

足底面の皮膚感覚情報によるつまずき反応の特徴

東京学芸大学大学院 中 島 剛
(共同研究者) 千 葉 大 学 小宮山 伴与志
順 天 堂 大 学 遠 藤 隆 志
東京学芸大学大学院 坂 本 将 基
同 田 添 歳 樹

Characteristics of Stumbling Collective Reaction Induced by Cutaneous Sensation to the Plantar Foot

by

Tsuyoshi Nakajima, Masanori Sakamoto, Toshiki Tazoe,
United graduate school of education Tokyo gakugei University

Takashi Endoh

Juntendo University

Tomoyoshi Komiyama,

Faculty of Education, Chiba University

ABSTRACT

The present study investigated location specificity of middle latency (~ 80 – 110 ms, MLR) cutaneous reflexes in the soleus (Sol) and tibialis anterior (TA) following non-noxious electrical stimulation (2.0 times perceptual threshold, 5 pulses at 333 Hz) on different locations of the plantar foot. Subjects were 14 neurologically intact volunteers (13 male, 1 female) who gave informed consent. Electrical stimulation was given to the fore-medial (f-M), fore-lateral (f-L) and heel (HL) regions of the plantar surface of the right foot while the subjects performed isometric dorsiflexion or plantarflexion while sitting and standing upright. In Sol, an excitatory effect was observed following HL

simulation, but it turned into an inhibitory one following f-M or f-L stimulation. TA showed a reciprocal pattern in contrast to Sol. In some cases, the slope of the regression line between the magnitude of MLR and background electromyographic activity was significantly decreased while standing compared to that while sitting. Our findings suggest that reflex effects from cutaneous nerves in the plantar foot on the motoneurons innervating the lower leg muscles is organized in a highly topographically specialized manner in humans. These reflex organizations may suit the behavioral demands of a standing posture.

要 旨

本研究は、健常成人（男性13名、女性1名）を対象として、足底面の異なる部位に対する低強度電気刺激（感覚閾値の2.0倍、5発刺激333Hz）によって誘発されるヒラメ筋（Sol）、前脛骨筋（TA）の中潜時皮膚反射（～80 - 110 ms, MLR）について検討したものである。電気刺激は被験者が等尺性筋収縮による足底屈運動もしくは足背屈運動を行っている間に足底前部内側面（f-M）、前部外側面（f-L）および足踵面（HL）に与えた。SolはHL刺激時で促通効果を示したが、f-M刺激では抑制効果を示した。TAはSolの反射パターンとは相反的な変化を示した。皮膚反射の振幅と背景筋電図量の回帰直線の傾きは数例で座位時に比して立位時で有意に低下した。われわれの知見は、足底面から下肢筋群に対する皮膚反射効果が局所解剖学特異的に構成されていることを示唆する。これらの反射構成は立位姿勢保持の行動学的な要求に適合しているかもしれない。

緒 言

足部の皮膚感覚受容器を支配する脛骨神経（足底面）、浅腓骨神経（足背面）および腓腹神経（足部外側面）に対する刺激によって誘発される下肢筋群の皮膚反射は、潜時や筋電図波形の類似性が非常に高いことが報告されている^{2, 13)}。一方、歩行時には同じ刺激によって誘発される皮膚反射

は歩行局面に強く依存した変化を示すことが報告されている^{17-19, 20)}。例えば、脛骨神経刺激によって誘発される前脛骨筋（TA）の中潜時皮膚反射は、離地前期では促通効果を示すが接地期では抑制効果に転じる。この反射効果の変化は“reflex reversal, 反射の逆転現象”と呼ばれ、除脳ネコの歩行標本において初めて見いだされた⁶⁾。

De Serres et al.⁴⁾は、ヒトの歩行運動中に記録された脛骨神経刺激後の単一運動単位放電の発火頻度の変化から構築されたペリスティムラス・タイム・ヒストグラム法（PSTH法）から反射逆転現象の機序について検討している。その結果、歩行局面依存的な反射逆転現象は、皮膚感覚求心性線維から単一運動ニューロンへの並列的な促通性および抑制性皮膚入力バランスが、歩行周期に依存して変化することにより生ずることを明らかにした。しかしながら、歩行時の接地局面では踵部、離地局面では足底前部の皮膚感覚情報が特異的に重要な役割を果たす。また、脛骨神経は内踝のレベルで分枝し、外側足底神経、内側足底神経および踵骨神経となり、異なる足底領域の皮膚感覚受容器を支配する。これらの生理学的ならびに解剖学的知見は、“反射の逆転現象”が足底皮膚神経由来の皮膚反射が強い部位特異性を持つことによる結果である可能性を示唆する。さらに、足底部の皮膚触圧受容器の密度は他の部位と比して高く、圧力に依存して増大することが知られている^{6, 8)}。従って、歩行立脚期や姿勢外乱時等の足

