

厚生労働科学研究費補助金
長寿科学総合研究事業

高齢者の転倒予防に関する研究

平成20年度 総括・分担研究報告書

主任研究者	田村俊世	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科 教授
分担研究者	東 祐二	藤元早鈴病院 室長
分担研究者	中山茂樹	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科 教授
分担研究者	吉村拓巳	東京都立産業技術高等専門学校 准教授
分担研究者	関根正樹	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科 助教

平成 21 (2009) 年 3 月

厚生労働科学研究費補助金
長寿科学総合研究事業

高齢者の転倒予防に関する研究

平成20年度 総括・分担研究報告書

主任研究者	田村俊世	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科	教授
分担研究者	東 祐二	藤元早鈴病院	室長
分担研究者	中山茂樹	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科	教授
分担研究者	吉村拓巳	東京都立産業技術高等専門学校	准教授
分担研究者	関根正樹	国立大学法人千葉大学大学院工学研究科	助教

平成 21(2009)年 3 月

目 次

I. 総括研究報告書	5
高齢者の転倒予防に関する研究	7
田村俊世	
II. 分担研究報告	17
1. 動的バランスの簡便な評価システムの開発	19
田村 俊世	
(資料)漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答の計測 及び動的バランス評価の検討	
2. バランス機能維持のための訓練システムの開発	35
関根 正樹	
(資料)体性感覚振動刺激に対する姿勢応答	
3. 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発	49
吉村 拓巳	
(資料)装着型エアバッグシステムの開発	
4. 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言	61
中山 茂樹	
(資料)転倒予防のための最適空間設計 —認知症者のための空間・環境認知的視点から—	
5. 転倒のリスクアセスメントの作成	71
東 祐二	
(資料)装具効果判定および転倒リスクアセスメントシート	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	81
IV. 研究成果の刊行物・別刷	85

I. 総括研究報告書

高齢者の転倒予防に関する研究

主任研究者 田村俊世 千葉大学大学院工学研究科・教授

研究要旨 転倒を防止するためには、外因としての福祉用具や施設の居住環境といった、「ハード」面での支援ならびに社会的側面、個々人の心理面のケアも重要となってくる。そこで学際的に機器開発を中心とした転倒予防プロジェクトとして、転倒予防、予測によるQOLの向上、転倒後の疾病を防止する総合的な支援システムを考案した。その結果、1) バランス機能測定装置を用いた身体平衡機能の特徴を角速度の左右方向の回転（ピッチ）の計測で確認できた、また2) バランス機能維持のための姿勢調整に腰や足首への振動刺激が有効であることが示された、3) 加速度・角速度センサによる転倒の予測とエアバッグの開放による骨折予防のための転倒衝撃吸収システムが完成した、4) 回想的空間・環境を提供することによって転倒事故の防止につながることを示された。最後に5) 定量的でかつ経時的な転倒リスクアセスメント評価法を確立した。

分担研究者

田村俊世 千葉大学大学院工学研究科・教授
東 祐二 藤元早鈴病院・室長
中山茂樹 千葉大学大学院工学研究科・教授
吉村拓巳 東京都立産業技術高等専門学校・准教授
関根正樹 千葉大学大学院工学研究科・助教

A. 研究目的

転倒は、環境因子が重大な影響を与えるが、加齢にともなう身体バランス機能の低下が大きい要素を占めることが云われている。そこで1) 動的なバランスを簡便に評価できるシステムの開発（田村）、2) バランス機能維持のための訓練システムの開発（関根）、3) 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発（吉村）、4) 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言（中山）、5) 作業療法士を中心とした転倒のリスクアセスメントの作成（東）、の課題についてそれぞれ研究を遂行した。

1. 動的バランスの簡便な評価システムの開発

転倒は躓きや滑りなどの突発的な外力が加えられた際に生じると考えられ、外乱に対する身体的なバランスを評価することは転倒を予防する上で重要である。昨年度は、立位姿勢において後方向に外乱を発生させる水平外乱刺激発生装置を用いてランダムに後方外乱を生じさせ、その際の加速度、角速度を計測した結果、姿勢戦略を左右方向の回転（pitch）角から観察することができた。しかしながら姿勢戦略が足関節、股関節、ステップング戦略と順次移行しない例がみられた。そこで本年度は外乱を漸増させて与えた際の戦略の移行を捉え、この移行過程を検討するとともに、これらとステップング戦略との関係について検討した。

2. バランス機能維持のための訓練システムの開発

本研究では足底への体性感覚刺激を利用した高齢者の転倒防止装置の開発を目的とし、昨年度の研究成果として小型の振動モータとタクトスイッチで構成されるインソール型足底振動刺激装置を開発した。本年度は新たに小型のシリンダ型振動モータ

タを使用した振動刺激装置を試作し、この振動刺激装置を用いて足底以外の部位も含め姿勢調節に効果的に影響を及ぼす刺激部位の検討を行った。

3. 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発

ここでは、エアバッグにより容易に装着可能で、転倒・転落が発生した場合に外傷を軽減するシステムの開発を行っている。昨年度までに加速度・角速度センサを用い、エアバッグの作動に必要な転倒検出方法の検討と、エアバッグを膨らませる機構の試作を行い、動作の検証を行った。加速度・角速度波形を用いた簡便なアルゴリズムにより、すべての模擬転倒において転倒の予兆を検出可能であった。角速度を計測することにより、転倒以外の動作の誤動作を防止することができた。

本年度は加速度センサと、角速度センサを用いた装着型エアバッグシステムのプロトタイプを開発した。さらに開発したシステムを用い、実際の模擬転倒時にエアバッグが動作するのかの検討を行った。

4. 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言

本研究は、高齢者の生活・居住空間における転倒・転落事故防止に対して、建築学的にはディテールデザインや仕上げ材の選択などが配慮されてきた既往研究とは異なり、認知症高齢者が安心・安全に活動・生活できる空間・環境を提供することにより、事故予防につなげようとするものである。すなわち認知症高齢者へのセラピーとして近年注目されている回想療法に着目し、回想的空間・環境を提供することによって転倒事故を招く徘徊等の周辺症状緩和の可能性があるかを検討した。

