The 33rd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2019

マハラノビス距離と因子分析を用いた転倒リスクの評価

Fall Risk Evaluation Using Mahalanobis Distance and Factor Analysis

内藤 孝雄[*1*2] 小部 正人[*1] 救仁郷 誠[*1] 山末 耕太郎[*2] 杤久保 修[*2]
Takao Naito Masato Kobe Makoto Kunigoh Kotaro Yamasue Osamu Tochikubo

石川 義弘[*2] 武田 裕[*3]
Yoshihiro Ishikawa Hiroshi Takeda

[*1] 富士ゼロックス株式会社 [*2] 横浜市立大学 大学院 医学研究科
Fuji Xerox Co., Ltd. Graduate School of Medicine, Yokohama City University

[*3] 大阪大学 大学院 医学研究科
Graduate School of Medicine, Osaka University

The purpose of this paper is to estimate people with a high risk of falls and to contribute to fall prevention by clarifying their potential factors. As a result, 6 elderly people with high risk of falling among 98 female participates were extracted using Mahalanobis distance, and 4 out of the 6 elderly people had experienced falls or nearly falls. Furthermore, we extracted 5 factors related to the balance of lower limb muscle strength, the neuromodulation function and so on using factor analysis.

1. はじめに

高齢者が ADL(Activities of Daily Living:日常生活の活動)を維持する生活は、健康寿命延伸の観点から個人にとっても社会にとっても大切である. 健康寿命を縮めてしまう要因の 1 つに、転倒骨折による寝たきりがあり、厚生労働省の調査によると要介護の原因は、認知症、脳血管疾患に次いで、第 3 位に骨折・転倒の疾患が占める[厚労省 17]. また転倒による事故は、高齢者の 5 番目(心血管系、癌、脳卒中、肺による原因に次ぐ)に多い死亡原因になっている[Rubenstein 02].

転倒の原因は多種多様で、総括して内的要因と外的要因に分けられる. 内的要因は、筋力低下、不安定なバランスなどの運動要因、視覚障害などの感覚要因、意識障害や注意力障害など脳機能要因などである. 外的要因は、障害物の存在や薬剤要因などが挙げられる[Pfortmueller 14] [日本医師会 07] .

従来、転倒の一要因であるバランス機能の評価方法は、動的バランスと静的バランスの概念に分類される. 前者の評価方法には、Timed up-and-go テスト、Get up-and-go テストなどが用いられる. これによって、歩行など運動機能の評価を行う. 後者の評価方法は、両脚を揃えて閉眼と開眼で動揺を比較する Romberg テスト[Agrawal 11]や片脚立ちテストなどがあり、開眼と閉眼で立位状態を保持時間で評価するもので、どの様な動揺で保持するか状態まで評価することは少ない. 一方、問診票などの医療データを活用して転倒リスクを評価する方法も報告されている[森田 10]. この中では病院内の入院患者に対して、転倒転落アセスメントスコアシートによる問診によって、危険度をスコアから危険度Ⅰ~危険度Ⅲの 3 段階で分類している.

今回、高齢者に身体的負荷が少ない計測として、静的バランスでの動揺状態と、握力計測での筋力評価を行った. 日常の行動は問診票から評価し、両者のデータを基に転倒リスクの評価を行った. また性別によるバラツキをなくすため女性に限定して、マハラノビス距離で転倒リスクの高い健診者を抽出し、さらに潜在的バランスの要因を分析するため、計測データと問診票から抽出した変数の影響を因子分析で検討した.

