànicament diferent (extensió de genoll). Aquesta idea es veu reforçada pel fet que la correlació negativa entre força màxima manifestada i activació antagonista que mostren els nostres resultats no s'hagi trobat en una mostra futbolistes, també sense experiència en el gest d'extensió unilateral de genoll en màquina¹.

S'esdevé el mateix amb altres aspectes del senyal EMG, la coactivació antagonista pot ser analitzada de moltes maneres. Això fa difícil comparar els nostres valors amb els obtinguts per altres autors. En molts treballs, l'activació antagonista es tracta com a percentatge de l'activació màxima que el múscul en concret presenta quan actua com a agonista⁷. El fet que en el nostre cas no es fes una prova màxima de flexió de genoll, impossibilita de presentar les dades

d'aquesta manera. Tenint-ho en compte, els ciclistes participants en l'estudi van mostrar una coactivació antagonista (relativitzada amb l'activació dels agonistes) més gran que la mostrada per alguns estudis. En aquest sentit, Alkner et al²⁰, els quals també van utilitzar un angle de flexió de genoll de 90°, van observar una activació del BF equivalent al 12,8% de la mitjana de l'activació dels extensors del genoll.

Centrant-nos en l'activació dels 3 agonistes estudiats, vam trobar que l'EMG_{mit} de l'RF va ser estadísticament superior a la de VM i VL, respectivament. Brindle et al²¹, que van avaluar el mateix gest en noies estudiants sense experiència en l'extensió màxima isomètrica de genoll, també hi van trobar una major activació de l'RF, si bé la diferència amb el VM no va ser tan acusada com en el nostre cas. A més, en aquest estudi es va utilitzar una angulació de genoll de 120°. No obstant això, altres autors observen que el múscul més actiu en aquest tipus de tasca no és el RF, sinó el VM²⁰. Novament el gest propi de la modalitat esportiva dels subjectes, el pedaleig, pot tenir alguna relació amb aquesta activació "extra" de l'RF. Hug et al²² recentment han estudiat en ciclistes professionals el patró d'activació de diversos músculs del tren inferior durant el pedaleig, tot constatant que l'RF, VL i BF són els músculs més actius durant aquest gest. És ben cert que els autors també observen una gran heterogeneïtat entre individus, principalment pel que fa a activació de l'RF.

La coactivació antagonista, necessària per mantenir l'estabilitat de l'articulació, es converteix en contraproduent

(des del punt de vista de la força manifestada per l'acció agonista) quan supera un cert límit, com demostren els nostres resultats. La recerca d'estabilitat articular pot explicar la correlació trobada entre l'activació del VM i el BF; mentre que el primer ocupa la zona més medial del conjunt del quàdriceps, el BF és el múscul més lateral dels 3 isquiotibials. Aquesta activació paral·lela de músculs anatòmicament oposats contribuiria a mantenir l'estabilitat articular en una acció de força elevada. Tanmateix, el major pic d'activació que van mostrar els gastrocnemis en comparació amb el pic d'activació del BF no sembla tenir relació amb l'estabilitat. Tenint en compte que aquest pic d'activació es va donar en l'últim segon del test, és lògic pensar que la fatiga específica va fer perdre concentració als subjectes, la qual cosa va dur a l'activació excessiva de músculs accessoris en aquest gest, com són els gastrocnemis, els quals no hi intervenen d'una forma directa.

En resum, podem concloure que la coactivació del BF limita la FI_{màx} unilateral d'extensió de genoll en ciclistes de ruta, quantificada aquesta en un angle de flexió de genoll de 90°. Això, juntament amb el fet que el RF es va mostrar com el múscul agonista més actiu, pot ser explicat per les característiques biomecàniques del gest a què els subjectes estan acostumats: el pedaleig. Tant l'anàlisi de l'activació muscular d'agonistes i antagonistes durant aquest gest però amb angles diferents de genoll, com la possible reducció de la coactivació antagonista per mitjà d'entrenaments específics, són interessants línies de recerca per a treballs futurs

Bibliografia

1. De Vito G, McHugh D, Macaluso A, Riches PE. Is the coactivation of biceps femoris during isometric knee extension affected by adiposity in healthy young humans? *J Electromyogr Kinesiol.* 2003;13:425-31.
2. Baratta R, Solomonow M, Zhou BH, Letson D, Chuinard R, D'Ambrosia R. Muscular coactivation. The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *Am J Sports Med.* 1988;16:113-22.
3. Person RS. Electromyographic investigations of coordination of the antagonistic muscles in development of motor habit. *Pavlov Journal of Higher Nervous Activity.* 1958;8:13-23.
4. Ebenbichler GR, Kollmitzer J, Glockler L, Bochdanský T, Kopf A, Fialka V. The role of the biarticular agonist and cocontracting antagonist pair in isometric muscle fatigue. *Muscle Nerve.* 1998;21:1706-13.
5. Sale DG. Neural adaptation to strength training. En: Komi PV, editor. *Strength and power in sport.* Oxford: The Encyclopaedia of Sports Medicine; Blackwell Science; 1992. p. 261.
6. Tyler AE, Hutton RS. Was Sherrington right about co-contractions? *Brain Res.* 1986;370:171-5.
7. Macaluso A, Nimmo MA, Foster JE, Cockburn M, McMillan NC, De Vito G. Contractile muscle volume and agonist-antagonist coactivation account for differences in torque between young and older women. *Muscle Nerve.* 2002;25:858-63.
8. Carolan B, Cafarelli E. Adaptations in coactivation after isometric resistance training. *J Appl Physiol.* 1992;73:911-7.

9. Hakkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Malkia E, et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol.* 1998;84:1341-9.
10. Stensdotter AK, Hodges PW, Mellor R, Sundelin G, Hager-Ross C. Quadriceps activation in closed and in open kinetic chain exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35:2043-7.
11. Jackson AS, Pollock ML. Practical assessment of body composition. *Physician Sportsmed.* 1985;13:76-90.
12. Gray H. *Gray's anatomy: a facsimile.* Rochester Kent: Grange Books; 2001.
13. De Luca CJ. The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech.* 1997;13:135-63.
14. Rainoldi A, Melchiorri G, Caruso I. A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods.* 2004;134:37-43.
15. Bell DG. The influence of air temperature on the EMG/force relationship of the quadriceps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1993;67:256-60.
16. Eloranta V. Patterning of muscle activity in static knee extension. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1989;29:369-75.
17. Sahaly R, Vandewalle H, Driss T, Monod H. Surface electromyograms of agonist and antagonist muscles during force development of maximal isometric exercises—Effects of instruction. *Eur J Appl Physiol.* 2003;89:79-84.
18. Takaishi T, Yamamoto T, Ono T, Ito T, Moritani T. Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30:442-9.
19. Lutz GE, Palmitier RA, An KN, Chao EY. Comparison of tibiofemoral joint forces during open-kinetic-chain and closed-kinetic-chain exercises. *J Bone Joint Surg Am.* 1993;75:732-9.
20. Alkner BA, Tesch PA, Berg HE. Quadriceps EMG/force relationship in knee extension and leg press. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:459-63.
21. Brindle TJ, Nyland J, Ford K, Coppola A, Shapiro R. Electromyographic comparison of standard and modified closed-chain isometric knee extension exercises. *J Strength Cond Res.* 2002;16:129-34.
22. Hug F, Bendahan D, Le Fur Y, Cozzone PJ, Grelot L. Heterogeneity of muscle recruitment pattern during pedaling in professional road cyclists: a magnetic resonance imaging and electromyography study. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92:334-42.