

4次元動的解析による高齢者転倒予防運動の 効果判定に関する研究

| | | |
|---------|-----------|---------|
| | 東京慈恵会医科大学 | 殷 祥 洙 |
| (共同研究者) | 同 | 鈴木 直 樹 |
| | 同 | 竹 川 徹 |
| | 同 | 安 保 雅 博 |
| | 同 | 宮 野 佐 年 |

The Study of Exercise to Prevent Fall for Elders By Using 4-Dimensional Motion Analysis

by

Eun Sang Soo, Suzuki Naoki, Takekawa Toru,
Abo Masahiro, Miyano Satoshi
Jikei University School of Medicine

ABSTRACT

BACKGROUND: This study aimed to establish some common specific features and patterns in the falls among elders by using 4-dimensional musculoskeletal analyzing system in order to prevent falls with the clinical exercise approach. **METHODS:** The participants of this study were 5 community-dwelling females and a man. The history of falls was determined by self or proxy report in a clinical interview. Every participant agreed with the purpose of this study and gave an informed consent. Position markers for the motion analyse of stair climbing and falling were attached on his or her back knee and foot. Motion capture data were obtained from positions of these markers in the three-dimensional space during the movement tasks. Surface electromyography of muscles of the subjects were also recorded simultaneously. Then the musculoskeletal model of the human lower extremity was constructed from the MRI, which applied the data of the motion capture and the electromyography. Thus the motion and the

muscle contraction were visualized as four dimensions. The subjects gave the method of exercise in the base of the data, and performed it for ninety days. RESULTS: The subjects improved the muscle contraction around the knee, and the virtual reality model were useful for the education to the subjects. CONCLUSION: By visualizing muscle contraction corresponded the motion, this system distinguished keenly the risk for fall of the elders, and our work may extend the possibilities of useful clinical applications for preventing falls.

要 旨

本研究の目的は、高齢者における転倒の特徴を4次元動的解析により考察し、その予防運動の効果を判定することである。本実験では在宅生活をする5名の高齢者（女性4名、男性1名）を被検者とした。あらかじめ過去の転倒の有無をアンケート調査し、運動療法に同意を得たものを参加者とした。動的解析は踏み台昇降の動作にて行った。三次元動作解析機の位置センサーは被検者の腰部、膝関節、足部に設置した。また表面筋電のデータをこの動作時に位置データと同期して計測した。あらかじめMRIより計測したヒトの下肢筋骨格モデルに対し、計測した位置データおよび筋電データを加えることにより、4次元動的動作の視覚化を得ることができた。これを基に被検者に運動療法を処方し、これを90日間施行した。被検者は運動療法により膝関節周囲筋の筋収縮が改善したと思われた。

今回我々が用いたバーチャルリアリティモデルであるDigital Dummyは臨床応用に有用であると思われた。

緒 言

1997年の国民衛生の動向によると、1995年の転倒・転落による死亡者数は5911人であり、不慮の事故および有害作用による死亡のなかの13.0%を占める。あわせて高齢者になるに従いその件数は上昇する傾向が見られたと報告されてい

る。しかも転倒が骨折にいたる頻度は5から10%といわれており¹⁾、骨折の原因として転倒の割合は非常に多い。しかも骨折部位は大腿骨に多く見られる傾向がある²⁾。特に高齢女性においては骨粗鬆症を伴うことが多く、さらに骨折のリスクが高くなることが予想される³⁾。大腿骨頸部骨折等に伴う不動化による廃用症候群は、近年寝たきり老人の問題として一般的に認識されるようになってきており、さまざまな治療法、予防法が提唱されつつある。

転倒を起こしやすい場所の多くは小さな段差のある場所とされている⁴⁾。したがってこのような住環境を再現しその際の動作を解析することによって、個々のケースにおける転倒の予防法を考察することは重要であると思われる。今回われわれは高齢者の段差越え動作時の三次元動的測定を行うこととした。さらにその際本学高次元医用画像工学研究所において開発された“Digital Dummy”を用いることにより、バーチャルリアリティにおける動作再現を行った。この解析法はリアルタイムな筋張力、筋活動の可視化が可能なるものであり、四次元的動的解析と呼べるものである⁵⁾。あわせて被検者の筋力を測定し、転倒との関連について考察することとした。