連絡先:内藤孝雄, 富士ゼロックス(株) スマートワークイノベーション事業本部 ヘルスケア事業部, 〒220-8668 横浜市西区みなとみらい 6-1 , takao.naito@fujixerox.co.jp

2. 方法

転倒リスクを抽出するために、身体の計測情報と日常の行動評価を利用した. 計測情報は、開眼片脚立ちと閉眼両脚立ちをそれぞれ 30 秒間行い、その時の動揺の計測と最も簡単に筋力を測定できる握力検査を行った. 行動情報は、問診票から年齢・BMI(Body Mass Index)・運動習慣・昨日の睡眠状況・疼痛などの項目を収集した. これら情報より、基準データに対する異常値を検知する手法としてマハラノビス距離を適用した. また多変量分析の一種である因子分析を適用して、計測情報と行動情報から潜在的な転倒リスクと共通因子の関係を検討した.

2.1 マハラノビス距離による転倒スコア

マハラノビス距離 D は多変量空間における距離尺度で、品質工学で異常値を検出する手法である MTS(Mahalanobis Taguchi System)法の中で適用されている[救仁郷 01]. この MTS 法にはデータが正規分布であることなど制約条件があり、健康診断の項目の数値データを総合的に判断する上で、極めてよく一致することが報告されている[中島 99]. 今回、バランス計測データと問診データを元に、この手法を用いてバランス機能が低下することによる転倒リスクの高い健診者を評価した.

計算方法は、項目数 k 個として、ある対象 Z の項目 i の値の任意のデータ x_{iz} に対して、項目 i の平均 m_i、標準偏差 σ_i とすると、基準化データ y_i は式 1 で表すことができる.

$$y_i = \frac{x_{iz} - m_i}{\sigma_i} \tag{1}$$

この項目数 k 個の基準化データ y_i のマハラノビス距離 D を行列表記すると式 2 となる. $\boldsymbol{R}^{-1}$ は、項目間の相関係数行列 $\boldsymbol{R}$ の逆行列である.

$$D^2 = \frac{1}{k}\,(y_1, y_2, \ldots, y_k)\,\boldsymbol{R}^{-1}\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} \tag{2}$$

健診者の項目ごとに蓄積されたマハラノビス距離 D を転倒スコアとして異常値を検出することで転倒リスク判定する. このマハラノビス距離 D 算出時の基準空間とした相関係数行列は、「最近転倒した・しそうになった」で「はい」と回答した人および開眼片脚立ち 30 秒ができなかった人を除いた「正常なバランス機能を有す」と思われる人のデータを適用した.

2.2 因子分析の適用

マハラノビス距離 D はスカラーとして異常値検出を目的としたが、計測情報と行動情報の複数の因子から、潜在変数を抽出するため、因子分析を適用した. つまり、計測データと問診票からその背後にある転倒リスクなど直接計測できない潜在因子を推定する. 因子分析の基本モデルは、潜在因子 F_n、観測変数 X_i、因子負荷量(factor loading) a_{in}、それ以外の独立因子(unique factor) e_i とすると式 3 で表される. 潜在因子 F_n は、共通因子(common factor)または単に因子(factor)と呼ぶ.

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \cdots + a_{in}F_n + e_i \qquad (3)$$

因子分析は最初に初期解の計算で、因子抽出と因子数の決定を行う. 因子抽出方法は、第 1 因子から順に因子寄与が最大になる様に因子を抽出する主因子法、尤度という指標を抽出しこれを最大にする最尤法、元データと因子分析のモデルから算出した共分散行列の間の差を最小にする最小二乗法などがある. 因子分析では、対象データにおいて固有値と固有ベクトルを求め、その分散が最大になるような方向を求めることになる.

次に因子 F_n 間は無相関の場合は直交回転を、そうでない場合は斜交回転を行う. 最終的に因子の解釈を人手で行い、因子名を決定する. そして因子得点、因子寄与利率で評価した.