圧変化によって生じる各足底部位の皮膚求心性情報⁶⁾は、皮膚反射経路を介した“つまずき修正反応”として姿勢保持に貢献していると考えられる。

そこで、本研究は様々な足底部位に対する電気刺激により誘発される下肢筋の皮膚反射のパターンを明らかにし、つまずき修正反応の基本的知見を得ることを目的とした。また、皮膚反射は運動課題や筋依存的に変化することが知られていることから^{13-16, 20)}、姿勢変化時での皮膚反射の刺激部位依存性についても検討を行った。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は、神経学的疾患のない健常成人、男性13名、女性1名(22-30歳)であった。実験手順と方法は所属施設における倫理委員会の承諾を得て行った。その後、被験者には事前に実験の目的と方法を十分に説明し、実験参加の同意を得た後に実験を行った。

1.2 筋電図記録

筋電図(EMG)は、前脛骨筋(TA)、ヒラメ

筋(Sol)の筋腹上に約1cmの電極間距離に置いた一对の表面電極(直径10mm)により、双極表面誘導法にて、時定数0.01秒、高域遮断周波数1kHzにより生体アンプシステム(日本電気三栄, 1253A)で増幅(×1000)することにより得た。

1.3 実験および運動課題

被験者は等尺性筋収縮による足背屈運動ならびに足底屈運動を座位および立位状態で行うよう教示された。被験者はアナログ電圧計に表示されたTAおよびSolのEMG量を目標値(約1-60%EMGmax)にあわせ、維持するように指示された。各筋における前部内側部(f-M)、前部外側部(f-L)および踵部(HL)刺激による皮膚反射の導出は異なるセッションにて行われた。

1.4 電気刺激

双極の刺激電極を、第1中足趾節間関節上にあたる前部内側部(f-M)、第5中足趾節間関節から下1cm付近の前部外側部(f-L)および踵の内側部付近の踵部(HL)に添付し、電気刺激した(図1)。刺激強度は感覚閾値(PT)の2.0倍で統

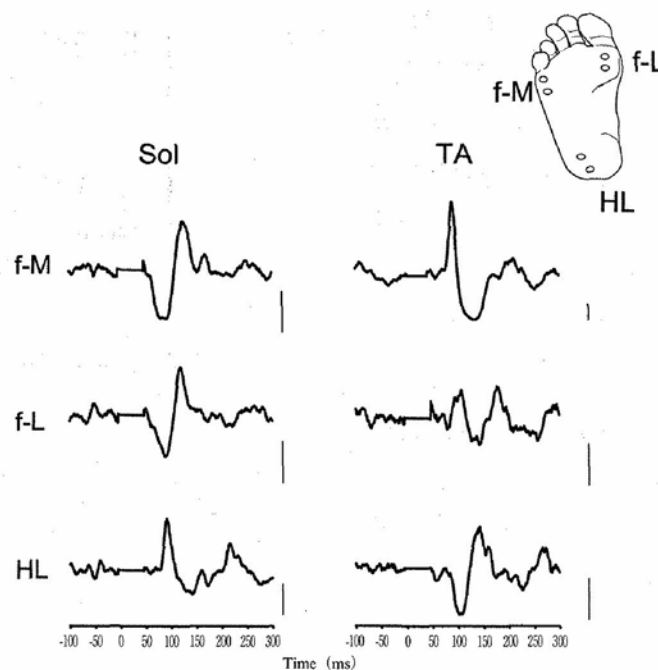


図1 一名の被験者の典型的なヒラメ筋(左図)と前脛骨筋(右図)の皮膚反射の波形例(筋収縮力:10%EMGmax)と刺激部位の模式図。上段は前-内側部(f-M)、中段は前-外側部(f-L)および下段は踵部(HL)刺激による皮膚反射を示す。縦軸の較正は10 μ Vを示す。

