

離床予測フィルムセンサの基本特性評価

Fundamental Characteristic Evaluation of Film Sensor for Bed-Leaving Prediction

○ 間所洋和（秋田県立大学） 下井信浩（秋田県立大学） 佐藤和人（秋田県立大学）
徐粒（秋田県立大学）

Hirokazu MADOKORO, Akita Prefectural University
Nobuhiro SHIMOI, Akita Prefectural University
Kazuhito SATO, Akita Prefectural University
Li XU, Akita Prefectural University

Abstract: 離床予測のための非拘束性と不可視性を重視した新センサを開発した。本発表では、その基本特性について、試験機を用いた評価実験により定量的かつ客観的に報告する。離床行動の予測には、被験者の体重や身長などのボディパラメータに対するロバスト性が求められる。既存のセンサシステムでは、これらの情報を手動により入力していたが、圧電素子を用いたセンサ方式により、初期設定や被験者毎のカスタマイズを必要としない方式の実現を目指して、簡易性を重視した方式を特長とする。

Key Words: Piezoelectric Film, Bed-Leaving, and Quality of Life.

1. はじめに

医療や介護の現場において人手不足が深刻化しており、病棟を閉鎖する病院も発生している。人手不足が更に進むと、特に夜間の就寝中に十分なケアを行うことができず、転倒や転落による事故が増加し、最悪の場合には、患者の生死にかかわる重大な過失に至る恐れがある。介護施設における事故の発生状況に関する三田寺ら⁽¹⁾の調査によると、高齢者による事故の約半数が転倒・転落事故で占められている。また、これらの事故の多くは高齢者がベッドから離れる際に発生している。更に、事故の大半が介護者の目の届かない範囲で発生していることから、これらの事故を防ぐためには、それぞれの患者に対してアセスメントを行い、適切な対策を取る必要がある。近年では、患者の行動を早期に察知するために、離床センサを用いた予防策を施す施設が増加している。

離床センサには、クリップ型センサ⁽²⁾やマット型センサ⁽³⁾が、安価で広く普及しているが、検出精度が低く、信頼性に乏しい。様々なセンサ方式が提案されている中で、非拘束で様々な情報が得られるセンサとして、カメラの利用が挙げられる。ネットワークに接続できる安価な暗視カメラが普及し、幼児の睡眠を見守るために、補助的に使用する家庭が増えている。カメラ画像から、高齢者をモニタリングし、異常動作を検出する方法⁽⁴⁾が考案されているものの、特別な事情のない限り、カメラの使用は困難である。特に、病院や介護施設では、プライバシーの問題や倫理の観点から、カメラの設置は限定される。プライバシーの面では、RFIDの電界強度を用いた検出法⁽⁵⁾が提案されているが、転倒後の判定となる。このように、離床センサの開発には、信頼性の高さ、コスト、検出速度、プライバシー、そして使用者のQOL (Quality Of Life) などの、様々な要因に配慮しなければならない。

現在、最も信頼の高いシステムとして、電動ベッドのアクチュエータ部分に歪みセンサを取り付けたパラマウントベッド社の離床CATCH⁽⁶⁾が挙げられる。また、ベッドフレームの四隅にロードセルが取り付けられたフランスベッド社のM1は、学術的に精度は公表されていないものの、臨床現場では問題なく使える性能を誇っている。しかしながら、これらのセンサは、ベッドと一体になったシステムであるため、利用に際してはベッド本体を購入する必要がある、多大な導入コストを必要とする。

我々はこれまで、後付け可能で非拘束かつ簡易的な離床センサとして、いくつかのセンサシステムを提案してきた。ピエゾフィ

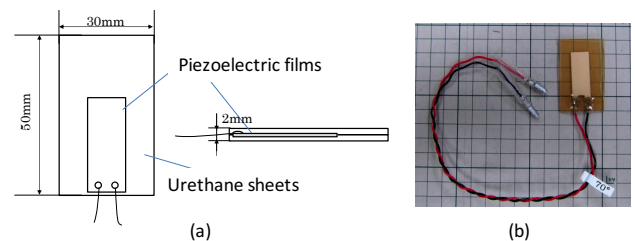


Fig.1 Film-type load sensor: (a) design architecture and (b) photograph of prototype.