1. 研究方法

1.1 対象

対象は本学附属第三病院（東京都狛江市和泉本町4-11-1）リハビリテーション科に外来通院する

表1 被験者の身体的特徴および膝関節可動域

| 症例 | 性別 | 年齢 | 身長 (cm) | 体重 (kg) | 転倒歴 | ROM右膝 屈曲(度) | ROM右膝 伸展(度) | ROM左膝 屈曲(度) | ROM左膝 伸展(度) | 移動能力 |
|----|----|----|------------|------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| 1 | 女性 | 74 | 148 | 52 | なし | 135 | -5 | 140 | 0 | 屋外歩行自立 |
| 2 | 男性 | 54 | 163 | 79 | あり | 145 | -5 | 135 | 0 | 屋内歩行自立 |
| 3 | 女性 | 78 | 160 | 38 | あり | 130 | -25 | 130 | -30 | 屋内歩行自立 |
| 4 | 女性 | 59 | 148 | 52 | なし | 135 | -10 | 140 | -10 | 屋外歩行自立 |
| 5 | 女性 | 68 | 142 | 72.6 | なし | 135 | -15 | 135 | -10 | 屋外歩行自立 |

5名(女性4名, 男性1名)の高齢者である。表1にそれぞれの被検者の年齢, 体重, 身長, 膝関節可動域, 移動能力を記した。全員が本研究の趣旨に同意し, 本研究期間中, 何らかの自覚症状の悪化を見たものはいなかった。

1. 2 筋力測定

測定期間の開始後, 90日目においてLumex社製Cybex 770および付属ソフトウェア(同Cybex NORM)を用い, 膝関節伸筋・屈筋の筋力測定, すなわち測定肢位を股関節屈曲85度の座位とし, 角速度60度/秒における膝関節屈曲時, 伸展時の等運動性最大筋力の測定を行った。これらの測定は左側から右側の順番で両膝関節について行われた。

筋力測定と同時に表面筋電の計測も行った。被検者の外側広筋, 大腿二頭筋長頭に表面電極を設置し, 日本光電製Neuropack Σにて表面筋電を測定し, ADコンバータ(ADInstruments, Mac Lab)を介してMacintosh Power book G3(Apple)にインストールされたソフトウェア上で整流フィルターを介したものをRaw dataとした。ソフトウェア上で周波数上限を500Hz, 下限を20Hzに設定し, そのRoot Mean Square(RMS)を求めた。被検者は以上の計測の後, 電極の設置位置を変化させずに次の動作測定を行うこととした。

1. 3 段差越え動作の測定

被検者の右側股関節, 膝関節, 足関節の関節活動の動態評価には3-Space Fastrak(Polhemus Inc.,

Colchester, VT)を使用した。このシステムは一つの電磁波を発するトランスミッターに対する4つのセンサーの三次元的位置関係を測定できるものである。センサーの設置部位は被検者の仙骨部, 大腿骨外果部, 腓骨頭, リスフラン関節背側中央部とし, 伸縮性のあるテープで皮膚に直接固定した。この装置に動態計測専用コンピュータ(DELTA, Precision 420)を接続し20Hzにてサンプリングした。この際に用いるソフトウェアは本学高次元医用画像工学研究所が開発した三次元位置レコーダを使用し⁵⁾, 後に述べるDigital Dummyを駆動することにより, リアルタイムな動態観察を行うことができる。また前述した筋力測定の際に設置した表面筋電電極と設定条件はそのまま使用し, ADコンバータと動態計測専用コンピュータを接続し, 位置データと同期して筋電データを計測した。

