

足底着床時に見る歩行の運動特性

The characteristics of human gait when the sole of the foot contacts the floor

(北星学園女子短期大学)

佐々木 敏

Tsutomu Sasaki

角田 和彦

Kazuhiko Tsunoda

(北海道大学大学院)

小池 貴行

Takayuki Koike

ABSTRACT

Gait is the most basic movement for human beings. Gait is characterized by periodical movement of two feet supporting the body's weight. The purpose of this study is to clarify the characteristics of the natural gaits of junior college students. The gait of the twenty students was analyzed with a 60 frames per second video camera. Three dimensional image analysis theorem and projective transformation method were used for data analysis. The natural gaits of the twenty student were classified in two styles according to their movement. The first style is represented by a movement of the heel contacting the ground first. The second, the non-heel contact style, is represented by the whole sole of the foot contacting the ground. In both styles, velocity in center of gravity accelerates slightly after the first heel contact and then decelerates as the opposite thigh swings forward across the support leg. The periodicity of the velocity vector angle was stable for each student with the heel contact style (2Hz). There was a variation of periodicity for the nonheel contact style gait. The results suggest knee joint extension to be the cause of diversity.

Key Words: Gait, Video analysis, Velocity, Vector

はじめに

歩行運動は本学体育実技授業において基本運動種目の中で展開してきた。このプログラムの目的は、人の歩行が持っている健康運動としての性質の重要な側面である運動強度を生理学的に理解させる。さらに高度に自動化された神経生理学的システムを持つ歩行運動を実体験を通じて理解させることである。一方、歩行技術について、体重支持期の大腿骨内転に伴う中殿筋

の作用など筋肉と骨格の力学的作用を理解する (McLeish, Charnley, 1970)。さらに運動方法の相違により生じ得る腰部や膝関節および足関節の整形外科的な障害の可能性なども含めて解説している (Charnley, 1968)。このような観点から授業では、生涯を通じて関わり合う歩行について安全性の高い技術の習得とその習慣的な運動への定着、さらに合理的な運動習慣の獲得の必要性を説いている。歩行時の身体姿勢と

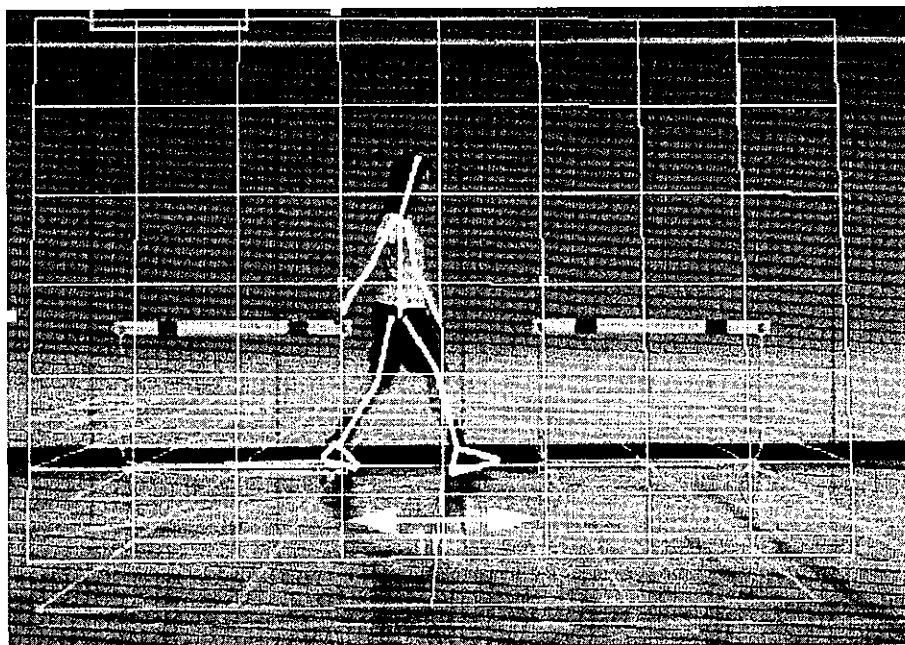


図1 撮影状況と校正データの処理結果奥行きのある床平面の射影変換平面とこれに垂直な射影変換平面を50cmのグリッドで表現したもの

運動は大殿筋や中殿筋また、大腿部の2関節筋群の活動などによる相互作用を持つ (Merchant, 1965)。そのため、姿勢の状態に応じて運動の個性が生じる。さらに慢性的に偏向する力の関節への作用は障害の発生と密接に関係する (Merchant, 1965)。なぜならば、姿勢保持と運動と言う2つの動作を同時に実施するために固有の筋肉が習慣的に活動するが、動きに動員されない筋は抑制される (Abrahamson, et al., 1985)。