ルムを円盤状のアクリル板で挟んだパッド型の圧力検出センサは、ベッドとシーツの間の6カ所に布置して、被験者のベッド上での大局的な動作を検知した⁽⁷⁾。3軸加速度計を小型カプセルに格納して枕の中に入れたピローセンサは、上半身を中心とする局所的な動きの計測を目的とした⁽⁸⁾。また、橋梁の振動解析に用いたボルト型振動センサ⁽⁹⁾を小型化し、ベッドの柵に取り付けることにより、離床を検出する方法⁽¹⁰⁾を考案するとともに、これらのセンサを組み合わせた複合的なセンサシステム⁽¹¹⁾を提案した。最新のセンサでは、ベッドのキャスタ下に設置して、離床を検出する方式を提案した⁽¹²⁾。

しかしながら、パッド型のセンサや枕内臓のセンサでは、ズレの問題、ボルトセンサでは、安全柵を把持しなければセンサが反応しないという課題が残っていた。また、キャスタセンサでは、頻繁なベッド移動に対応できないという意見が、臨床現場から寄せられていた。このため、より小型で、ズレの問題がなく、ベッドの自由な移動にも対応できる後付け型のセンサの開発が求められている。本論文では、ベッドのフレームに貼り付けるだけで、離床の検出が可能な新しいセンサを提案する。試験機を用いて本センサの基本特性を定量的に評価するとともに、時系列特徴学習が可能な機械学習法を用いて、離床行動の判定を試みる。

2. フィルム荷重センサ

2.1 プロトタイプ

本研究では、Fig. 1に示すフィルム荷重センサを開発した。本センサは、ベッドの四隅と中央部に取り付けることで、ベッド上での姿勢変化に伴う荷重変化を検知する。設計に際して、使用者の目の届きにくい場所に設置できることと、安価な離床予測システムの構築のために簡便な構造となることに配慮した。センサの内部構造をFig. 1(a)に示す。ピエゾフィルムをウレタンシートで上下から挟み込むサンドイッチ構造としている。

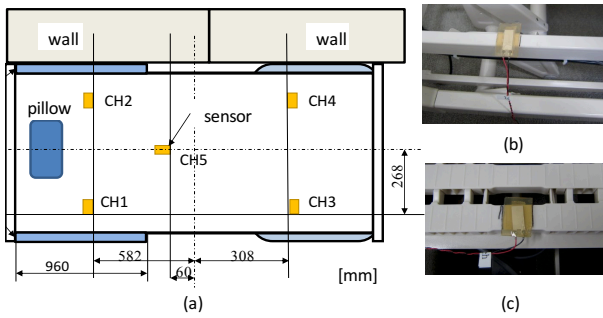


Fig.2 Sensor installation: (a) assignment of sensors, (b) installation of CH1-CH4, and (c) installation of CH5.

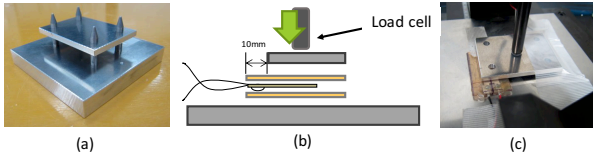


Fig.3 Load test: (a) fixture, (b) schematic diagram, and (c) load test.

piezofilmには、株式会社東京センサ製の LDT-028K/L を使用した。LDT-028K/L は、厚さが 28 μm の piezofilm エlement に、125 μm のポリエステル層によるラミネート加工が施されている。電極部のサイズは 12 \times 30 mm となり、静電容量は 1.38 nF となる。出力電圧は、フィルムの変形により得られる。piezofilm を用いることで、センサ動作の電源を必要とせず、システムの簡素化が可能となる。この piezofilm を、JIS A 硬度が 70 度で大きさが 30 \times 50 mm、厚さが 1 mm の軟質ウレタンシートで挟むことで、センサの応答性と耐久性の向上を試みた。出力信号を取り出すためのツイストペアケーブルを取り付けた後の試作センサの外観を Fig. 1 (b) に示す。

2.2 センサ配置

本研究では、離床動作を迅速に判定するセンサシステムの構築を目指している。ベッドフレームの天板に、96 個の歪みセンサを取り付けたセンサシステムが提案⁽¹³⁾されていたが、設置やコスト面を考慮すると現実的ではない。著者らの過去のパッドセンサ⁽⁷⁾による知見から、センサ数を必要最小限にしている。このため、システムを構築する上で、できるだけ少ないセンサ数で非拘束かつ不可視であることが望ましいと考えている。