こうした回想法とその具体的な治療手段に着目し、写真や絵の中の建物や風景、使用する道具などが、現実には高齢者の目の前に存在し、見たり触れたり使えたりすることができれば、より認知症高齢者の心に響くであろうと考え、いくつかの試みを行い、その可能性を検討した。

なお、昨年度の研究でも回想空間の提案を行っているが、課題として挙げた施設での環境と現実の環境との相違がどのような影響を与えるか、という視

点について、特に注意を払いながら研究を行った。

高齢者になじみのある空間・環境を提供することにより、認知症における周辺症状を緩和し、安全・安心空間を提供できる可能性を検討することが、本研究の目的である。

5. 転倒のリスクアセスメントの作成

転倒のリスクを回避するための重要事項として、定量的でかつ経時的な評価法の確立し自立度の判定に客観性を持たせることが昨年度研究によって明らかになった。そこで、本年度は、定量的でかつ経時的な評価法の確立に関する検討を行うことを目的とし、加速度センサと角速度センサを用いた計測システムを試作し、臨床で移動動作の評価に用いられる Timed Up And Go Test(TUG-T)の評価に応用した。さらに、これまでの研究成果をもとに、総合的な転倒のリスクアセスメントが可能とすることを目的として、転倒のリスクアセスメントシート原案を作成した。

B. 研究方法

1. 動的バランスの簡便な評価システムの開発

動的なバランスの計測は、被験者の足関節・大腿・腰部部に角速度センサ (Gyrocube, O-NAVI, USA) を装着し、後方への外乱刺激に対する各部位の pitch 方向 (左右方向の回転) の身体動揺を計測した。また、床面の加速度を計測するために床面上に加速度センサ (Gyrocube, O-NAVI, USA) を配置した。

全ての角速度センサ及び加速度センサの出力はサンプリング周波数 1kHz で A/D 変換を行い記録した。

被験者は健常若年者の男性 12 名、女性 4 名の計 16 名 (年齢 22.9 ± 2.1 歳、身長 168.1 ± 7.5 cm、体重 59.0 ± 8.1 kg) を対象とした。

(倫理面への配慮)

実験に際し、千葉大学工学部倫理委員会の承認を得た後、被験者には実験内容を十分説明し、書面にて同意を得て行った。また実験で得られた被験者の

情報は個人が特定されないよう配慮をし、個人名で管理をしないこととした。

2. バランス機能維持のための訓練システムの開発

振動刺激部位と姿勢調節の関連性を調べるために、立位姿勢において各部位に振動刺激を与えた際の重心移動軌跡を重心動揺計 (G-620, アニマ) により測定した。

足底へ振動刺激を加える実験では、靴の中敷に配置することを想定し、厚さ 10mm の軟質スポンジ製のマットをくり貫き、その中に振動刺激装置を配置した。振動モータを配置する部位は足底面の主たる荷重部位であり、姿勢制御に重要と考えられる 3 箇所、第 1 中足骨頭、第 5 中骨骨頭、踵部とし、両足で計 6 箇所とした。振動装置を組み込んだマットは切り離し可能で、被験者ごとの足のサイズに対応したスポンジに交換することで、23~28cm までの調節が可能である。

被験者は、顕著な疾患を認めない健康成人 7 名 (年齢 22.1 ± 0.4 歳, 身長 172.1 ± 4.7 cm, 体重 60.3 ± 8.1 kg) を対象とした。

足底以外に、左足首の内側と外側 (踝付近)、両足首の前側と後側、左大腿部の内側と外側、両大腿部の前側と後側、腰 (骨盤付近) の左側、背中、首の左側と後側、左肩の外側の合計 13 箇所に振動刺激装置を配置し、各部位が重心動揺に与える影響を評価した。

被験者は、顕著な疾患を認めない健康成人 10 名 (年齢 21.9 ± 1.1 歳, 身長 172.1 ± 4.3 cm, 体重 60.8 ± 6.5 kg) を対象とした。

(倫理面への配慮)

実験に際し、千葉大学工学部倫理委員会の承認を得た後、被験者には実験内容を十分説明し、書面にて同意を得て行った。また実験で得られた被験者の情報は個人が特定されないよう配慮をし、個人名で管理をしないこととした。

3. 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発

加速度センサ、角速度センサ、増幅部、CPU、メモリーカードコネクタより構成される行動計測装置

を試作し、動作の検証を行った。外形寸法は $50 \times 56 \times 18$ mm, 重量は電池、メモリーカードを含め 62g である。動作時間はアルカリ電池を用い、連続使用で約 200 時間である。動作スイッチは高齢者が使用することを考慮し、バックル内に磁石と磁気スイッチを内蔵し、バックルを閉めた際に電源が入る構成とした。センサと電池ボックスは専用のベルト上に設置されており、センサが背中中の位置になるように配置されている。インフレーターは 1 個あたりの重量が 160g で、火薬によりガスボンベ上部の板を解放させ、エアバッグにガスを導く構造となっている。火薬の使用量は 0.1g と微量であり、火薬室はアルミ製の筐体で製作しているため、身体に装着しても危険のないように配慮されている。また、経済産業省、火薬類取締法の適用除外申請の認可をうけており、安全性の高い構造である。エアバッグの繊維素材は、ナイロン 66 を使用した高密度織物に、シリコンをコーティングした基布を使用し、機密性と難燃性を有している。

決定した転倒予測アルゴリズムを開発した装着型エアバッグシステムに実装し、健康成人 4 名 (年齢 23.0 ± 1.4 歳, 体重 63.3 ± 8.5 kg, 身長 173.5 ± 4.8 cm) を対象としたシステムの動作検証実験を行った。この検証実験では、被験者に試作したエアバッグシステムを装着し、マットレス上に被験者自ら後方へ倒れこむ模擬転倒を行った。模擬転倒による傷害を予防するため、マットレスは 2 枚重ねて使用した。

転倒の様子は、高速撮影が可能なカメラ (EXILIM EX-F1, CASIO COMPUTER CO., LTD. JAPAN) を用いて 300fps で撮影した。撮影後、得られた画像を用いてエアバッグの動作開始からエアバッグが開くまでの時間と身体がマットに接地するまでの時間を計測した。エアバッグの動作開始のタイミングを知るために、エアバッグ膨張開始時に LED を発光させる回路を付加し、カメラから確認できる位置

に設置した。

(倫理面への配慮)