このような観点から運動観察の重要性が理解できる。そこで、授業では学生各自の運動を観察させるためにビデオを用いて歩行動作の映像を記録し、学生が個々に観察し問題点を把握し、改善点などを理解できるように導いている。

歩行の特徴は2足が同時に体重支持期を持つ時があることである (Breakey, 1976)。歩行では足の着床期とその後の体重支持期に脚部に最

大の負荷が発生する。着床期の動きに関して、滑りやすい路面への適応として、足底部全体での着床が起こるとしている (角田, 1999)。このことは滑走性の高い路面状態への適応である一方、適応した歩行形態の個体への定着をも示唆している。特に積雪環境下で滑走性の高い路面上での歩行習慣を持つ本学学生には無視できない環境の影響であると考えられる。したがって、学生の運動を観察し運動学的な示唆を得ることは、指導上重要な意味を持つ。そこで、本学の学生を対象とし、歩行の運動学的な分析により歩行の動的特性を明らかにするために本研究を実施した。

研究方法

対象は20名の本学学生とした。本学体育館において直線上を自然な歩行となるように指示して歩かせた。歩行距離は15mとし、中心の7.5mから前後2.5mずつ5mの観察面を決定しカ

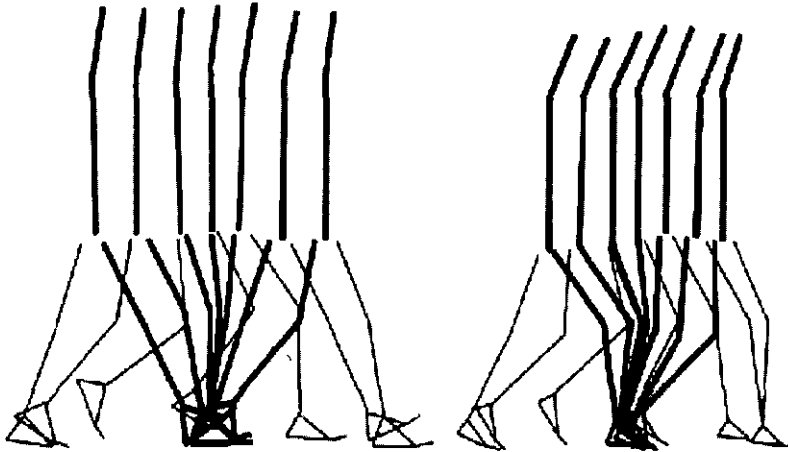


図2 分析に用いた歩行サイクルをセグメントモデルの線画で示したもの。左側が踵着床の歩行、右側は足底全体着床の歩行

メラを設置した (American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1965)。分析の空間的な校正には現在開発中の3次元DLT法を応用した2次元射影変換法で校正した。身体を18部位のセグメントに分解し身体重心を合成法により求めた。撮影状況と校正データの処理結果を図1に示した。校正は3次元空間の処理とし、2つの射影平面を計算により同定した (Andriacchi, et al., 1979)。床面と平行でパースペクティブにしたがった床面の射影変換校正平面を先ず決定し、これに垂直な校正点を基に射影変換平面

を計算しこの面を歩行位置になるようにパースペクティブの比率で校正空間を作成し、50cmのグリッドで表現した。このような処理により、任意の直線方向への移動平面が決定でき、その平面上に校正面を決定できる (Krag, 1981)。この方法は3次元データ校正法を2次元平面校正法へ応用したものである。

結果

画像に見られる着床時の歩行動作形態を観察

表1 歩行右足着床時の下肢関節角度と重心の速度

Joint angle	Two Gait styles				Significance and probability	
	Heel Contact		Whole Sole Contact			
		mean	SD	mean	SD	
Hip (deg)		154.0	5.7	150.1	4.6	(n. s.)
Knee (deg)		175.6	6.5	169.7	5.5	(p<0.05)
Ankle (deg)		138.5	4.1	139.3	6.9	(n. s.)
Contact (sec)		0.63	0.04	0.63	0.05	(n. s.)
Velocity Vector						
Horizontal (m/s)		1.77	0.44	1.73	0.66	(n. s.)
Vertical (m/s)		-0.16	0.12	-0.14	0.16	(n. s.)
Vector angle (deg)		-5.14	3.64	-4.32	3.43	(n. s.)