センサ配置を Fig. 2 (a) に示す。取り付けたセンサ数は 5 個とした。CH1 と CH2 はベッド上部に取り付け、被験者の頭部から上半身の動きを計測する。CH3 と CH4 はベッドの下部に取り付け、患者の下半身の動きを計測する。CH5 は臀部付近の動きを計測するために、ベッドの中央部に取り付ける。

使用するベッドの構造に応じて取り付け方は若干異なるが、基本的にはベッドのフレームに取り付ける。CH1 から CH4 は、Fig. 2(b) に示すようにリクライニング用のベッドフレームと固定フレームとの間に取り付けた。CH5 は、Fig. 2(c) に示すように、ベッドの天板とマットレスとの間に取り付けた。

3. センサ特性評価試験

3.1 試験装置と治具

開発したフィルム荷重センサの出力特性を評価するために、DigiTech 社製の荷重試験機 (Multi Force Analyzer FWT-1000) を用いて、評価試験を実施した。FWT-1000 の主な仕様は、定格荷重が 1 kN、分解能が 100 mN、最大試験速度が 600mm/min、荷重精度が $\pm 0.2\%$ となる。

本センサはベッドフレームに取り付けるため、センサに加わる荷重は面荷重となる。面荷重の試験に際して、Fig. 3 (a) に示す

Table 1 Test Load Patterns.

No.	Weight [kg]	Load [N]
1	40.0	341
2	50.8	433
3	61.9	528
4	70.0	597
5	80.0	682

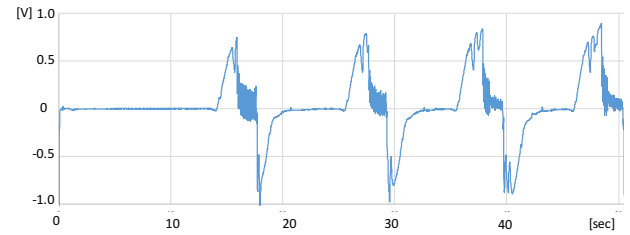


Fig.4 Sensor Output Signal.

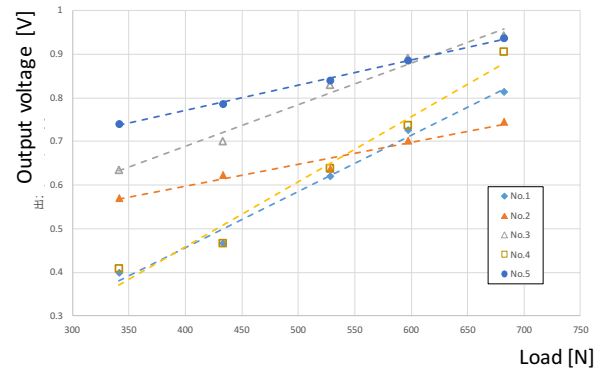


Fig.5 Relation between output voltage and load of sensors.

試験治具を製作した。治具のサイズは、底面の台座が 100 \times 100 mm の正方形、上面の台座が長辺 70 mm、短辺 50 mm となる。厚さは、前者を 15 mm、後者を 5 mm とした。材質には A2017 のジュラルミンを用いた。

3.2 試験条件

離床行動の中で最も大きな荷重が加わるのは、離床行動を開始し、上半身の体重が臀部に集中する長座位であると考えられる。そこで試験の荷重条件として、長座位の際に、臀部にかかる最大の荷重を設定した。看護人間工学の観点から、人が長座位を取る場合に臀部にかかる体重は、膝から上の全体重⁽¹⁵⁾とされており、これは全体重の 87% に相当する。平成 24 年国民健康・栄養調査⁽¹⁶⁾によると、65 歳以上の平均体重は、男性が 61.9kg、女性が 50.8kg となる。これを基準とし、40kg から 80kg までの範囲で荷重を設定する。以上より、Table 1 に想定体重と、その際の試験荷重を示す。

本試験では、5 セットのフィルム荷重センサを対象として、出力特性を検証した。デフォルトの試験速度は 5 mm/min とした。Fig. 3 (c) に荷重試験の模式図と試験の様子を示す。フィルム荷重センサの出力は piezofilm のリヘッドを除いた範囲で生じるため、フィルム荷重センサの端から 10mm を除いた部分を治具で固定し、荷重を加えている。5 種類の異なる試験荷重を順番に加えて、センサから出力される電圧をデータロガーを用いて 50 Hz のサンプリングで計測した。

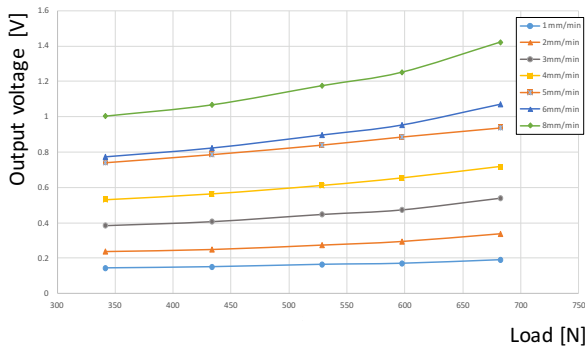


Fig.6 Relation between output voltage and load speed.