実験に際し、千葉大学工学部倫理委員会の承認を得た後、被験者には実験内容を十分説明し、書面にて同意を得て行った。また実験で得られた被験者の情報は個人が特定されないよう配慮をし、個人名で管理をしないこととした。

4. 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言

本年は、昨年度実施他回想的空間における認知症高齢者の行動を観察することにより、空間認知力の変化により、より現実にいる空間を把握し、それによって転倒・転落等の事故予防につなげられる可能性を探ることを第一の方法とした。

本研究では、まずいわゆる老人病院(療養型病床)の病棟に和室の雰囲気をもつコーナーを設置し、さらに異なる病院の認知症患者デイケア施設において、全面的な改装環境を設けることにより、認知症高齢者の行動の変化を観察し、併せて MOSES スケールによって客観的な評価を行ったものである。

5. 転倒のリスクアセスメントの作成

臨床で移動動作の評価に用いられる Timed Up And Go Test(TUG-T)の動作フェーズを身体の加速度と角速度から検出する手法を提案し、片麻痺者の TUG-T に対して本手法とセラピストの目視による評価結果が一致するかについて検討した。さらに同時に計測した、腰部加速度信号をもとにして、動作フェーズごとに定量的評価を行い、歩行レベルの違う片麻痺者の自立度判定のモニタリングが可能かについて検討した。なお、対象は脳卒中片麻痺者 20 名(歩行自立 10 名(男 5 名,女 5 名,71.2±6 歳,右麻痺 5 名,左麻痺 5 名,Br.Stage III 1 名,IV 8 名,V 1 名),歩行監視者 10 名(男 4 名,女 6 名,65.3±13 歳,右麻痺 6 名,左麻痺 4 名,Br.Stage III 3 名,IV 7 名))とした。また、動作時間を測定した療法士は、リハビリテーション臨床場面に従事する 12 名(平均年齢 28±5 歳,経験年数 6.2±5 年)とした。調査・計測にあたっては、藤元早鈴病院の倫理委員会の承認を得た。

これまで3ヵ年の研究成果をもとに、総合的な転

倒アセスメントシート原案を作成した。

なお、本計測の際には、当院倫理委員会の承認並びに対象者自身からのインフォームドコンセントを得た後、実施した。

(倫理面への配慮)

臨床における機器の評価・実験に関しては、その安全性について十分検討を行った。また、実施機関の倫理委員会による承認を得た後、被験者およびその家族に対し、実験内容と意義および生じうる危険性について書面ならびに口頭で十分に説明を行い、書面にて同意を取った。原則としてスタンドアロンの PC を用い、パスワードで保護された USB メモリを用いて情報漏えいがないように配慮した。情報の管理にはセキュリティ対策を十分に行い、プライバシーの保護を最優先とした。また、学会等でデータを発表する際には、個人が特定されないように配慮した。

C. 研究結果

1. 動的バランスの簡便な評価システムの開発

後方への水平外乱刺激時に腰背部と足関節・膝関節との角速度の関係をみると、小さい刺激では同位相に、大きい刺激では逆位相、さらに刺激が大きくなるとステップするのとほぼ同時に、逆位相の形が崩れ足関節・膝関節の動揺が大きく変化した。これらを見ると、足関節群が一番多く 9 人、中間群、股関節群がそれぞれ 4 人、3 人という結果となった。これらの群内での身体的特徴・重心動揺検査結果と Step-Acc とをピアソンの相関係数を用いて解析したところ、股関節群の体重においてのみ有意に相関があった。しかし、これら以外の身体的特徴・重心動揺検査結果と Step-Acc に有意な相関関係は見られなかった。すなわち、姿勢制御戦略の移行過程の違いと静的バランスとの関係や Step-Acc との関係は見出せなかった。股関節群については女性のみであり、他の群より小柄な傾向を示した。また、被験者全体での身体的特徴及び重心動揺検査結果と Step-Acc との相関係数を見ると、どのパラメータに

においても本研究で定義した動的バランス評価指標 Step-Acc との間に相関が見られなかった。

2. バランス機能維持のための訓練システムの開発

刺激箇所に対する姿勢制御に関しては、従来の報告と同様、刺激箇所と反対の方向への足圧中心の移動が観察された。振動強度に関しては、強度の大小による足圧中心の変化は確認されず、あまり姿勢制御に影響を与えていないと考えられた。周波数に関しては、周波数の高さにより足圧中心軌跡の変動に差が確認され、振動刺激による姿勢制御を行う上で有効なパラメータと考えられた。

部位の違いに対する刺激は、2回の測定で両方とも刺激前後の重心変位に有意差がみられた部位は、足首全方向と腰のみであった ($p<0.05$)。また、1回目の測定と2回目の測定の変位に差がみられた部位は、首後側のみであり ($p<0.05$)、他の部位には有意差はみられなかった。

3. 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発

エアバッグ膨張開始から膨張終了までの時間と膨張開始から身体の接地までの時間は平均で120msであった。また膨張終了してからマットに接地するまでの時間は平均で120msであった。マットに身体が接地する前にエアバッグが開いていることがわかる。この結果より試作したシステムは転倒を予測し、身体が転倒による衝撃を受ける前にエアバッグが動作することが確認できた。

4. 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言

回想環境における心理療法は必ずしも全員に効果があるわけではないが、明らかな改善がみられる高齢者もいて、相応に効果があるらしいことが判明した。特に女性高齢者において「抑うつ感」や「引きこもり」の点において著しい改善がみられる高齢者がおり、より積極的な日常生活の展開がみられる。また周囲の変化への気づきもみられ、こうした環境とその変化をとらえる能力の維持は、事故防止につながるものと思われる。

5. 転倒のリスクアセスメントの作成

TUG-Tのトータルタイムの比較では、監視群は有意に遂行時間が長く、動作別の遂行時間の比較では、往路歩行と復路歩行で監視群は、有意に遂行時間が長かった。これによって、歩行の遂行時間の差が全体の遂行時間に影響していることがわかった。加速度値をもとに切り出した各フェーズごとのRMS値、変動係数は、歩行を除いて有意差が認められなかった。これは、歩行以外の動作では、自立度が同程度であることを示しており、自立と監視の差は歩行レベルで大きく影響されることを示していた。歩行時の左右方向と上下方向の比較では、監視群は、有意にRMS値が少なかった。これは、監視群は安定歩行を得るために、歩幅を短くすることで、上下の動きを制御し、歩間を狭くすることで、左右の動きを制御する傾向にあると考えられた。