被検者は肩幅と同じ歩幅にて自然立位をとり, 被検者の前方に設置された10cm高の踏み台を昇降した。この際踏み台を右足から昇り右足から降りることとした。踏み台の大きさは一辺50cmの正方形であり, トランスミッターから50cm離れたところに設置した。トランスミッターは被検者の右側矢状面の地上60cmに固定して設置した。昇降のタスクはコンピュータの発するピープ音(1回/秒)にあわせてリズムカルに行った。予備的に5回踏み台昇降を行った後, 同じく5回の昇降の動態計測を行った。

1. 4 Digital Dummy

本学高次元医用画像研究所において開発された Digital Dummy は生体の4次元的動態を再現するバーチャルリアリティモデルである。関節構造をもつ全身骨格モデルに対し、ひも状の筋モデルを付加することにより、関節運動に伴う筋動態の計測を行うことができるものである。空間的な広がりを持ちコンピュータ上であらゆる視点からその動態を観察することが可能であり、さらにモーションキャプチャデータに同期することにより時間的な広がりも持つことから、4次元的筋骨格動態観察モデルといえることができる。骨格モデルはあらかじめ健常男子から得た全身MRIデータから3次元画像を再構築し、各関節をコンピュータ上で再現されている。全身の関節の協働を確認できるよう、関節可動域のパラメータを与えられ、ひも状の筋モデルがこの骨格上の解剖学的に正しい位置に貼付されている。この筋モデルは筋の形状やボリュームの情報を与えられていないが、そのことにより筋動態の計測が容易となっている。さらに各筋モデルには中継点が設置されており、筋の生体における複雑な走行を再現している。モーションキャプチャデータをこのモデルに与えることにより、リアルタイムな関節運動と、それに対応する各筋の理論上の筋長が得られることになる⁵⁾。今回の実験で用いた実行画面は、被検者の動作に同期した骨格モデルの駆動画面、表面筋電データ、理論上の筋長変化を表すこととした。

1. 5 運動療法

各被検者は訓練に際し、転倒を予防するための方法を考察するため、まず筋力測定、段差越え動作計測を施行した。その後各被検者には両膝関節伸展ストレッチ、仰臥位での両下肢伸展運動の他に、ゴムバンド (HYGRNIC社製、セラバンド) を用いた膝関節屈伸運動、すなわち下腿にセラバンドを適度の余裕を持って8の字上に結わえ、椅子上の座位で膝関節の抵抗運動を行わせた。この

運動は膝関節伸筋群のみならず屈筋群の収縮を促すものであり、変形性膝関節症患者への有効性が証明されているものである⁶⁾。抵抗の強さは可動域全域で10回程度が遂行可能な程度とした。これを一日20回、週5回以上施行し、その成果を確認するため、90日後の筋力測定を行った。また訓練期間中の転倒の有無につき口頭で確認した。

2. 結果

2. 1 筋力測定

各被検者の訓練前後の右膝関節における筋力変化およびRMS最大値の変化率(訓練後の測定値/訓練前の測定値)を表2に示した。全ての被検者において著明な筋力変化、および外側広筋、大腿二頭筋の等張性運動における表面筋電のRMS最大値の変化は認められなかった。

表2 右膝関節筋力推移

| 症例 | 屈曲筋力 | 大腿二頭筋 RMS | 伸展筋力 | 外側広筋 RMS |
|----|------|--------------|------|-------------|
| 1 | 0.75 | 3.24 | 1.11 | 0.69 |
| 2 | 1.85 | 1.02 | 1.25 | 0.94 |
| 3 | 0.82 | 0.42 | 1.46 | 0.81 |
| 4 | 1.25 | 2.97 | 2.1 | 1.85 |
| 5 | 1 | 1.2 | 1.01 | 1.11 |

2. 2 Digital Dummyによる踏み台昇降動作の解析

今回の研究にあたり作成したソフトウェアの実行画面を図1に示す。被検者の動作にあわせた筋電図、筋長変化、関節角度がこのようにリアルタイムに表示された。被検者はこの動作を行った後、直ちにこの実行画面を見ることにより、自分の動作をコンピュータ上であらゆる角度から確認することが可能であった。また特定の関節を指定することにより、動作に同期した拡大図を示すことも可能であった。