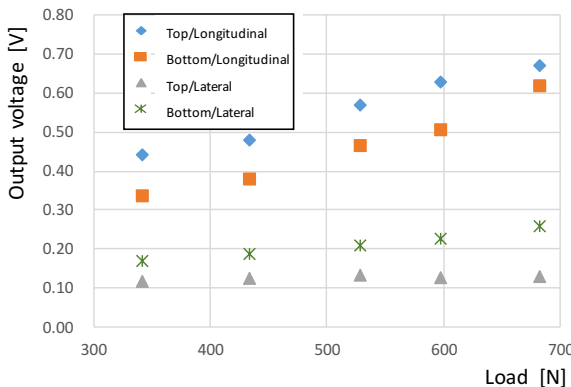


Fig.7 Relation between output voltage and load of side and orientation.

3.3 試験結果

各センサに対し5回ずつ荷重を加え、センサの出力確認をした。センサの出力波形の一例を Fig. 4 に示す。圧電素子により、フィルムの変形に沿って速い反応速度の電圧が出力されている。出力電圧は、2V 程度の電位差が得られている。測定の際には、最初に出現する電圧のピークをトリガとして、異なる試験荷重を順番に加えた。出力電圧は、荷重のかかり始めから次第に上昇し、最大荷重に達した時にピークを迎える。その後、試験機のロードセルが試験体から離れるため、センサが定常状態に戻る際に、負の方向へ出力が現れる。そこで、この測定結果の正のピーク電圧を用いて、試作したフィルム荷重センサの出力特性を求めた。

試験荷重を加えた場合のセンサ毎の出力を Fig. 5 に示す。本結果から、センサ毎の傾きが異なるものの、本センサ出力と荷重の間に線形関係が認められる。つまり、本センサは使用者の体重に比例して、センサ出力が大きくなることを示唆している。この結果から、オフセットを与えるか、もしくは傾きのみを取得することで、安定したパターン変化の検出が実現できると考えられる。

続いて、試験速度を変化させた場合の出力について評価した。試験速度を 1 mm/min から 8 mm/min まで、1 mm/min 毎に変化させた場合の試験結果を Fig. 6 に示す。速度が増すにつれて、センサ出力が増加している。ただし、荷重の増加に対するセンサ出力の増加特性は変化してない。つまり、使用者がベッド上で寝返りなどの動作を行う際の動作量によって、センサ出力が増大すると考えられる。

最後に、センサの設置方向を変えた場合の出力差について評価した。試験方法として、長手方向に対してセンサの表と裏の2通り、短手方向に対してセンサの表と裏の2通りとし、計4通りの場合について比較した。センサの表裏は、 piezofilm のリヘッドが下向きになる場合を表、上向きになる場合を裏とした。

試験結果を Fig. 7 に示す。長手方向は短手方向に比べて平均で約3倍のセンサ出力を示していることから、長手方向への指向性を示唆する結果が得られた。今回のシステムでは、リクライニング用のベッドフレームとベッド本体のフレームの間にセンサを取り付けているため、短手方向に比べ長手方向の荷重変化が大きくなることと一致している。

4. 評価実験

4.1 実験条件

判定対象とする行動パターンは、従来研究^(14, 6)を参考にして4姿勢とした。各姿勢の特徴を以下に示す。

1. **長座位**: 被験者が起床し、ベッドの長手方向に着座している姿勢。
2. **短座位**: 被験者が離床に向けた動作を試みている状態の姿勢。
3. **端座位**: 被験者がベッドの端に着座し、離床を試みている状態の姿勢。離床寸前の姿勢なので、確実に判定しなければならない。
4. **完全離床**: 被験者がベッドから完全に離床している状態。