一し、電気刺激には1ms 矩形波、5連発刺激(333 Hz)を用いた。刺激-刺激間隔は2 Hzであった。電気刺激は、すべての刺激部位において痛み感覚をとまなわないことを全被験者で口頭にて確認した。

1. 5 データ解析

皮膚反射の誘発は、EMG 信号を全波整流し、平滑化した後、各刺激部位への電気刺激をトリガーとして80回の加算平均を行なった。得られた皮膚反射は先行研究に従い分類し²¹⁾、最も顕著に反射反応が得られる中潜時反応(MLR: 頂点潜時: ~80-110 ms)に着目した。MLR 振幅は、刺激前100ms の平均背景EMG 量を基準として各反射成分の最大振幅を計測した。各皮膚反射成分は、最大随意収縮時に得られたEMG を全波整流し、その平均振幅値で標準化を行った。得られた皮膚反射振幅は背景筋電図量に対してプロットし、回帰分析をすることにより各課題および刺激部位において皮膚反射の動態を示した。

1. 6 統計処理

座位および立位課題において全被験者の各筋と各刺激部位の組み合わせから得られたMLR およびLLR において背景筋電図量間の回帰直線を求めた。得られた回帰式の回帰係数の有意性検定は、市原⁸⁾の方法に従いt-検定を行なった。有意水準は危険率5%未満とした。

2. 結果

2. 1 足底刺激における部位特異的な皮膚反射パターンの特徴

図1は、一名の被験者から得られたf-M, f-L およびHL 刺激時におけるSol (左図) およびTA (右図) の皮膚反射を示したものである。各刺激部位における皮膚反射は80回の加算平均した結果である。

HL 刺激時のSol の中潜時皮膚反射(MLR)には顕著な促通効果が見られた。しかしながら、この促通効果はf-M 刺激時には抑制効果に転じた。一方、TA では相反的にHL 刺激において抑制効果、f-M では促通効果が得られた。

2. 2 皮膚反射振幅と背景筋電図量との相関関係

図2は一名の被験者におけるf-M (△), f-L (●) およびHL (○) を電気刺激することによって得られたTA (上図) およびSol (下図) のMLR 振幅と背景筋電図量との関係を示したものである。各筋のMLR 振幅は各刺激部位において

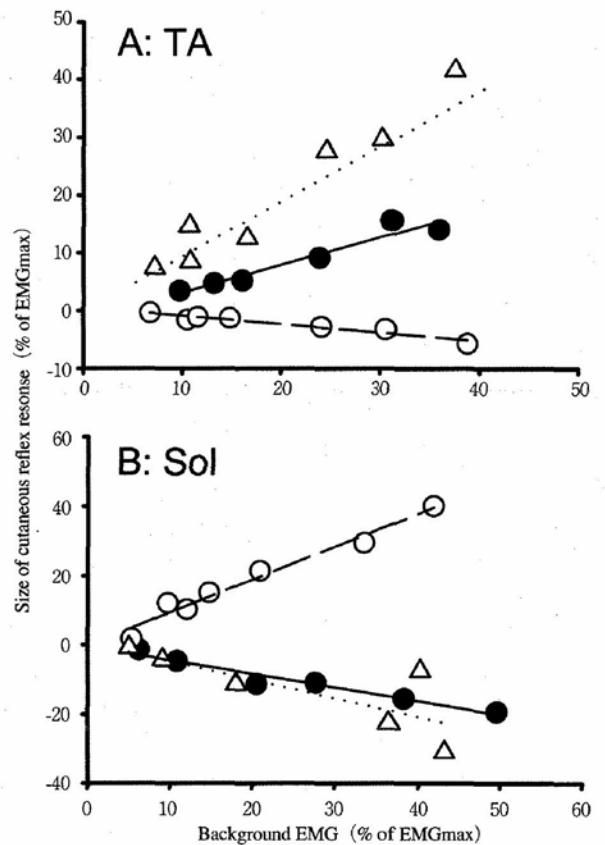


図2 一名の被験者から得られた各刺激部位 (f-M:△, f-L:●, HL:○) におけるヒラメ筋 (A) および前脛骨筋 (B) の中潜時反応と背景筋電図量 (5-50 % of EMG max) との相関関係。黒線はf-L, 点線はf-M, 破線はHLと背景筋電図の回帰直線を示す。