2. 3 動作解析の結果と転倒歴

各被検者の結果を図2~6に示した。踏み台を



図1 Digital Dummyの実行画面

昇るときと、踏み台から降りたときに足底のどこかが触れた瞬間をキャプチャしたものである。被検者1, 4, 5は訓練開始前に転倒歴がなかったのに対し、被検者2, 3は1回以上転倒したものであ

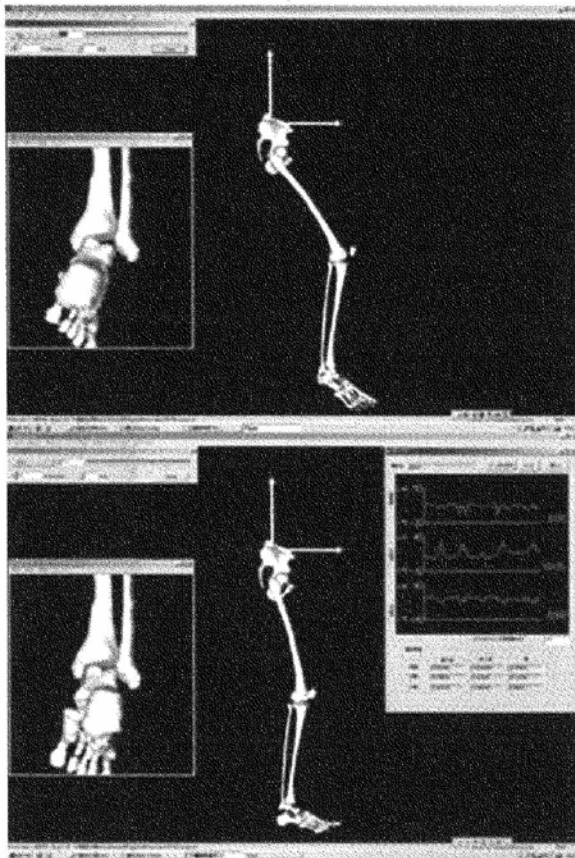


図2 症例1

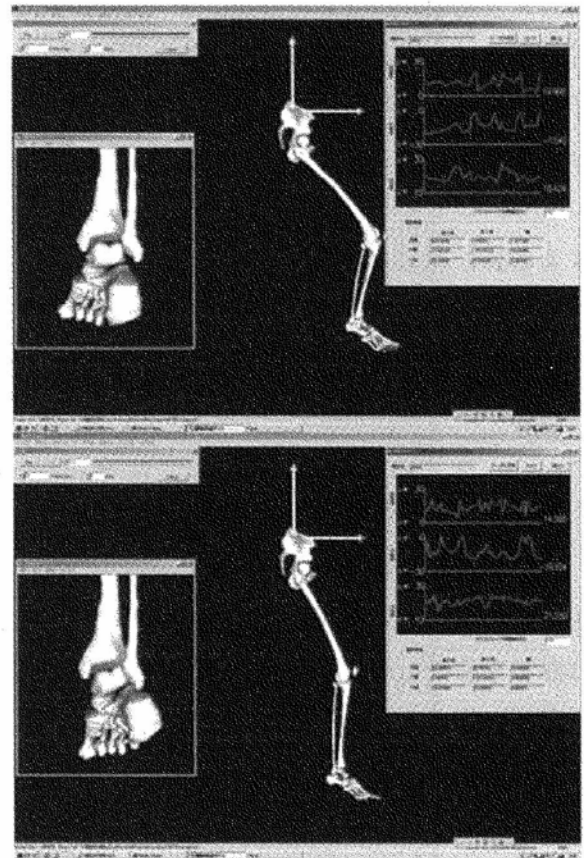


図3 症例2

た。図からもわかる通り、昇る時の足関節はやや内反する傾向が全例に見られたのに対し、降りるときは股関節が内旋位になる傾向が被検者2, 3に見られた。特にこれらの被検者に対しては、Digital Dummyを用いてこのことを指摘し、十分な接地時の注意を促した。しかし被検者3に関しては訓練期間中も頻回に転倒する傾向があった。また、症例1の訓練前後に際しての動作解析の結果を図7に示した。訓練後は昇りの際に膝関節の屈曲動作が十分に見られるようになったことが確認された。