なお、臥位に関しては、本研究では判定対象外としているが、判定に際しては「その他」というカテゴリを割り当てている。

評価実験は、臨床現場を模した実験環境を構築して実施した。本センサを取り付けるベッドには、病院や介護施設で広く使用されているパラマウントベッド社製の KA-36121R を用いた。このベッドには3本のアクチュエータが内蔵されており、寝台面の高さ、背面のリクライニング、膝部の折り曲げ角度が任意に調整できる。なお、本実験では、リクライニング機能を使用しないという条件でデータを取得した。通常、介護者や付き添いの方がベッドから離れる際には、万一の場合に備えて、ベッドの高さを一番低い位置に設定することが多い。そこで本実験では、ベッドの床高を最も低い 25 cm に設定した。また、ベッドの一方を壁と柵によって囲むことで、被験者がベッドから離床する際の経路は、一方のみに限定した。

被験者は20代から50代までの男女10名とした。臨床施設での評価実験を実施する前段階として、大学内で被験者を募集したため、20代の男性が多くなっている。身長は160 cm から180 cm まで、体重は50 kg 前半から90 kg 後半まで幅広く確保できた。各被験者に対して判定対象の行動パターンを説明し、臥位から順に20秒程度を目安として、ベッド上で動作してもらった。この一連の動作を6回繰り返し、被験者毎に6パターンのデータを取得した。取得した6パターンのデータのうち、5パターンを学習用、残りの1パターンをテスト用として、交差検定 (Cross Validation: CV) により判定精度を評価した。なお、データ取得のサンプリング周期は50 Hz とした。実験中は、モニタリング用の端末とタイムスタンプを合わせて、ビデオカメラで被験者の動作を撮影した。判定精度を評価するためのグランドトゥールズは、この映像から作成した。

4.2 判定方法

我々は、個人により多様なパターン変化を示す離床行動を判定する手法として、EF-CPNs (Elman-type Feedback Counter Propagation Networks) を提案した⁽¹²⁾。本手法は、競合と近傍の概念により学習データを可視化写像する CPNs⁽¹⁷⁾ に Elman 型アーキテクチャのフィードバックループ⁽¹⁸⁾を追加したネットワークである。本論文においても、当該手法を用いて離床行動パターンの分類と判定を行う。

4.3 判定結果

判定結果を Table 2 に示す。平均判定率は92.1% となった。姿勢別では、短座位で100%の判定率が得られた。端座位と長座位は98.3%と91.7%であった。離床に関しては被験者間の差異

Table 2 Recognition accuracy [%].

Subject	Long.	Late.	Term.	Left	Ave.
A	100	100.0	83.3	100	95.8
B	83.3	100	100	100	95.8
C	100	100	100	100	100
D	100	100	100	66.7	91.7
E	83.3	100	100	100	95.8
F	83.3	100	100	0	70.8
G	100	100	100	66.7	91.7
H	100	100	100	100	100
I	66.7	100	100	66.7	83.4
J	100	100	100	83.3	95.8
Ave.	91.7	100	98.3	78.3	92.1

Table 3 Confusion matrix for all subjects.

	Long.	Late.	Term.	Left	Other
Long.	55	0	0	1	4
Late.	0	60	0	0	0
Term.	0	1	59	0	0
Left	0	3	8	47	2

が大きく、全体では 78.3% に留まっており、他の姿勢と比較して低い精度になった。被験者別の精度では、6 回の施行において、CV による全ての組み合わせで 100% の判定率が得られた被験者が 2 名いたのに対して、被験者 F の精度は 70.8% に留まっていた。特に、離床の判定において、6 回の施行とも判定に失敗している。

誤判定について混同対照表 (Confusion Matrix: CM) を用いて考察を行う。被験者 10 名の CM を Table 3 に示す。判定に成功したデータ数は、CM の対角線上に表示される。誤判定のデータ数と姿勢の名称は、横方向を基準として縦方向のラベルを参照することで特定できる。長座位では、1 データが離床と誤判定された。残りの 4 データは、その他のカテゴリに判定されている。端座位に関しては、誤判定が 1 データのみであり、短座位と判定されている。離床に関しては、60 データ中 13 データで誤判定が発生した。誤判定の内訳は、端座位に 8 データ、短座位に 3 データ、その他に 2 データであった。