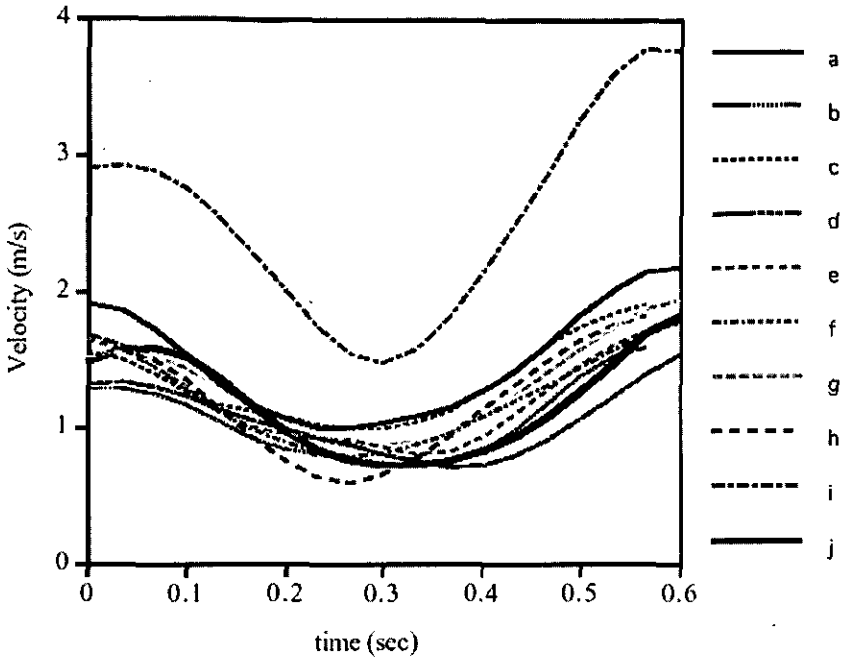


図3 踵着床歩行群の1歩行周期の水平方向の速度変化
 縦軸：速度 (m/s)
 横軸：時間 (秒)

し、踵が最初に着床する形態（踵着床歩行群 heel contact）とそうでない動作形態（足底全体歩行群 whole sole contact）の2つに分類した。分類された数は10名ずつであった。

歩行形態の違いと分析した歩行サイクルをセグメントモデルの線画で示したものが図2である。右足の着床から離床までの動作を示した。踵着床歩行では膝関節が伸展している状態が観察される。また、足底全体で着床する歩行では膝関節が屈曲状態であることが認められる。今後の分析は、動作の起点となる着床時を動作開始時とした。

関節角と歩行の平均速度

下肢関節角度および重心の速度をそれぞれのグループの平均値を取りこれを表1に示した。足関節に関しては2つのグループで大きな差は認められず、踵着床歩行群の標準偏差が小さく

平均値の周辺にまとまっている。踵着床歩行群は膝関節角度が175.6度とはほぼ180度に近い状態で着床する。一方、足底全体着床歩行群は169.7度で膝関節の屈曲が大きい。これに伴い股関節の屈曲は150.1度で踵着床歩行群（154度）よりも深い屈曲角を取っている。重心の水平方向の平均移動速度は両群ともにほぼ同じ速度で、踵着床歩行群が1.77m/sで、足底全体着床歩行群が1.73m/sであった。平均の着床時間は二つの群でともに0.63秒と同じであるが両群ともに標準偏差は小さい（SD=0.04, 0.05）。着床時の身体重心の水平方向に対する速度ベクトルの角度は踵着床歩行群で-5.14度（SD=3.64）、足底全体着床歩行群で-4.32度（SD=3.43）で両群ともに下向き方向の速度を示している。値については踵着床歩行群の方が小さくより下向き方向に移動していることが分かる。