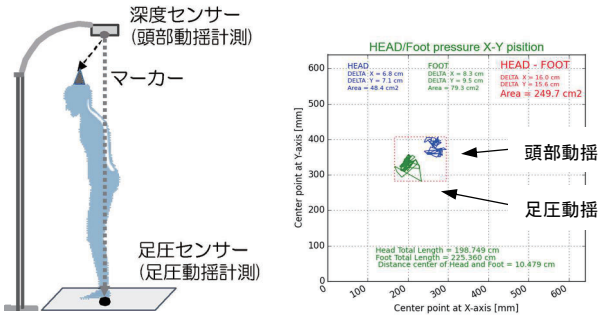
3. 実験

3.1 評価システムの概要

高齢者の身体的負荷が少なく、簡易に計測できる静的バランスを、時間をかけずに計測可能にする装置を提案する. 頭部と体幹の重心がわかる方法として、頭部上部に色画像と深度画像の撮影が可能な赤外線方式の距離センサーで、頭部につけた三角柱マーカーの動揺を検出する. 下部は、足圧シートセンサーで足圧動揺をそれぞれ算出する. 足圧シート上の立つ位置は固定し、Romberg テストや片足立ちテストなどで被験者に負荷を与え、安静時の立位状態で動揺と姿勢を計測する.

頭部中心を算出する手段は、上部に設置した深度センサー(Intel RealSense)を適用、下部には足圧センサー(住友理工製 SR ソフトビジョン)で身体全体の重心の移動軌道をモニタリングし、双方を比較することで体幹のバランスを維持できているかを可視化する. 安静立位を 30 秒間行い、頭部と身体全体の立位バランスを検証する(図 1(a)).

上下 2 つのセンサーによって頭部と足圧中心双方の動揺軌道をモニタリングし、どの程度立位バランスを維持できているか可視化する. 基本的立位姿勢の理想的アライメントは、「頭部、体幹、四肢の各体節の解剖学的指標が一直線に整列しているか否かによって判定」で定義されている[中村 03]. 従って頭部動揺中心を求めその中心を垂直に降ろした位置が身体全体の中心とどの程度離れているか求めるため、身体が前後に傾いていたり、骨格が左右にずれたりすると一致しない. この状態で求めた頭部動揺中心 COH の動揺平均座標値を COH 中心点 COHc、足圧中心 COF の動揺平均座標値を COF 中心点 COFc として、COHc – COFc 間の距離から立位姿勢判定を行う. 図 1(b)に開眼の片脚立ち 30 秒間の頭部と足圧の動揺結果を示す. この中で頭部と足圧それぞれの総動揺距離、動揺した領域の矩形面積および姿勢評価のため両動揺中心間の距離を算出する. 解析対象は、計測期間の前後 5 秒間を除いた 20 秒間とした.



a. 装置の概要　　b. 出力結果

図 1. 立位バランス計測の概要

また従来の研究より、下肢筋力の低下が転倒要因の1つとして報告されている. この下肢筋力の計測の代替として、最も筋力を簡単に計測できる握力検査を実施した.

健診者の行動情報として、過去の転倒状況、運動習慣、疼痛、計測当日の体調(昨日の睡眠時間、現時点の疲労度、昨日の飲酒量)を問診票で記入してもらった. この問診票への記入は間隔尺度で、例えば「最近転倒した・しそうになった」は 2 件法(「はい」・「いいえ」)、「当日の疲労は」は 3 件法(「いいえ」・「少し」・「はい」)など、n 件法で採取した.

これらバランス計測と問診票から抽出したデータを元に、マハラノビス距離で転倒リスクの高い健診者を抽出した. さらに因子分析を主因子法・最尤法・最小二乗法を適用し、斜交回転での因子の評価を行った. 分析には、R ver3.4.1 を使用した.

3.2 対象者

対象者は、自治体や医療機関が主催した健康測定会に参加した 65 歳以上の高齢者および情報機器メーカーA 社の就労者(20 歳代～60 歳代)とした. 補助なく歩行ができ基礎体力があり身体に麻痺のない人で、計測にはインフォームドコンセプトを得て実施した.