5. むすび

本論文では、ベッドに後付け可能な離床センサとして、フィルム荷重センサを提案した。試作センサの出力特性を評価するために荷重試験を行った結果、荷重に対するセンサ出力は線形性を有することを確認した。また、同じ荷重を加えた場合でも、速度によって出力が変化すること、センサ出力には指向性があり、短手方向に比べ長手方向の出力が約 3 倍になるという基本特性が得られた。本試作センサを用いて、被験者 10 名を対象に評価実験を行った。その結果、長座位、短座位、端座位、離床の 4 パターンに対して、92.1% の判定率が得られた。姿勢別では、短座位が 100%、端座位と長座位は 98.3% と 91.7% の判定率が得られたものの、離床に関しては 78.3% の精度に留まっていた。混同対照表を用いて、誤判定を分析したところ、端座位と短座位に分布していることが判明した。今後は、本センサの実用化に向けて、

夜間の長時間モニタリングや臨床施設での評価実験に取り組む予定である。

参考文献

- (1) 三田寺祐治, 赤澤宏平, “介護保険施設における介護事故の発生状況に関する分析,” 社会医学研究, vol.30, no.2, 2013.
- (2) 辰巳智子, 金本恵子, 八木 尚美, “転倒むしの効果的な使用方法-誤作動しない紐の長さとし長の検討をして,” 日本看護学会論文集, vol. 38, pp.144-146, 2007.
- (3) 近藤澄子, 神谷千代, 宮木晴美, 鳥山夕子, 三村恵美, 土田文子, “離床センサーマット使用による転倒・転落予防の有効性,” 日本農村医学会雑誌, vol.55, no.3, p.245, 2006.
- (4) 関弘和, 堀 洋一, “高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出,” 電学論 D, vol.122, no.2, pp.1-7, 2002.
- (5) 鍛冶良作, 廣田清美, 西村拓一, “RFID タグシステムによる閉所空間における転倒状態検出法の提案,” 情報処理学会論文誌, vol.51, no.3, pp.1129-1140, 2010.
- (6) 初雁卓郎, 椎野俊秀, 村井真也, “ベッド上の患者行動を推定・通知するシステム「離床 CATCH」の提案,” 労働科学, vol.88, no.3, pp.94-102, 2012.
- (7) 間所洋和, 下井信浩, 佐藤和人, “圧電素子を用いた非拘束センサシステムによる離床行動予測,” 日本機械学会論文誌 (C 編), vol.79, no.800, pp.1024-1035, 2013.
- (8) 間所洋和, 下井信浩, 佐藤和人, “加速度センサ内蔵枕を用いた機械学習に基づく離床行動予測,” 計測自動制御学会論文誌, vol.49, no.11, pp.994-1003, 2013.
- (9) 下井信浩, 西條雅博, “橋梁の危険予知用簡易スマートセンサの開発,” 計測自動制御学会論文集, vol.48, no.12 pp.816-821, 2012.
- (10) 下井信浩, 間所洋和, 徐粒, “ピエゾ振動計測センサと加速度計を用いたベッドモニタリングシステム,” 日本機械学会論文誌 C 編, vol.80, no.812, pp.1-14, 2014
- (11) 間所洋和, 下井信浩, 佐藤和人, “非拘束性と QOL を考慮した離床予測センサシステムの開発,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J96, no.D-12, pp.3055-3067, 2013.
- (12) 間所洋和, 下井信浩, 佐藤和人, 徐粒, “離床行動予測を目的としたベッド上での動作パターン識別—Elman 型フィードバック対向伝搬ネットワークを用いた時系列特徴学習—,” 計測自動制御学会論文集, vol.51 no.8 pp.528-534, 2015.
- (13) 上蘭剛, 久保敦, 中城親男, 上加世田晃一, 内田猛俊, “離床予測システムの実用化研究,” 鹿児島県工業技術センター研究成果発表会予稿集, pp.34-35, 2010
- (14) 茂木学, 松村成宗, 山田智広, 武藤伸洋, 金丸直義, 下倉健一朗, 阿部匡伸, 大久保由美子, 森田佳子, 葛西圭子, 山元友子, 落合慈之, “転倒転落事故の予防を目的とした見守りベッドシステム,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J94, no.D-6, pp.1025-1038, 2011.
- (15) 小川鏡一, イラストで学ぶ看護人間工学, 東京電機大学, p.28, 2008.
- (16) 厚生労働省, 平成 24 年国民健康・栄養調査報告, 2014.
- (17) H. Nielsen, “Counterpropagation Networks,” *Applied Optics*, vol.26, pp.4979-4984, 1987.
- (18) J. Elman, “Distributed Representations, Simple Recurrent Networks, and Grammatical Structure,” *Machine Learning*, vol.7, pp.195-224, 1991.