今回作成したリスクアセスメントシートは、

- ① 基本情報シートとして、ICFの項目に沿って、障害状況を整理できるよう整備した。
- ② 同時にリスクマネジメントのスクリーニングとして、転倒に直接起因する項目と考慮すべき項目をチェックできるように整備した。
- ③ さらに、基本的な歩行能力や10m歩行、TUG-Tについて、客観的な指標を用いた評価が可能ないように整備し、併せて、様々な環境場面における、歩行動作能力を評価し、総合的に転倒のリスクアセスメントが可能ないように整備した。

D. 考察

1. 動的バランスの簡便な評価システムの開発

今回の実験では足関節・膝関節・腰背部のPitch方向の角速度に着目しバランスの評価を行った。個人差はあるものの、足関節・膝関節の動揺と腰背部の動揺の位相を比較することにより、ステップする外乱刺激より小さい刺激の場合には足関節戦略・股関節戦略で姿勢制御を行っていることは明らかであった。本年度は、後方の外乱刺激を漸増させて与えた際の姿勢応答を角速度センサを用いて評価し

た。その結果、ランダムに外乱刺激を与える昨年度の研究とは異なり、全被験者において姿勢制御戦略が外乱刺激の大きさに応じて足関節戦略、股関節戦略、ステップ戦略と段階的に移行していることが確認された。さらに、今回の若年者を対象とした実験では被験者は外乱刺激の大きさに伴う戦略の移行過程により3群に分類され、その中で足関節を優位に働かせる群が最も多かった。また、足関節戦略から股関節戦略への移行付近において、足関節戦略に股関節戦略が付随した混合型の戦略を用いて対応していることを本研究においても示せた。

一方、動的バランス評価の指標とした最小ステップ加速値 (Step-Acc) と戦略の移行過程及び静的バランス検査との関係は見られなかった。しかし、今回のような外乱刺激を与える実験では静的バランス検査で評価できない項目も含まれると考えられ、今後は最小ステップ加速値以外に対しても詳細な解析を検討する必要があると考えられる。

さらに、高齢者のバランス機能を評価するうえで、より小さな外乱により、Pitch 方向の角速度の大きさを把握することが必要となる。今後の課題である。

2. バランス機能維持のための訓練システムの開発

振動パラメータに刺激部位、強度、周波数を変更し足圧中心軌跡を用いて姿勢調整を観察した結果、刺激部位についての知見は先行研究の結果と一致した。実験の結果、足底、足首、大腿、腰部、背中、首、肩を振動刺激した場合、従来の報告と同様な重心移動の傾向が確認された。一方、今回新たに振動刺激部位として提案した足首の左右 (踝付近)、腰 (骨盤付近) への振動刺激では、両者とも刺激箇所と反対方向への重心移動が確認された。したがって、適切な刺激部位を選択し振動刺激することは、姿勢調整に寄与すると考える。

しかし、同じ振動刺激装置を用いても姿勢調整に与える影響は大きく異なり、今回の実験では、振動

刺激前後で有意な差がみられた刺激部位は、足底右3点、足首全方向、腰のみであった。

3. 骨折予防のための転倒衝撃吸収システムの開発

今回、試作器で転倒前にエアバッグが開放することが確認された。今後、エアバッグの形状や適切な折り畳み方法を検討する必要があると考えられる。また今後、装着型エアバッグシステムを広く普及させるにはランニングコストを低くする必要があると考えられる。日常の使用において発生する維持費用は電池の交換のみである。しかし、エアバッグが動作した後のインフレーターとガスポンプの交換コストがインフレーターに火薬を使用しているため、約3万円となる。ポンプの先端に穴を開けるために火薬は不可欠であるが、火薬を使用する場合は筐体の強度を上げる必要があり、また再利用ができないため、コストが高くなる。今後、火薬以外の開放方法を検討し、インフレーターを再使用可能とすることでランニングコストを下げる必要がある。

4. 転倒リスクのない住宅環境の改善の提言

これまで環境移行によるストレスの軽減という視点から、高齢者居住施設を「住宅的」なデザインで創り、しつらえることの意義が指摘されてきた。また、使い続けてきた思い出の家具や椅子の持込みが奨励されたりもしている。しかし、日本人には現実にはそうした空間を演出する自身の特定の思い出の品を持ち込む習慣はない。もっと一般的に過去を見つける思い出の風景—これはいわば懐かしいシーンとでも言うべきである—を施設で設計の中に取り入れることの必要性がある。

今回の研究では、さらにそれらが認知症の周辺症状として挙げられる問題行動の軽減、あるいは改善に寄与できる可能性を見出した。

またユニット外との関係を領域の階層性からだけ認めるのではなく、「見る」ことによる認識が、生活の豊かさをもたらす、ひいては豊かな共用スペース (共同生活室) が生活場所の選択を増やし安全性の確保へとつながる可能性も示唆できた。

安全性を確保するための施設デザインのプロセスとしては、以下の項目が考えられる。

- ・個別サービス
- ・プライバシーの確保
- ・他者やスタッフとのコミュニケーション
- ・日常生活への関与
- ・自律的生活の保証
- ・環境移行ストレスの軽減
- ・ホームライク・デザイン

つまり、しばしば指摘される空間の階層性の演出もホームライク・デザインへとつながるものであり、それらが回想療法的効果をもたらしていることを目指していることが分かる。外部の刺激を得ることも同様であろう。

こうした環境設計が、転倒・転落事故防止に直結するというわけではないであろう。しかし、高齢者の生活・居住環境の計画に際して、単に快適性を追求するばかりでなく、安心・安全な環境を提供する上でも大きな効果があることを示した。高齢者施設的设计計画に当たって重要な示唆を示していよう。

5. 転倒のリスクアセスメントの作成

提案した加速度と角速度を用いる動作フェーズ検出手法とセラピストの評価の間に高い相関関係がみられ、本手法が臨床ならびに他の定量的評価において有用であることが示唆された。さらに、腰部加速度信号をもとに動作フェーズごとに定量的評価を行った結果、歩行レベルの異なる片麻痺者の自立度判定のモニタリングが可能であることが明らかとなった。また、同時に加速度を1サイクルごとに評価することで歩行の自立度の質的な評価も行えると示唆された。