背景筋電図量に依存して変化した (全て $p < 0.01$)。全ての被験者における皮膚反射振幅と背景筋電図

表1 全ての被験者から得られた各刺激部位 (f-M, f-L, HL) および各姿勢 (立位および座位姿勢) におけるヒラメ筋および前脛骨筋の中潜時反応と背景筋電図量との相関関係。右表には各刺激部位による反射振幅と背景筋電図量との回帰直線の傾きの差を検定したもの *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$

Muscle	Task	Site of stimulation						Comparison of the slope of two regression		
		f-M		f-L		HL		f-M vs f-L	f-M vs HL	f-L vs HL
		Slope	r^2	Slope	r^2	Slope	r^2			
TA	Sitting	0.48	0.40***	0.23	0.63***	-0.22	0.63***	$p < 0.01$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
	Standing	0.52	0.54***	0.09***	0.36***	-0.18	0.48***	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Sol	Sitting	-0.21	0.75***	-0.23	0.64***	0.63	0.59***	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.05$
	Standing	-0.12	0.06	-0.18	0.38**	0.34***	0.43***	NS	$p < 0.001$	$p < 0.001$

量との回帰分析の詳細な結果は、表1に示した。TAおよびSolともに全ての被験者のデータをプールした結果においても有意な相関関係が確認された。また、各回帰直線の傾きに関しては、Solの立位時におけるf-Mとf-Lの比較以外、有意な差が得られた ($p < 0.05$)。

2. 3 立位姿勢時における皮膚反射の変化

立位姿勢における刺激部位依存的な皮膚反射の修飾についても検討を加えたところ、座位時における皮膚反射パターンと類似の結果が得られた (表1)。

TAにおけるf-L刺激ならびにSolにおけるHL刺激時に反射振幅と背景筋電図量の相関関係は、座位姿勢時に比して立位姿勢時に有意に低下した (表1)。

3. 考 察

3. 1 刺激部位に依存した皮膚反射の変化

持続的な等尺性収縮時における皮膚反射は、足部の異なる部位を支配する浅腓骨神経、脛骨神経および腓腹神経を刺激した場合でも非常に類似した筋電図波形を示すことが報告されている¹³⁾。しかしながら、歩行時では、局面に依存して皮膚反射は抑制性から促通性反射反応に転ずることが知られている^{13, 17, 18)}。先行研究では、足底の支配領域である脛骨神経を足首レベルで刺激することにより皮膚反射を誘発しているが、本研究では脛骨神経の支配領域である足底部を詳細に検討し

た結果、足底部の刺激部位に依存して反射の逆転現象が生じること、ならびにそのパターンは筋に依存して変化することが明らかになった。

刺激部位として選択したf-M, f-LおよびHLは、それぞれ脛骨神経の分枝である内側足底神経、外側足底神経および踵骨神経により支配される。これらの解剖学的知見をもとにして考えると、本研究結果は足底神経特異的な反射効果を反映しているとも考えられる。しかしながら、内側足底神経の支配領域である異なった部位を電気刺激し、皮膚反射を誘発しても、MLRにおいて反射の逆転現象が生じることを確認している (中島, 坂本, 田添, 遠藤, 小宮山, 未発表データ)。従って、本研究結果は支配神経特異的な皮膚反射パターンというよりも、足底部特異的な反射パターンである可能性が高い。

3. 2 足底部位依存的な皮膚反射の変化の機序

刺激部位に依存した反射の変化は皮膚受容器の種類に依存した反射反応の可能性も考えられる。最近、Macefieldのグループは、微小神経電図法と自然刺激法を組み合わせ、足底部の刺激されている受容器を速順応タイプ (FA IおよびII) と遅順応タイプ (SA IおよびII) を分類し、その刺激によって得られた単一神経電図記録をトリガーとして下腿筋電図を平均加算することにより皮膚反射を誘発した⁵⁾。その結果、速順応タイプの皮膚受容器にのみ有意な反射反応が誘発され、遅順応タイプでは見られないことを報告した。これら

の結果は、皮膚受容器のタイプの違いが皮膚反射の逆転現象を生じさせる可能性が低いことを示唆する。本研究では電気刺激を用いており、刺激電極下の低閾値皮膚受容器が同期的に発火していると考えられる。また時間的加重効果を高めるために5連発刺激を用いている。このため多くの皮膚受容器から同期的に脊髄介在ニューロンに入力し、結果的に顕著な皮膚反射効果が得られた可能性が高い。