3. 考察

3.1 転倒と運動療法

一般に易転倒者の傾向として以下のようなことが報告されている。

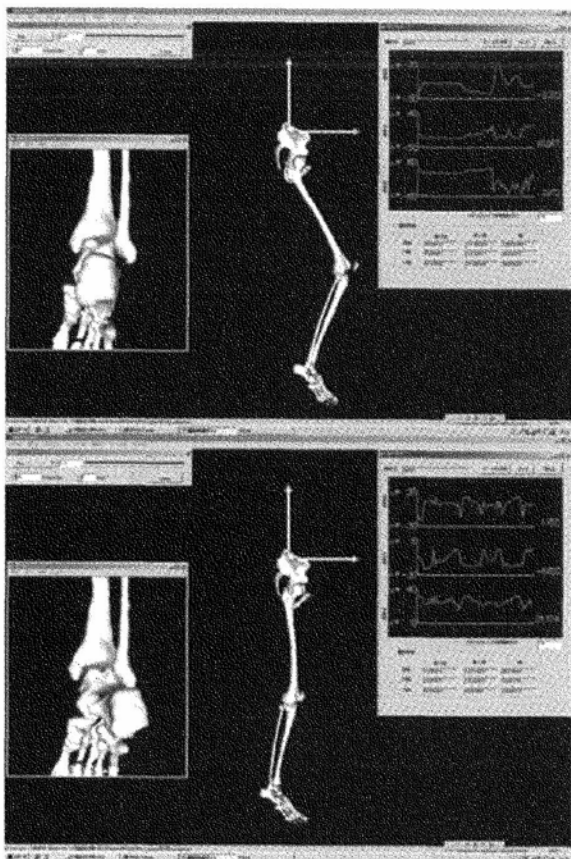


図4 症例3



図5 症例4

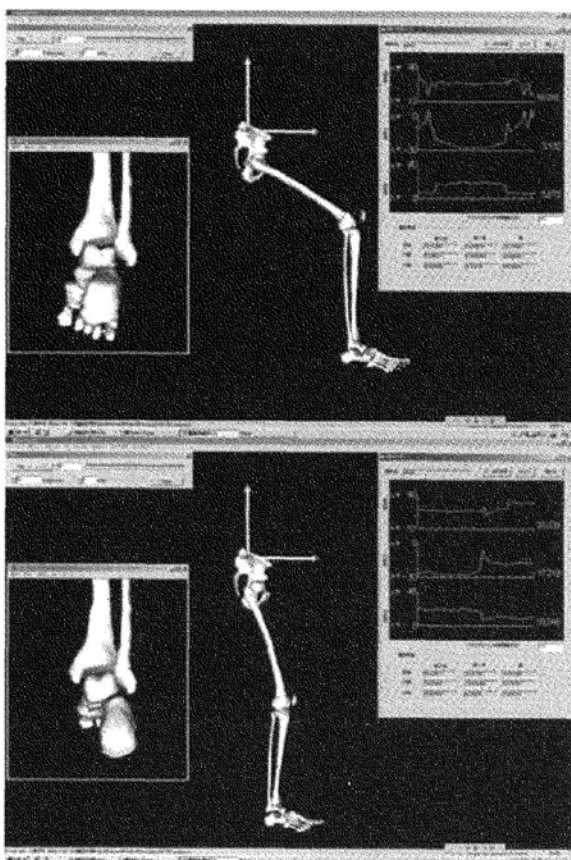


図6 症例5

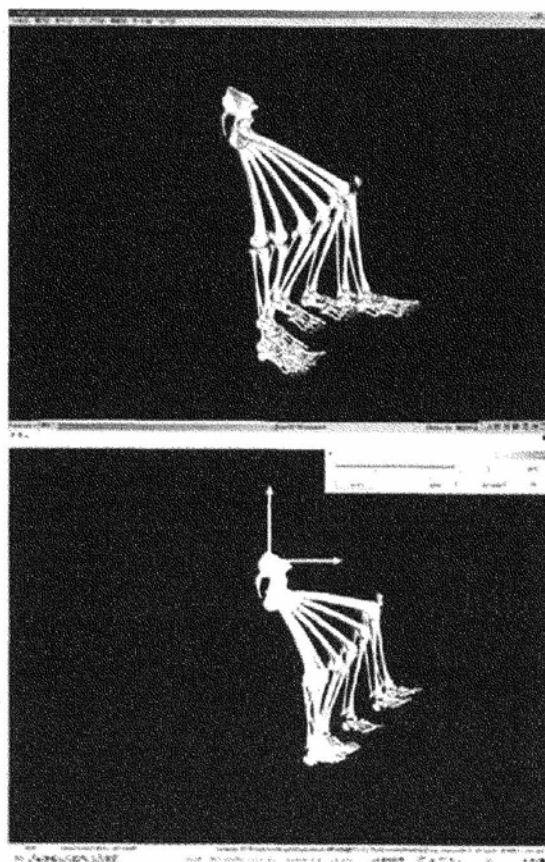


図7 症例1の訓練前(上)と訓練後(下)

- ①膝伸展筋力が弱い⁷⁾
- ②歩行速度が遅い⁸⁾
- ③重心動揺面積が大きい⁹⁾
- ④歩行時の体幹の平均前屈角度と最少前屈角度および最大前屈角度が大きい¹⁰⁾

さらに高齢者の特徴として姿勢制御の障害として片足立ちバランス保持時間の減少¹¹⁾、動作時の重心動揺¹²⁾、大腿四頭筋筋力の低下が見られるといわれている¹³⁾。以上のことを総合すると、もともと筋の廃用性関節拘縮としての股関節、膝関節屈曲拘縮が少なからず見られる状態、すなわち大腿四頭筋の筋力低下、ハムストリングの短縮および筋力低下が重心の移動に影響を及ぼし、前屈姿勢をとりがちとなり、外乱に対する重心移動の修正が困難となってくるということが予想される。このような退行性関節疾患に対する運動療法の有用性は広く知られており¹⁴⁾、今回我々はその効果を検証した。

今回我々が用いた運動療法は膝関節の伸展のみならず屈曲動作も重視するものであった。Digital Dummyが示したごとく、下肢のtoe clearanceが訓練前後で明らかに大きくなったことからわかるとおり、スムーズな下肢各関節運動の協調が訓練により得られるようになったことは興味深く、今後も症例を増やしていく予定である。