歩行の速度変化

速度についてその変化をグラフに示した。踵着床歩行の速度変化を図3に、足底全体着床の歩行を図4に示した。着床後に減速し離床に向かって加速されている様子が2つの歩行形態で同様に観察される。平均速度については足底全体着床の歩行が高い値を示し、踵着床の歩行が低い値を示している。踵着床の歩行は大きい減速を歩行の特徴として持っている。また、着床時から減速が始まるのではなく、着床後僅かに加速があり、その後減速する例も多い。これに対して、足底全体着床の歩行では多くの場合着床時に加速は認められず、緩やかな減速を示している。体重支持期に入り反対の脚部の振り出し動作に伴い加速が認められるのは2つの歩行形態で同様であった。各群の平均値としての運動形態を示すよりも、個々の事例を示すことで運動に内在するそれぞれの個性を表現できると考え、あえて個々人の変化を示した。

速度はベクトルである。したがって、スピードの変化だけでなく運動の方向を観察できる。速度ベクトルの角度変化により、運動の状態を把握することが可能である (Cook T.M., 1981)。運動形態の異なる群のそれぞれの速度ベクトルの時間変化を図5と図6に示した。図5は踵着床歩行の速度ベクトルの変化を示し、図6は足底全体着床歩行の速度ベクトルの変化を示している。

ベクトル角は着床後腰部と脚部の最大伸展位になるまで反体側の大腿部の振り上げ動作と共に上昇し最大角を迎え、反対側大腿部の振り下ろしにより減少する傾向が認められる例が多い。角度変化の周期は踵着床歩行の平均で約2 Hz程である (図5)。振幅の大小は認められるものの歩行周期の偏差が小さい傾向を示している。一方足底全体着床歩行では図6に見られるように相当な個性が認められる。特に、振幅の変化は踵着床歩行が±10度程度でままとまってい

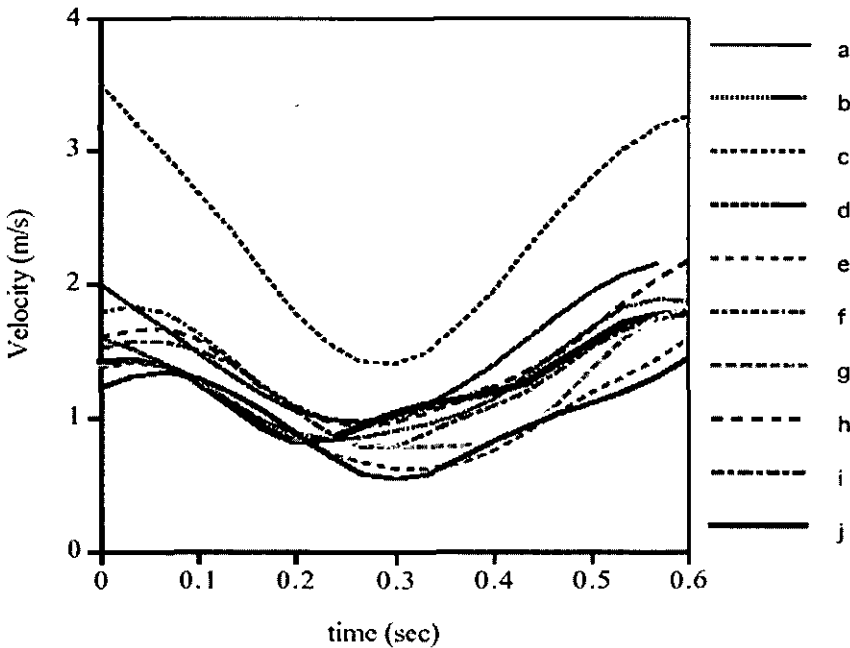


図4 足底全体接地形態の1歩行周期の水平方向の速度変化
 縦軸：速度 (m/s)
 横軸：時間 (秒)