皮膚反射の逆転現象は運動単位のタイプによって生じる可能性が考えられる⁴⁾。Kanda et al.¹⁰⁾は、皮膚求心性線維は低疲労耐性の速型運動ニューロン (FFタイプ) において促通性シナプス結合を持ち、逆に高疲労耐性の遅型運動ニューロン (Sタイプ) には抑制性シナプス結合を持つことをネコの細胞内記録法によって明らかにしている。この報告を考慮すると、本研究は運動に参画した運動ニューロンタイプの違いを反映している可能性が考えられる。そこでわれわれは、背景筋電図を様々なレベルに変化させ皮膚反射を比較検討したが、反射パターンには変化は見られなかった。また、単一運動単位 (MU) 放電の発火確率の変化から構築される PSTH によっても、f-M および HL 刺激時に反射の逆転現象を確認している (中島, 坂本, 田添, 遠藤, 小宮山, 未発表データ)。従って、本研究結果は運動ニューロンタイプの違いによる皮膚反射効果の違いを反映したものではなく、異なる足底部位に局在する皮膚感覚受容器の違いとそれらの求心性線維と皮膚反射に含まれる介在ニューロンから運動ニューロンに対するシナプス入力効果が異なることがその機序となっている可能性が高い。

歩行位相に依存した脛骨神経刺激由来の反射は、抑制性から促通性に切り替わる、いわゆる“反射の逆転現象”が生じることが報告されている。この反射反応について、De Seress et al.⁴⁾は、並列的な皮膚反射経路を歩行位相に依存して切り替

えていることを単一運動単位記録による PSTH 法を用いて証明した。本研究の結果は、歩行時の“反射の逆転現象”は足底面から下腿筋群に対する皮膚反射の刺激部位特異性を反映した結果であるとの解釈も可能であろう。

3. 3 姿勢に依存した刺激部位依存的な皮膚反射の変化動態

座位時と立位時の皮膚反射のパターンは非常に類似していたが、いくつかの筋と刺激部位の組み合わせにおいて反射利得に有意な低下が観察された。この結果の一部は神経束および足趾皮膚神経刺激を用いた先行研究と一致し^{1, 7)}、さらに脊髄単シナプス反射 (H 反射, 伸張反射) の変化動態とも類似性を持つ^{11, 12)}。立位時における反射利得の低下は、過剰な反射出力により姿勢の不安定要素が増大することを防ぐ機能を持つことが考えられる。

3. 4 機能的意義

本研究で得られた下肢筋群の皮膚反射の部位特異性は、立位時に足底面に加えられた刺激から、効果的に足部を退避させる効果を持つと考えられる。例えば、踵部への刺激では TA の抑制と Sol の促通が観察されることから、踵部に接触した物体を足関節の足底屈運動により素早く回避する機能を持つと考えられる。Zehr et al. (1997) は、脛骨神経刺激による TA の皮膚反射は歩行の接地相に抑制効果を示すことから、足底面に対する皮膚入力は接地の契機となる“踏みしめ反応”を生じさせると述べている。また、この皮膚反射は離地相では促通効果を示し、これは足底面に接触した物体から足部を退避させる機能を持つと考えられる¹⁹⁾。これらの歩行時の皮膚反射は、本研究で示した踵部刺激時の TA および Sol の反射効果、ならびに前部内側部刺激時の TA の反射効果に非常に類似する。従って、本研究で得られた足底部

位特異的な皮膚反射効果は、歩行の円滑な継続に貢献している可能性が考えられる。詳細については今後の検討課題である。

4. まとめ

本研究は、足底面の異なる部位（前-内側面、前-外側面および踵面）の電気刺激により誘発される下肢筋群の皮膚反射を分析した。その結果、下肢筋群から誘発される皮膚反射振幅は、刺激する足底部位と筋電図を導出する筋の組み合わせにより、大きく異なることが明らかになった。歩行時では内踝レベルでの脛骨神経束刺激において皮膚反射の逆転現象が観察することが報告されており、下肢筋群を支配する運動ニューロンに対する並列的な促進性および抑制性の反射経路が上位指令と中枢パターン発信器の影響により切り替わるという仮説が提案されている^{4, 18)}。本研究の結果は、脛骨神経の支配領域である足底面において、部位特異的に抑制性および促進性の反射効果が存在し、この皮膚反射効果は立位時および歩行時等において不意な外乱によって足圧が変化した際の“つまずき修正反応”⁶⁾として貢献している可能性が考えられた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり研究助成を授与していただいた石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Abbruzzese M., Rubino V., Schieppati M., Task-dependent effects evoked by foot muscle afferents on leg muscle activity in humans. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, 101, 339-348 (1996)
- 2) Aniss A.M., Gandevia S.C., Burke, D., Reflex responses in active muscles elicited by stimulation of low-threshold afferents from the human foot. *J.*