転倒のリスクアセスメントおよびその対策においては、これまで、歩行時のリスク軽減を主たる方法として対応されていた。しかし、これまで30年の研究から、歩行場面や環境場面によるリスクの抽出に加えて、歩行能力の客観的な評価法を確立し、総合的な観点からリスクアセスメントすることが重要であることが示唆され、今回、これに対応するアセスメントシート原案を作成できた。

今後は、計測記録、解析ソフトの開発等臨床場面

で効率的に使用されるための検討の必要性が示唆された。

E. 結論

転倒を予防、予測ならびに転倒時の疾病の防止や怪我をしない環境について検討した。まず、水平外乱刺激発生装置を開発し、これを用いて外乱刺激時のpitch方向の身体動揺から3つの姿勢制御戦略(足関節戦略・股関節戦略・ステップング戦略)の特徴を確認できることを示した。高齢者のバランス機能をpitch方向の角速度の大きさでどのように推定するかが今後の課題である。また、足裏刺激装置については姿勢調整に影響を与える振動パラメータとして刺激部位と周波数が有効であることを明らかにした。さらに、バランス機能を改善するためには足底以外に、足首、腰の刺激が有効であったことから、バランス機能が低下した高齢者により効果的な刺激を与えるためにウェアラブル刺激装置の開発が有効であることが示唆された。

転倒検出アルゴリズムの誤動作防止のため、加速度、角速度信号の計測が有効であり、精度の高い転倒検出が可能になったことにより転倒予防のためのヒトエアバッグのプロトタイプが完成した。より普及させるためにエアバックのエア開放部分のさらなる開発が必要であることが示された。

一方、施設の改善を回想法をもとに行なった結果、「懐かしい事物」のインストールや、「回想ストリート」の制作、およびその環境の中での回想法(環境回想法)は多くの認知症の方に有効であると考えられた。

最後に、加速度測定を用いた動作評価は転倒のリスクを定量的に評価することが可能であることが示唆され、転倒リスクアセスメントに有用な情報を提供できることが示唆された。これまでの定性的な情報に定量的な情報を加えることがアセスメントの有用性をより高めることができると考えられる。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

1. 論文発表

- Nakayama S, A Discussion on the Direction for the Study of Architectural Planning and Design – Towards Establishing the Healing Power of the Environment on a Scientific Basis, Symposium on Healthcare Architecture in ASIA 2007, 37-42, 2007.
- Higashi Y, Yamakoshi K, Fujimoto T, Sekine M, Tamura T, Quantitative evaluation of movement using the timed up-and-go test, Engineering in Medicine and Biology Magazine. 27(4): 38-46, 2008.
- 堀田庸介, 関根正樹, 田村俊世, 桑江豊, 東祐二, 藤元登四郎, 大島秀武, 志賀利一, 高齢者に対応した歩数カウントアルゴリズムの開発, 生体医工学学会誌, 46(2):283-288, 2008.
- 吉村拓巳, 山本弘毅, 関根正樹, 田村俊世, 転倒エアバッグのための転倒検出方法の検討, ライフサポート学会誌, 20(3):11-16, 2008.
- Rajendra A U, Goh S C, Iijima K, Sekine M, Tamura T. Analysis of body responses to an accelerating platform by the largest-Lyapunov-exponent method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 223(1): 111-120, 2009.
- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世: 漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答. 生体医工学. 47(1): 70-76, 2009.

2. 学会発表

- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世. 水平外乱刺激時における動的バランス評価の検討. 生体医工学シンポジウム 2008, CD-ROM, 2008.

- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世. 高齢期疑似体験システム装着時における水平外乱刺激に対する姿勢応答. 第2回横幹連合総合シンポジウム, 53-54, 2008.
- Tamura T, Yoshimura T, Sekine M, A Study to Demonstrate the Used of an Air Bag Device to Prevent Fall-related Injuries. The 8th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering (BIBE 2008), CD-ROM (BE-3.1.6), 2008.
- 吉村拓巳, 山本弘毅, 関根正樹, 田村俊世, 加速度と角速度を用いた転倒検出の検討, 第47回日本生体医工学学会大会, 233, 2008.
- 吉村拓巳, 関根正樹, 田村俊世, 内田光也, 田中理. 転倒防護エアバッグの開発. 生体・生理工学シンポジウム 2008, 151-152, 2008.
- 吉村拓巳, 関根正樹, 内田光也, 田中理. 転倒防護エアバッグのための転倒検出方法の改善. 生体医工学シンポジウム 2008, CD-ROM(1-08-10), 2008.
- 東祐二, 桑江豊, 緒方匡, 藤元登四郎, 関根正樹, 田村俊世, 山越憲一, 第47回生体医工学学会大会, 196, 2008.
- 永井麻衣, 清藤早弥香, 緒方匡, 老川大輔, 東祐二, 藤元登四郎, 関根正樹, 田村俊世, 角速度センサを用いた脳卒中片麻痺者における畳からの立ち上がり動作の定量評価の試み-第2報-, 第47回生体医工学学会大会, 676-677, 2008.
- 小林淳史, 関根正樹, 田村俊世, 三好寿顕, 依田成司, 花田恵太郎. 取り付け位置に依存しない歩数カウント方法の検討. 第6回生活支援工学系学会連合大会・日本機械学会福祉工学シンポジウム 2008, 128, 2008.

H. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

- 内田光也、田中理、深谷潔、吉村拓巳、田村俊世、高橋幸利，人体用エアバッグ装置，特願2009-27147

2. 実用新案登録

- なし

3. その他

- なし

II. 分担研究報告

動的バランスの簡便な評価システムの開発

分担研究者 田村俊世 千葉大学大学院工学研究科・教授

研究要旨 高齢者のバランス機能の低下は転倒の大きな要因となり、転倒は寝たきりや転倒恐怖による活動の低下などをもたらす。転倒は躓きや滑りなどの突発的な外力が加えられた際に生じると考えられ、外乱に対する身体の動的なバランスを評価することは転倒を予防する上で重要である。そこで本研究では、角速度センサを用いた簡便なバランス機能の評価方法を提案し、健康成人10名を対象として水平外乱刺激時のpitch方向の身体動揺を計測した。その結果、外乱によって引き起こされる3つの姿勢制御戦略（足関節戦略、股関節戦略、ステッピング戦略）の特徴がpitch方向の角速度で確認され、外乱刺激に対する角速度の変化量で動的なバランスを簡便に評価できる可能性が示唆された。

A. 研究目的

転倒は生理的因子と環境因子に分類され、生理的因子は加齢により低下するバランス能力や筋力など、環境因子は照明や床の状況、履物などが挙げられる。高齢者の場合、転倒の半数以上が躓きや滑りといった外乱によって発生し、骨折や寝たきりなど生活の質（Quality of Life: QOL）の低下に多大な影響を及ぼす。そのため、突発的な外乱に対する姿勢応答及びバランス能力の評価は、転倒を予防する上で有効であると考えられる。

立位において外乱が与えられた場合、ヒトは外乱の大きさにより組織化された姿勢制御戦略を用いてバランスを立て直そうとする。この姿勢制御戦略には一般に足関節戦略（ankle strategy）、股関節戦略（hip strategy）、ステッピング戦略（stepping strategy）の3種類あると考えられており、外乱の大きさに伴って移行していく[1-3]。

昨年度の研究において、健康若年者10名に対して、静止立位状態で床面を水平移動する外乱刺激を小さなものからステッピング戦略を用いる程度の大きなものまで20種類ランダムに試行した結果、3

種の姿勢制御戦略をPitch方向の角速度（前後方向の傾き）にて確認できることを示した[4]。すなわち、小型の角速度センサで従来の光学系による3次元計測装置と同様に身体動揺を計測できることを示した。さらに、姿勢制御戦略と外乱刺激の強度について検討を加えた。この際、外乱の大きさに伴って足関節戦略、股関節戦略、ステッピング戦略と段階的に移行していくと予想したが、実験結果では予想と合致しない見解が得られた。この理由として、外乱刺激の強度を試行毎にランダムに与えていたため、1試行前の反応が次の試行の反応に影響を及ぼしたものと考えられた。

そこで本年度は、外乱を漸増させて与えた際の戦略の移行を捉え、この移行過程を検討するとともに、これらとステッピング戦略との関係について検討した。

B. 研究方法

1. 水平外乱刺激発生装置

本研究では、外乱の定義を「立位姿勢における支持基底面を水平後方向に動かすこと」とした。また、

躓きや滑りといった外乱は突発的で瞬間的であるため、外乱刺激の強度は床面の加速度の大きさとし、初年度に床面を水平後方向に移動させる水平外乱刺激発生装置を開発した(図1)。与える外乱強度以外の床面駆動パラメータである加速時間、等速運動時間、減速値は、それぞれ100ms、1000ms、1.0m/s²と設定した。

2. 実験方法

動的なバランスの計測は、図2に示すように被験者の足関節・大腿・腰背部に角速度センサ(Gyrocube, O-NAVI, USA)を装着し、後方への外乱刺激に対する各部位のPitch方向(前後方向の傾き)の身体動揺を計測した。また、床面の加速度を計測するために床面上に加速度センサ(Gyrocube, O-NAVI, USA)を配置した。

全ての角速度センサ及び加速度センサの出力はサンプリング周波数1kHzでA/D変換を行い記録した。

被験者は健康若年者の男性12名、女性4名の計16名(年齢22.9±2.1歳、身長168.1±7.5cm、体重59.0±8.1kg)を対象とした。

静的バランス評価との比較を行うため、動的バランスの評価実験を行う前に重心動揺計(グラフィコーダG-620, アニマ)を用いて重心動揺検査を行った。サンプリング周波数を20Hz、計測時間を30秒とし、開眼及び閉眼両足立ちの静止立位での計測をそれぞれ1回ずつ行なった。

次に被験者は、開眼で約3m先にある目の高さに設定した指標を注視し胸の前で腕組みした状態で、床面上に両足の間隔を約15cm空けて立位姿勢を保持した。なお、実験の試行に際し、自然な直立姿勢を指示し、外乱に耐えられない場合はステップング動作をすることを許可した。外乱刺激は0.6m/s²から4.4m/s²まで0.2m/s²毎の20種類の加速値とし、漸増させて試行を行った。なお、被験者が水平外乱刺激発生装置の動作を体感し安全性を確認するために、最小値である0.6m/s²の加速値の試行を

与える前に0.2、0.4 m/s²の加速値での予備試行を行った。

(倫理面への配慮)

実験に際し、千葉大学工学部倫理委員会の承認を得た後、被験者には実験内容を十分説明し、書面にて同意を得て行った。また実験で得られた被験者の情報は個人が特定されないよう配慮をし、個人名で管理をしないこととした。

3. 解析方法

解析にはカットオフ周波数30Hzのバターワース型2次ローパスフィルタで平滑化した各部位の角速度及び床面の加速度を用いた。昨年度の成果を踏まえて、各姿勢制御戦略は加速初期の範囲で各部位の角速度ピーク値を検出し、各部位のピーク値がほぼ同値であればその付近を足関節戦略、腰背部のピーク値のみの急激な増加が見られればその付近を股関節戦略とした。また、股関節戦略・ステップング戦略間は、角速度波形を用いて、足関節・大腿の角速度が急激に増減していることで戦略を分類した。

重心動揺検査結果からは、単位時間軌跡長(Length/Time)、単位面積軌跡長(Length/Area)、外周面積(AREA)及び姿勢制御の視覚による寄与を示す外周面積のロンベルグ率(Romberg)を解析値として用いた。動的バランスとの比較を行うため、今回はステップング戦略で対応する最小の外乱の大きさ(最小ステップ加速値: Step-Acc)を動的バランスの評価指標とした。

C. 研究結果

外乱刺激に対する角速度波形の典型例を図3に示す。図中(a), (b), (c)はそれぞれ足関節戦略、股関節戦略、ステップング戦略で対応した際の角速度波形と床面の加速度、移動距離を表示している。それぞれの外乱刺激の大きさ(加速値)は、1.71m/s²、3.33m/s²、3.75m/s²であった。また、図中の矢印は今回の解析で用いた各部位のピーク値を示してい