4. 結果

4.1 参加者の基本データ

対象者 164 名が、計測に参加した. この中から性別の影響を取り除くため、女性のみのデータを採用し、116 名を抽出した. さらに欠損値のある者を除き、最終的に女性 98 名を有効とした. 対象者の各項目の基本データ(平均と標準偏差)を表 1 に示す. 表1の最終項「片脚立ちテスト」のフラグは、片脚立ちテストが最後までできた人は“0”、途中で両脚を付いた人は”1”、このテストが出来なかった人は”2”、と重み付けを行った.

表 1 . 評価項目の基本データ(女性のみ)

項目	平均	標準偏差
年齢	68.8	12.5
BMI	21.3	2.6
本日の疲労度0疲れてない2疲れている	0.5	0.6
最近転びそうになった1はい2いいえ	1.8	0.4
運動習慣について１毎日５全く	2.1	1.3
１日の平均歩数1-10K歩以上6-２K以下	3.8	1.4
昨夜の睡眠1よく眠れた4全く	1.8	0.8
昨夜の飲酒1飲んでない4二日酔	1.2	0.4
疼痛 1腰に痛みがありますか0無1有	0.3	0.5
疼痛2膝に痛みがありますか0無1有	0.4	0.5
握力　左右高い方　[Kg]	24.3	5.5
閉眼両脚足圧中心移動　[cm]	65.4	37.1
閉眼両脚足圧中心面積　[cm^2]	10.2	7.1
開眼片脚足圧中心移動　[cm]	137.6	89.1
開眼片脚足圧中心面積　[cm^2]	117.8	231.6
片脚立ち０保持1途中NG2できない	0.1	0.4

4.2 マハラノビス距離の評価結果

マハラノビス距離の算出に適用した基準空間は、動揺の移動距離と移動面積から算出したバランス計測の総合判定が 80 点以上で、最近転んだことがない健康な検診者より作成した.

マハラノビス距離は、各評価項目のバラツキが累積した値になり、この値を転倒スコアとした. このマハラノビス距離である転倒スコアが 200 以上を転倒リスクが高いと定義すると、6 名の高齢者が抽出できた. この抽出した 6 名の内、最近転倒した・あるいは転倒しそうになったと回答した者が 4 名(66%)であった(図 2). マハラノビス距離は大きい要因は、「片脚立ちができない、片脚立ちができても途中でバランスが保持できない」ことが共通にあった. 一方、最近転倒したことがあっても、必ずしもマハラノビス距離が大きくなかった.

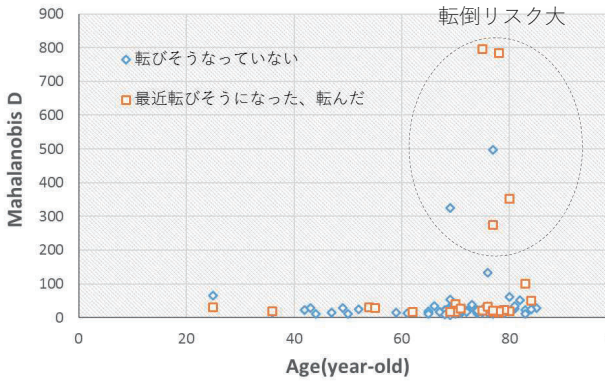


図 2. マハラノビス距離による転倒リスク大の抽出

4.3 因子分析の結果

最初に 22 項目間の相関行列を計算し、この相関行列の固有値を算出した結果、固有値の影響が小さく減衰状態になるところとして、固有値 1.5 までで、有効な潜在因子数を 5 つまでに決定した.

因子分析は最尤法を適用して、22 項目のうち身長と体重の情報は、BMI として表現できるため削除し、最終的に 20 項目に対して 5 因子に分解した結果を表 2 に示す. 第 1 の因子(ML2)は、開眼片脚立ちスコア(この値が高いとバランス良好)が低い程、またその足圧中心の動揺が大きい程バランスが悪いことを示しており、「下肢筋力に起因したバランス」と定義した.