- Neurophysiol.*, 67, 1375-1384 (1992)
- 3) Burke D., Dickson H.G., Skuse, N.F., Task-dependent changes in the responses to low-threshold cutaneous afferent volleys in the human lower limb. *J. Physiol. (Lond)*, 432, 445-548 (1991)
- 4) DeSerres S.J., Yang J.F., Patrick S.K., Mechanism for reflex reversal during walking in human tibialis anterior muscle revealed by single motor unit recording. *J. Physiol. (Lond)*, 488, 249-258 (1995)
- 5) Fallon J.B., Bent L.R., McNulty P.A., Macefield V.G., Evidence for strong synaptic coupling between single tactile afferents from the sole of the foot and motoneurons supplying leg muscles. *J. Neurophysiol.* (in press) (2005)
- 6) Forssberg H., Stumbling corrective reaction: a phase-dependent compensatory reaction during locomotion. *J. Neurophysiol.*, 42, 936-953 (1979)
- 7) Gibbs J., Harrison L.M., Stephens J.A., Cutaneous reflexes recording from the lower limb in man during different tasks. *J. Physiol. (Lond)*, 487, 237-242 (1995)
- 8) 市原清志: バイオサイエンスの統計学, 南江堂 (1996)
- 9) Johansson R.S., Vallbo A.B., Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trend in Neurosci.*, 6, 27-32 (1983)
- 10) Kanda K., Burke R.E., Walmsley B., Differential control of fast and slow twitch motor units in the decerebrate cat. *Exp. Brain Res.*, 29, 57-74 (1977)
- 11) Katz R., Meunier S., Pierrot-Deseilligny E., Changes in presynaptic inhibition of Ia fibres in man while standing. *Brain*, 111, 417-437 (1988)
- 12) Koceja D.M., Trimble M.H., Earles D.R., Inhibition of the soleus H-reflex in standing man. *Brain Res.*, 629, 155-158 (1993)
- 13) Komiyama T., Zehr E.P., Stein R.B., Absence of nerve specificity in human cutaneous reflexes during standing. *Exp. Brain Res.*, 133, 267-272 (2000)
- 14) Nakajima T., Endoh T., Sakamoto M., Komiyama T., Nerve specific modulation of somatosensory inflow to cerebral cortex during submaximal sustained contraction in first dorsal interosseous muscle. *Brain Res.*, 1053, 146-153 (2005a)
- 15) Nakajima T., Sakamoto M., Endoh T., Komiyama T., Location-specific and task-dependent modulation of cutaneous reflexes in intrinsic human hand muscles. *Clin. Neurophysiol.*, (in press) (2005b)

- 16) 中島 剛, 遠藤隆志, 坂本将基, 田添歳樹, 小宮山伴与志: 刺激条件の違いが手固有筋の皮膚反射に及ぼす影響, *体力科学*, 54, 315-324 (2005)
- 17) Van Wezel B. M., Ottenhoff F. A., Duysens J., Dynamic control of location-specific information in tactile cutaneous reflexes from the foot during human walking. *J. Neurosci.*, 17, 3804-3814 (1997)
- 18) Yang J., Stein R.B., Phase-dependent reflex reversal in human leg muscles during walking. *J. Neurophysiol.*, 63, 1109-1117 (1990)
- 19) Zehr E.P., Komiyama T., Stein R.B., Cutaneous reflexes during human gait: electromyographic and kinematic responses to electrical stimulation. *J. Neurophysiol.*, 77, 3311-3325 (1997)
- 20) Zehr E.P., Stein R.B., What functions do reflexes serve during human locomotion? *Prog. in Neurobiol.*, 58, 185-205 (1999)
- 21) Zehr E.P., Chua R., Modulation of human cutaneous reflexes during rhythmic cyclical arm movement. *Exp. Brain Res.*, 135, 241-250 (2000)