る。図4には20種類の外乱刺激の強度(床面の加速値)に対する外乱刺激開始直後の角速度のピーク値の典型例を示している。図中の□, △, ○は、それぞれ足関節、大腿、腰背部の角速度ピーク値を表し、各戦略で対応している箇所を領域で区切った。なお、塗りつぶした各記号はステップング戦略をとっていることを表す。姿勢制御戦略の角速度における特徴により、戦略を分類し、その領域の割合により3種類の各戦略への移行過程が確認された。図4(a)は大きい外乱に対しても足関節戦略を用いて対応し、股関節戦略をほとんど用いないままステップング戦略に移行している群(足関節群)、すなわち足関節戦略の領域が股関節戦略に比べ大きい群である。図4(b)は両方の領域がほぼ等しく、足関節戦略・股関節戦略で段階的に対応していき、ステップング戦略へ移行している群(中間群)である。図4(c)は足関節戦略で対応する外乱はほとんどなく、低度の外乱から股関節戦略を用いて対応し、ステップング戦略へ移行しているというように股関節戦略の領域が足関節戦略に比べて大きい群(股関節群)となっている。また、全ての群において、姿勢制御戦略が外乱刺激の大きさに伴って足関節戦略、股関節戦略、ステップング戦略と段階的に移行していることが確認された。

各群の内訳を身体的特徴、重心動揺検査結果及びStep-Accとともに表1に示す。これを見ると、足関節群が一番多く9人、中間群、股関節群がそれぞれ4人、3人という結果となった。これらの群内での身体的特徴・重心動揺検査結果とStep-Accとをピアソンの相関係数を用いて解析したところ、股関節群の体重においてのみ有意に相関があった。しかし、これら以外の身体的特徴・重心動揺検査結果とStep-Accに有意な相関関係は見られなかった。すなわち、姿勢制御戦略の移行過程の違いと静的バランスとの関係やStep-Accとの関係は見出せなかった。股関節群については女性のみであり、他の群より小柄な傾向を示した。また、被験者全体での身体的特徴及び重心動揺検査結果とStep-Accとの相関

係数を表2に示す。これを見ると、どのパラメータにおいても本研究で定義した動的バランス評価指標Step-Accとの間に相関が見られなかった。

D. 考察

本年度は、外乱刺激を漸増させて与えた際の足関節戦略、股関節戦略、ステップング戦略の段階的な移行を捉え、その移行過程を検討した。その結果、外乱刺激の漸増とともにその大きさに応じて身体動揺も順に大きくなり、姿勢制御戦略が段階的に移行していることが確認された。また、再現性の検討のため、8名の被験者を対象に再度実験を行い、Step-Accに対して対応のあるt検定を行ったところ、1回目と2回目のStep-Accに有意な差はみられなかった。したがって、今回の実験系は再現性は高いと言える。

昨年度の研究で行った外乱刺激をランダムで与えた実験系と本実験系を比較した場合、外乱刺激の「予測」はどちらの実験系にも起こると考える。さらに外乱刺激の与え方による「予測」の違いがStep-Accに影響する可能性が示唆されたが、前実験系と本実験系を両方行った被験者6名のStep-Accに関して対応のあるt検定を行ったところ有意な差はみられなかった。したがって、両実験においても同程度のタスクと考えられ、Step-Accに影響を及ぼさないと考えられた。しかし、ランダムの実験系では1つ前の試行あるいは徐々に蓄積されていくランダムの順序が次の試行を予測する材料となり、そこで予測した外乱刺激と実際に与えられた外乱刺激の不一致が起り、個々の外乱刺激によって姿勢応答にばらつきが生じてしまう被験者もいた。一方、漸増で与える実験系では次の外乱刺激が予測できるため、予測の不一致が起こる可能性は低く、ばらつきの少ない段階的な姿勢制御戦略を捉えることが可能であったと言える。このことから段階的な姿勢応答を捉えるためには、外乱を漸増させて与える実験系がより適していることが示唆された。

しかし、これまでの多くの研究において、ある程度大きい外乱刺激に対して股関節戦略が優位に働くとの報告があり[1-3]、本研究においても同様に、中間群が多数となることを予想したが、今回の実験では足関節戦略を優位に働かせている足関節群が多かった。この足関節群では、低度の外乱に下肢と体幹が一体となった足関節戦略で対応する。これは、中間群と同様である。しかし、足関節群の特徴であるステップング戦略を用いる直前まで足関節戦略で対応することは、低度の外乱から足関節戦略で対応してきた影響であると考えられる。つまり、外乱が増大しても足関節に集中した姿勢応答のままバランスを維持したのではないかと考えられる。高齢者においては成人と比較し、足関節戦略より股関節戦略を用いる傾向が認められるという報告がある[2]。今回は若年者を対象としており、高齢者に比べ、身体機能やバランス機能は高いといえる。筋力等を考慮すると足関節戦略から股関節戦略へ移行する閾値の幅が広いために、高い外乱刺激まで足関節戦略で対応していたと推測される。一方、股関節群においては全て女性被験者であった。女性は男性と比較して、下肢の筋肉量が少なくバランス機能が劣るとい報告がある[5]。そのため、足関節戦略ではバランス維持が困難であると判断し、より早く安定させるために、即座に股関節戦略にて対応したと示唆された。

また、Runge らや Horak らは足関節戦略と股関節戦略の混合型の戦略があることを筋電図等で示している。今回の外乱刺激に対する姿勢応答においても混合型と考えられる戦略が見られた[3, 6]。図5のように足関節戦略から股関節戦略の移行付近の外乱刺激において、角速度のピーク値は各部位ともほぼ同じ値を示すが、ピーク後、足関節・大腿の角速度は減少していくのに対し、腰背部の角速度はその値を一定に保つような動きが見られる。すなわち、身体全体を傾けた後に腰背部の傾きのみが増加していることを示しており、1試行の中で外乱刺激に対して足関節戦略で対応した後に股関節戦略で対

応するといった混合型の戦略でバランスを調整していることが示唆された。

今回の実験系において姿勢制御戦略の移行に関して3群に分けられたが、身体的特徴としては股関節群が全て女性で体重が軽量であった以外の群間の身体的特徴の違いは見られなかった。また、群間の重心動揺検査による違いはどの項目においても見られなかった。