第 2 の因子(ML1)は、同様に閉眼両脚立ちスコアと閉眼両脚立ち動揺に起因しているため、脳の平衡感覚に関連する「神経調整機能に起因したバランス」と定義した. 第 3 の因子(ML4)は、「最近転んだことがある・転びそうになった」因子が最も大きいため、転倒経験そのものに関する因子と定義した. 第 4 の因子(ML5)は、年齢と握力が反比例の関係を示しており、加齢に伴い握力が小さく、筋力に関する因子とした. 第 5 の因子(ML3)は、頭部中心と足圧中心の位置の差から算出した姿勢が最も大きかったため、姿勢の因子とした.

表 2. 因子分析の結果

項目	下肢筋力バランス ML2	神経調整機能 ML1	転倒 ML4	筋力 ML5	姿勢 ML3	共通性 h2	独自性 u2
年齢	0.03	0.04	0.05	0.81	-0.01	0.734	0.266
BMI	0	0.1	-0.13	0.26	0.02	0.079	0.921
１日平均歩数 1. 10K歩以上, 6. ２K以下	-0.03	0.07	-0.04	0.32	-0.06	0.11	0.89
運動習慣について１毎日, ５全く	0.08	0.05	-0.22	-0.08	0.15	0.085	0.915
左右高い方握力	-0.1	0.08	-0.06	-0.66	-0.03	0.494	0.506
最近転びそうになった1はい, 2いいえ	-0.27	0.02	0.54	-0.25	0.08	0.3	0.7
昨夜の飲酒 1飲んでない, 4二日酔	-0.11	-0.12	0.19	0.01	-0.07	0.052	0.948
昨夜の睡眠 1よく眠れた, 4全く	0	0.13	-0.11	-0.29	0.09	0.113	0.887
本日の疲労度 0疲れてない,2疲れている	-0.05	0	-0.25	0.01	0.23	0.127	0.873
疼痛2膝に痛みがありますか　0無,1有	-0.05	0.05	-0.39	0.41	0.23	0.255	0.745
疼痛,1腰に痛みがありますか　0無,1有	-0.07	0.07	-0.28	0.07	0.03	0.08	0.92
開眼片脚スコア	-0.93	0.02	-0.03	-0.06	0.02	0.919	0.081
開眼片脚姿勢距離	-0.17	0.01	0.8	0.05	0.05	0.622	0.378
開眼片脚足圧中心移動	0.9	0.04	0.1	0.05	0.02	0.92	0.08
開眼片脚足圧中心面積	1.02	-0.04	-0.01	-0.05	0.01	0.995	0.005
閉眼両脚スコア	0.03	-0.95	0.35	-0.03	0.02	0.886	0.114
閉眼両脚姿勢距離	0.04	0.86	0.05	0	0.52	0.995	0.005
閉眼両脚足圧中心移動	0.22	0.08	0.7	0.08	-0.27	0.825	0.175
閉眼両脚足圧中心面積	0	0.65	0.01	-0.02	-0.73	0.995	0.005
片脚立ち ０保持, 1途中NG, 2できない	0.9	0.03	-0.08	-0.03	0.01	0.772	0.228
因子負荷量(SS loadings)	3.77	2.09	1.85	1.61	1.04		
寄与率(Proportion Var)	0.19	0.1	0.09	0.08	0.05		
累積寄与率(Cumulative Var)	0.19	0.29	0.39	0.47	0.52		

因子間の相関係数は、最も強いところでは転倒経験因子(ML4)と筋力因子(ML5)で、0.39 が得られた. それぞれの因子の共通性・独自性については、年齢やバランス計測データは高い共通性があり、筋力を評価した握力は中程度の共通性であった. BMI や運動習慣、睡眠、疲労など問診票で抽出した項目には、ほとんど共通性がみられなかった. 因子分析の手法は、最尤度法・主因子法・重み付け最小二乗法で、寄与度を比較した結果を図 3 に示す. 手法を変更することで結果が大きく変わる事はなく、上位 5 つ因子の累積寄与率は 0.52 であった. 寄与率の貢献が低い項目は、飲酒の状況、昨夜の睡眠状況、その日の疲労度であった.