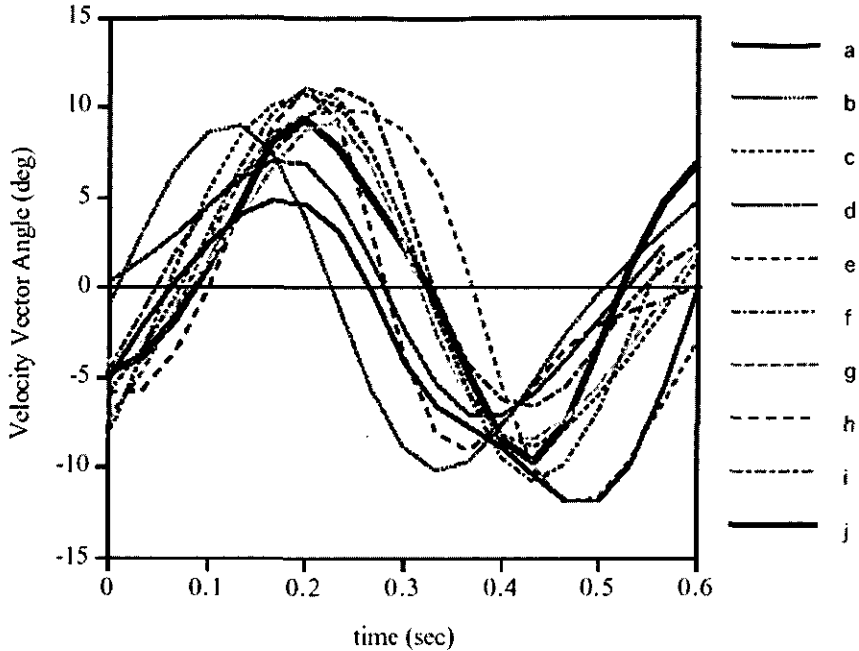


図5 踵着床歩行群の1歩行周期の速度ベクトルの方向の変化。
 縦軸：角度（度）
 横軸：時間（秒）

るのに対して、小さいもので ± 2 度、大きいものでは ± 17 度、とそのベクトル角度の振幅に大きな幅が認められた。また、周期に関しても早い周期から遅い周期まで多様性が認められた。本研究において観察した動作局面は右足着床から左足着床までである。

この動作区間において踵着床歩行では速度ベクトルの角度周期が10例全てで1サイクルとなっている。しかし、足底全体着床の歩行では数例ではあるが角度の周期が1.5サイクルに近い例が認められた。踵着床歩行は比較的画一的な歩行形態で、個性は足底全体着床の歩行に表れる。

考 察

踵着床歩行には大きい減速があり、しかも減速は着床時からではない。着床後に僅かに加速した後減速に転じる例が多い。これは踵着床

時の衝撃が大殿筋の収縮で形成され、大殿筋の筋力発現により足関節を支点としたモーメントが発生し、重心を水平方向に加速すると考えられる。減速については、着床脚の突っ張り動作に伴い身体は反体脚の振り出し動作によるモーメントの発生により、支持脚上を乗り越えなければならないために減速すると考えられる。支持脚の腰部固定の状態に応じ最大減速（ピークの減速）から反体脚の大腿部の振り出す回転スピードに応じた加速が生じる。これらが反体脚の脚部の踵着床まで続くのである。したがって、歩行のスピードはこの反対脚部の振り出すスピードに依存するものと考えられる。

これに対して、足底全体着床の歩行では多くの場合着床時に加速は認められず、緩やかな減速を示している。ここでの減速は支持脚の膝関節屈曲によるもので、大腿四頭筋の伸張性収縮力に影響される。運動は踵着床とは対照的に支