今回の実験では最小ステップ加速値 Step-Acc を動的バランスの評価指標としたが、これと身体的特徴・静的バランスとの相関は見られなかった。これまで静的バランスと動的バランスとの相関は低いといった研究結果もある[7]。静的バランスと比べ、今回のような外乱刺激を与える実験では外乱刺激の大きさやそれに対する被験者自身の姿勢の認識、そこからの立ち直り動作等、静的バランス検査では評価できない項目も含まれる。本実験においても、重心動揺においてほとんど変化が見られなかったが、外乱刺激に対する姿勢応答を見ることによって移行過程の違いで3群に分類でき、それぞれ特徴を有していたため、静的バランスとは違ったバランス能力の違いが見られたのではないかと考える。この事からも、転倒を主に考える際の外乱に対するバランス機能において、静的バランスではなく、外乱刺激を与えるような実験系において評価していくことは、非常に有意義であることが考えられる。しかし、様々な要因が複雑に反応した姿勢応答となるため、これらをより詳細に解析する必要がある。

E. 結論

本年度は、後方の外乱刺激を漸増させて与えた際の姿勢応答を角速度センサを用いて評価した。その結果、ランダムに外乱刺激を与える昨年度の研究とは異なり、全被験者において姿勢制御戦略が外乱刺激の大きさに応じて足関節戦略、股関節戦略、ステップング戦略と段階的に移行していることが確認された。さらに、今回の若年者を対象とした実験では被験者は外乱刺激の大きさに伴う戦略の移行

過程により3群に分類され,その中で足関節を優位に働かせる群が最も多かった.また,足関節戦略から股関節戦略への移行付近において,足関節戦略に股関節戦略が付随した混合型の戦略を用いて対応していることを本研究においても示せた.

一方,動的バランス評価の指標とした最小ステップ加速値(Step-Acc)と戦略の移行過程及び静的バランス検査との関係は見られなかった.しかし,今回のような外乱刺激を与える実験では静的バランス検査で評価できない項目も含まれると考えられ,今後は最小ステップ加速値以外に対しても詳細な解析を検討する必要があると考えられる.

<参考文献>

[1] Nashner LM, McCollum G: The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*. 8: 135-172, 1985.

[2] Horak FB, Shupert CL, Mirka A: Components of postural dyscontrol in the elderly: a review. *Neurobiology of Aging*. 10(6): 727-745, 1989.

[3] Runge CF, Shupert CL, Horak FB, Zajac FE: Ankle and hip postural strategies defined by joint torques. *Gait and Posture*. 10(2): 161-170, 1999.

[4] 飯島賢一, 柳田純一, 関根正樹, 田村俊世: 角速度を用いた水平外乱刺激時の姿勢応答の計測. *生体医工学*. 45(4): 285-291, 2007.

[5] Overstall PW, Exton-Smith AN, Imms FJ, Johnson AL: Falls in the elderly related to postural imbalance. *British Medical Journal*. 1(6056): 261-264, 1977

[6] Horak FB, Nashner LM: Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations: *Journal of Neurophysiology*. 55(6): 1369-1381, 1986.

[7] 島田裕之, 内山靖, 原田和宏, 大淵修一, 鈴木隆雄: 姿勢バランス機能の因子構造: 臨床的パラ

メトリクス機能検査による検討. *理学療法学*. 33(5):283-288, 2006.

[8] 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世: 漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答. *生体医工学*. 47(1): 70-76, 2009.

F. 研究発表

1. 論文発表

- Rajendra A U, Goh S C, Iijima K, Sekine M, Tamura T. Analysis of body responses to an accelerating platform by the largest-Lyapunov-exponent method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 223(1): 111-120, 2009.
- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世: 漸増する水平外乱刺激に対する姿勢応答. *生体医工学*. 47(1): 70-76, 2009.

2. 学会発表

- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世. 水平外乱刺激時における動的バランス評価の検討. *生体医工学シンポジウム2008, CD-ROM, 2008.*
- 飯島賢一, 関根正樹, 田村俊世. 高齢期疑似体験システム装着時における水平外乱刺激に対する姿勢応答. *第2回横幹連合総合シンポジウム, 53-54, 2008.*

G. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

- なし

2. 実用新案登録

- なし

3. その他

- なし

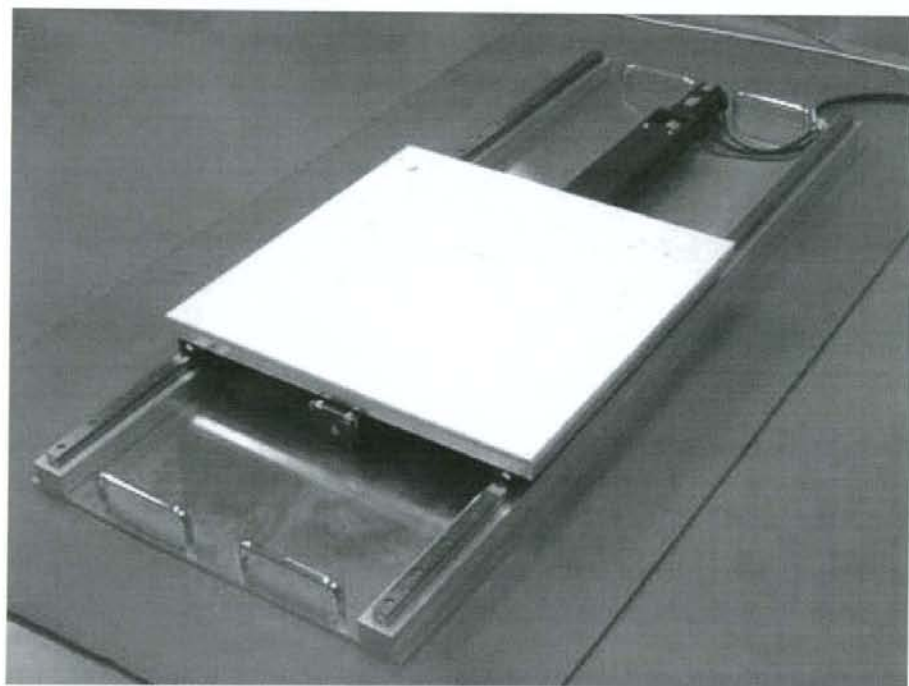


図 1 水平外乱刺激発生装置の外観