また高齢者は固有知覚が低下しているとの報告もあり¹²⁾、明確な筋力増強効果が見られなくとも、運動療法は知覚面での改善も得られる可能性があることが示唆された。またこの訓練法に脱落者がいなかったことは、非常に容易な、継続性を保ちやすい訓練であるとともに、定期的な筋力測定、動作解析が被検者のモチベーションを高めたためであると思われた。各地で行われている転倒予防教室では階段昇降、スクワット、椅子からの立ち上がりなど非常に煩雑な訓練法が提唱されているが、何よりもまず受診者の訓練目標（転倒を予防するにはどこを鍛えればよいか等）を明確にすることがコ

ンプライアンスの向上につながるのではないだろうか。

3. 2 易転倒性の評価

Digital Dummyが示すように、易転倒者は着地直前において足関節の外反傾向が見られた。これは前述した固有感覚の低下によるものと考えられた。Digital Dummyを用いることにより微妙な、しかし重要な関節動態を視覚的に表現することが可能であり、被検者に対しその歩行状態の説明を行うことが容易であった。

また易転倒者は踏み台に足を乗せる直前に、スムーズな膝関節伸展運動が見られないことが観察されたが、これは前述したように膝関節伸筋群の筋力低下とともに、屈筋群の短縮が強いためであると思われた。同様に踏み台への足底接地からの股関節伸展動作は、2関節筋であるハムストリングスの収縮がclosed kinetic chainの観点からも重要であると思われる。