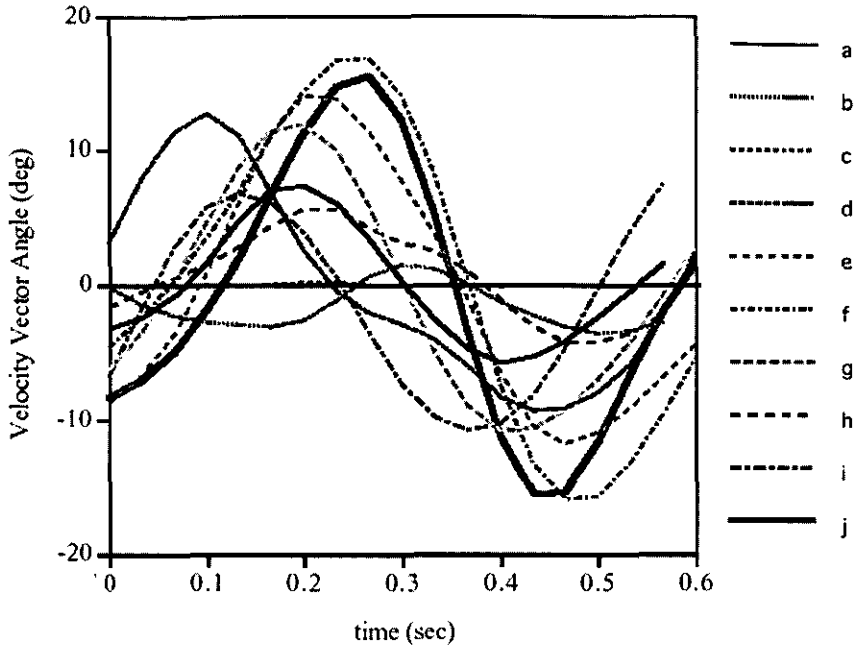


図6 足底全体接地形態の1歩行周期の速度ベクトルの方向の変化
 縦軸：角度（度）
 横軸：時間（秒）

持脚の大腿四頭筋への依存度が高いと考えられる。そのため加速は反対側の脚の振り出し動作を補助的に用いながら、大腿四頭筋の収縮力を用いるものと考えられる。

予測されたような筋の活動と歩行動作との関係は、今後の筋電図解析等で明らかにする必要があると考えられる。しかし、膝関節の屈曲状態と伸展動作による運動の形成はこの動作を支配する筋力発現様態と深く関係することから、これら2つの異なる歩行形態では運動に対する各個々人の運動の理解、或いは運動へのイメージが全く異なることを示唆していると考えられる。

踵着床歩行の全体に共通して周期性の安定が認められる。通常歩行におけるスピードの増加は、歩幅の増加から起こり、周期の増加はこの後に発生する。したがって、自然歩行における歩行周期は脚長や下腿長などの個体に固有の身

体形態に依存すると考えられる。踵着床歩行では踵骨部の振り下ろし衝撃力により、運動のアクセントが形成され、全体に均一なリズムのパターンを生み出しているものと考えられる。これに対して、足底全体着床の歩行では膝関節角の状態によって、速度ベクトルの方向が影響されるため、運動中のベクトルの角周期に不安定な状態が発生すると考えられる。また、膝関節屈曲角の大きさが動きのリズムにおけるアクセントを形成するものと考えられる。すなわち、動きのアクセントは着床時よりも、寧ろ大腿四頭筋の収縮によって生じる膝関節の伸展動作で形成されることが考えられる。したがって、時間的な運動の理解という点ではこの両群の歩行には決定的な違いが存在し、歩行運動を全く異なる運動イメージで捕らえているものと考えられる。また、速度ベクトル角の変化に見られる周期性の違いは、足底全体着床の歩行においてさ

えも、異なる運動理解のあることを示唆していると考えられる。

まとめ

歩行は周期的な運動であり、人間の基本的な行動様式の一つである。今回の研究では足の着床時の動作に着目し、歩行分析を試みた。着床時の動作は踵着床歩行と足底全体歩行に分類された。踵着床歩行は着床時から僅かな速度上昇の後に大きな減速をする。自然歩行における速度ベクトルの変化は、振幅は多様な変化を示す。しかし、周期は安定しており、個体による差は小さい。足底全体歩行ではスピードは着床後直ちに減速するが、その減速量は小さい。速度ベクトルの角度変化は周期に関して多様な変化が認められる。この変化の原因が膝関節の伸展動作に由来することが示唆された。

参考文献

- Abrahamson M.A., Skinner H.B., Effeney D.J., Wilson L.A., "Prescription options for the below-knee amputee" a review, *Orthopedics* 8: 210-220,1985.
- American Academy of Orthopaedic Surgeons, "Joint Motion--Method of Measuring and Recording" American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1965.
- Andriacchi T.P., Hampton S.J., Schults A.B., Galanti J.D., "Three-dimensional coordinate data processing in human motion analysis" *J Biomech Eng* 101: 279-283,1979.
- Breakey J., "Gait of unilateral below-knee amputees" *Orth and Prosthet* 30: 17-24,1976.
- Charnley J., "The recording and the analysis of gait in relation to the surgery of the hip joint." *Clin Orthop* 58: 153-164,1968.
- Cook T.M., "Vector visualization in gait analysis" *Bull Prosth Res* 18(1)308-309,1981.
- Krag M.H., "Quantitative techniques for analysis of gait" *Automed* 6: 85-97,1981.
- McLeish R.D., "Charnley J.: Abduction forces in the one-legged stance" *J Biomech* 3: 191-209,1970.
- Merchant A. C., "Hip abductor muscle force. An experimental study of the influence of hip position with particular reference to rotation." *J Bone Joint Surg* 47 A: 462-476,1965.
- 角田 和彦, 「積雪路面における歩行の運動学的分析」北海道大学教育学部修士論文、1998.