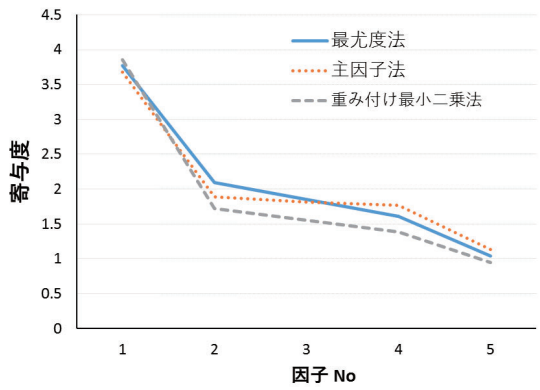


図 3. 因子分析手法毎の寄与度比較結果

5. 考察

就労者を含めた高齢者(平均年齢 68.8±12.5 歳)で、筋力など運動機能のパラメータは性別で大きく依存するため、今回は女性を対象に限定することでパラメトリックな正規分布になりMTS 法が適用できたと考える. 参加した健診者は自ら希望しており、比較的健康意識が高く、運動習慣も 2.1±1.3(スコア 2 が週 2～3 日は運動している)高いため、比較的転倒にも意識して生活している人が多かった. 本来、転倒リスクの高い高齢者などは外出せず運動不足で、自宅の室内で転倒するケースもあり、幅広い対象者のデータ採取が必要になる.

転倒要因は、内的・外的な様々な要因があるが、異常値検知の手法であるマハラノビス距離で、6 人の転倒リスクの高い高齢者を検出した. この 6 名中 4 名は、「最近転倒した・しそうになった」人であり、「過去に転倒経験のあり人は、転倒しやすい」という従来の報告[Tinetti 10]を裏付けている. この 6 名に対応した因子分析の結果を確認したところ、全員第 1 因子(ML2)が大きいかったため、下肢筋力バランスに依存していると言える. 一方で、問診票で採取した睡眠状況、昨日の疲労感、飲酒の影響は、各因子の共通性は低い理由として、主観的評価であることやほとんどの参加者が健康的な状態であったことが考えられる.

転倒リスクを算出する上で重要なことは、マハラノビス距離の基準空間をどの様に決定するかであった. 最も転倒しにくい健康な人を基準にして、そのデータに対して異常値を累積加算するためである. 計測した結果から、「バランス動揺結果が安定している人」且つ「最近転倒したことがない、また転倒しそうになっていない」人を基準としたが、精度を上げるためには下肢筋力など他の要因も追加検討が必要である. この転倒リスクスコアによって、高齢者は転倒について意識する事が重要で、運動習慣・歩き方・注意力などの行動変容に繋がることが期待でき、健康長寿に貢献していきたい.

筋力テストは、筋力が最も簡単に評価できる握力で実施したが、バランスに直接関係する筋力は下肢筋力である. 握力と下肢筋力の1つである四頭筋筋力とは、中程度の相関があることが報告されている[池田 10]が、精度面で課題がある. そのため、さらに精度を上げるためには、参加者の測定の負担が増えるが下肢筋力の計測が必要だろう. また、問診票の項目から、身体機能・行動状況(不注意などを含む)を抽出したが、過去の病歴や服薬の種類などの関係も検討が必要かもしれない.

分析方法は、当初主成分分析を候補とした. 主成分分析は、各項目から特徴を総合的に統合していく方法であり、計測データや問診票など 20 項目の統合は、特徴が出しにくい傾向があった. そのため因子分析を採用することで、潜在的因子を 5 つに絞り、その因子の 20 項目の寄与度で、ある程度の特徴を抽出することができたと考える.