3. 3 バーチャルリアリティを用いた動態評価

Digital Dummyの最大の特徴は、三次元の空間に時間軸を加えた四次元的モデルであるということである。動作計測の後、直ちに実行画面を見ることにより、被検者は直ちにその結果を非常にわかりやすく理解することが可能であった。マウス操作により被検者自身がさまざまな角度からの自分の動作を確認できるため、ビジュアルフィードバックの効果が得られやすいものであると思われた。この方法を用いることにより、装具療法や手術療法による動作の改善のシミュレーションも行われており¹⁵⁾、更なる臨床応用が期待される。

謝 辞

本研究に対し研究助成を賜りました財団法人デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。本研究の実施に際し、Digital Dummyのプ

プログラム作成, および臨床計測にご尽力いただいた早稲田大学理工学部の山本洋子さん, 大竹義人君, ならびに本研究にご協力いただいた被検者の方々に深謝いたします。

文 献

- 1) Neufeld R.R., Tideiksaar R., Yew E., Brooks F., Young J., Browne G., Hsu M.A. A multidisciplinary falls consultation service in a nursing home. *Gerontologist*, 31, 120-3 (1991)
- 2) 都築 健: 高齢者骨折者の転倒状況. 理学療法, 23, 37-9 (1993)
- 3) 林泰史: 老年者の転倒 転倒による骨折. *Geriatric Medicine*, 29, 681-4 (1991)
- 4) 鈴木隆雄: 高齢者の転倒事故. 臨床リハ, 10, 955-60 (2001)
- 5) Yamamoto Y., Suzuki N., Hattori A., Otake Y., Sumiyama K., Urano Y., Tominaga H.: "4 Dimensional Human Anatomical Model with Movement Function", *The Japan Society of Computer Aided Surgery*, 33-4 (2000)
- 6) 竹川徹, 殷祥洙, 安保雅博, 宮野佐年. 変形性膝関節症の運動療法についての検討. 体力科学, in printing
- 7) Sherrington C., Lord S.R. Increased prevalence of fall risk factors in older people following hip fracture. *Gerontology*, 44, 340-4 (1998)
- 8) VanSwearingen J.M., Paschal K.A., Bonino P., Chen T.W. Assessing recurrent fall risk of community-dwelling, frail older veterans using specific tests of mobility and the physical performance test of function. *J. Gerontol A Biol. Sci. Med. Sci.* Nov;53 (6) , M457-64 (1998)
- 9) 猪飼哲夫, 植松海雲, 殷祥洙, 橋本圭司, 宮野佐年: 閉経後女性の転倒と骨粗鬆症 生活習慣, バランス機能, 下肢筋力などとの関係. リハビリテーション医学, 37, 1102-3 (2000)
- 10) Grabiner M.D., Koh T.J., Lundin T.M., Jahnigen D.W., Kinematics of recovery from a stumble. *J. Gerontol.* 48, 97-102 (1993)
- 11) Wall J.C., Hogan D.B., Turnbull G.I., Fox R.A., The kinematics of idiopathic gait disorder. A comparison with healthy young and elderly females. *Scand. J. Rehabil Med.*, 23, 159-64 (1991)
- 12) Wolfson L., Gait and balance dysfunction: a model of the interaction of age and disease. *Neuroscientist*, 7, 178-83 (2001)
- 13) 中島育昌, 望月和憲, 赤松功也: 股関節の整形外科 今日の常識と話題 老人の股関節疾患 大腿骨頸部骨折の発生とosteoporosis 特に転倒に関する検討. 整形・災害外科, 5, 539-545 (1998)
- 14) 安保雅博, 殷祥洙, 宮野佐年: 慈医大誌, in printing
- 15) Otake Y., Eun S.S., Suzuki N., Hattori A., Yamamoto Y., Abo M., Miyano S., Development of 4-Dimensional Whole Body Musculoskeletal Model "Digital Dummy". The 1st World Congress of The International Society of Physical and Rehabilitation Medicine, 47-52 (2001)