動的バランスでの評価では、歩行状態をウェアラブルセンサーで加速度データを収集し、デープラーニング(CNN など)を適用した転倒予防の可能性が報告されている[Nait Aicha 2018]. 今回の静的バランスの計測データもデープラーニングの様な機械学習の適用を検討していきたい.

課題として、バランス結果はその日の体調・疲労度にも影響するため 1 回のみの計測では限界があり、日時を変えて複数回の計測から平均を用いるなど必要と考える. また対象者のデータを増やす事、足圧動揺だけでなく、今回使用しなかった頭部動揺データも考慮した分析を行い精度向上することを考慮する必要があると考える.

6. まとめ

バランスと握力の計測情報と問診票による行動情報を元に、マハラノビス距離を閾値として転倒リスクスコアの高い参加者 6 人を抽出した. その中で 4 人は、「最近転倒・または転倒しそうになった」履歴があり、転倒履歴があるものは転倒リスクが高い可能性があることを示した. 因子分析では、バランス、神経調節、転倒履歴、加齢による筋力低下などの潜在因子を抽出し、開眼片脚立ちと閉眼両脚立ちでのバランスデータの観測因子に高い共通性がみられたが、問診票から得られた行動情報からの観測因子はほとんど共通性が低かった.

参考文献

[厚労省 17] 厚生労働省: 平成 28 年国民生活基礎調査の概況, 国民生活基礎調査, pp. 29 (2017)

[Rubenstein 02] Rubenstein, L.Z., and Josephson, K.R.: The epiderniology of falls and syncope, Clin Geriat Med, 18, pp.141-158 (2002)

[Pfortmueller 14] Pfortmueller, C.A., Lindner, G., and Exadaktylos, A.K.: Reducing fall risk in the elderly: risk factors and fall prevention, a systematic review. Minerva Medica. 105(4), pp. 275-281 (2014)

[日本医師会 07] 日本医師会: 医療従事者のための医療安全対策マニュアル, pp. 174 -175 (2007)

[Agrawal 11] Agrawal, Y., Carey, J.P., Hoffman, H.J., Sklare, D.A., and Schubert, M.C.: The modified Romberg balance test: normative data in US adults. Otol Neurotol. 32(8), pp. 1309-1311 (2011)

[救仁郷 01] 救仁郷 誠: マハラノビスの距離 入門 ーMTS 法を理解するためにー, 品質工学, 9(1), pp.13-21 (2001)

[中島 99] 中島 尚登, 高田 圭, 矢野 宏, 柴本 由香, 高木 一郎, 山内 眞義, 戸田 剛太郎: 健康診断データを用いた MTS 法による予測の研究, 品質工学, 7(4), pp.49-57 (1999)

[森田 10] 森田 恵美子, 飯島 佐知子, 平井 さよ子, 賀沢 弥貴, 安西 由美子: 転倒アセスメントスコアシートの改訂と看護師の評定者間一致性の検討,日看管会誌, 14(1), pp.51-58 (2010)

[中村 03] 中村 隆一, 斎藤 宏, 長崎 浩: 基礎運動学 第 6 版. 医歯薬出版, pp. 347-352 (2003)

[Tinetti 10] Tinetti, M.E., and Kumar, C.: The patient who falls: "It's always a trade-off", JAMA, 303(3), pp.258-266 (2010)

[池田 10] 池 田 望, 村田 伸, 大田尾 浩, 甲斐 義浩, 村田 潤, 富永 浩一, 溝田 勝彦: 高齢者に行う握力測定の意義, 西九州リハビリテーション研究, 3, pp.23-26 (2010)

[Nait Aicha 2018] Nait Aicha, A., Englebienne, G., van Schooten, K.S., Pijnappels, M., and Kröse, B.: Deep learning to predict falls in older adults based on daily-life trunk accelerometry, Sensors ,18(5), E1654 (2018)