介護支援のための 睡眠モニタリングエージェントとその展開

Sleep Monitoring Agent for Care Support and its Perspective

高玉圭樹 Keiki TAKADAMA

田島友祐 Yuusuke TAJIMA

アブストラクト 本稿では、超高齢化社会における高齢者の介護支援に焦点をあて、高齢者が健康で快適な生活を送るための「睡眠モニタリングエージェント」とその展望を解説する。睡眠モニタリングエージェントは各高齢者に提供され、無拘束型のセンサで得られた心拍数と体動の生体データから睡眠段階を推定する。推定された情報を遠隔にいる介護士の持つタブレットやPC端末などに表示するとともに、高齢者が夜中に徘徊あるいはベッドから落ちたときに通知する。本稿では、睡眠モニタリングエージェントとそのシステムについて述べ、特に、新しい睡眠段階推定法について詳しく述べる。また、介護福祉施設における被験者実験の結果を示し、睡眠モニタリングエージェントシステムの有効性を検証するとともに今後の課題についても述べる。

キーワード 睡眠段階推定, 睡眠モニタリング, 介護支援, 進化計算

Abstract This paper focuses on the care support of elderly persons in a superaging society, and describes a proposed sleep-monitoring agent and its use to ensure the comfortable and healthy life of aged persons. A sleep-monitoring agent is provided to each aged person to estimate his/her sleep stage from heartbeat and body movement data acquired by an unconstrained-type sensor. The obtained information is remotely displayed in the tablets and/or PCs of care workers and informs them when an aged person sleepwalks or falls from his/her bed. In this paper, we introduce the sleep-monitoring agent and its system, and describe a new sleep-stage estimation method in detail. This paper also provides the results of experiments on human subjects, which show the effectiveness of the sleep-monitoring agent. Finally, future works are summarized.

Key words sleep-stage estimation, sleep-monitoring, care support, evolutionary computation

1. はじめに

我が国は、2025年に総人口の35%（3,500万人）弱が65歳以上の高齢者が占めると推定され⁽¹⁾⁽²⁾、世界で最も高齢化が進んだ社会となる。このような社会情勢の中、現在の介護福祉施設は65歳以上の高齢者（老人福祉法上では40歳以上）で、介護保険上「要介護」に認定された人を対象とした入所サービスを実施しており、自宅で適切な介護を受けることが困難な高齢者がケアを受けている。入居者の多くは「自立」が困難、若しくは寝たきりの高齢者であるため、各居室で生活する入居者に対し、複数の介護士が交代で食事から運動、服薬、排せつ等の生活支援及び健康状態の管理を行っている。

このような背景から、本稿では現代の高齢化社会に欠くこと

のできない介護支援に焦点を当て、高齢者が健康で快適な生活を送るための「睡眠モニタリングエージェント」の重要性について解説する。ここで、「睡眠」に着目した理由としては次のようにまとめられる。まず(1)介護福祉施設では「快眠・快食・快便」という観点が、高齢者の健康的で過ごしやすい快適な生活にとって重要であるが、食事や排便は介護士によるサポートが可能であるものの、睡眠は他人の介添はできないため、睡眠状態を把握することは重要である。次に(2)認知症をはじめ眠りの浅い高齢者は、夜中に起きる回数が多く徘徊する可能性が高いが、いつ徘徊するかは分からないため、リアルタイムに睡眠状態が分かれば徘徊に向けた準備ができる。更に(3)夜中のおむつ交換や起こすタイミングは睡眠の深さと関係しているため（例えば、眠りの浅いときにおむつ交換をすると起こす可能性が高く、一方、深い眠りのときに起こすと機嫌が悪くさせる可能性を高めるため）、睡眠状態の把握は極めて重要な情報となる。

このような状況から、我々は介護福祉施設で生活を送っている高齢者ごとに「睡眠モニタリングエージェント」を提供し、各人の睡眠状態を把握するケアサポートシステムを構築し、その有効性を介護福祉施設にて検証してきた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。本稿では、その有効性を紹介するために、睡眠モニタリングエージェントと

高玉圭樹 正員 電気通信大学大学院情報理工学研究所

E-mail keiki@inf.uec.ac.jp

田島友祐 電気通信大学大学院情報理工学研究所

E-mail y_tajima@cas.hc.uec.ac.jp

Keiki TAKADAMA, Member (Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan), Yuusuke TAJIMA, Nonmember (Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1, Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.8 No.2 pp.96-101 2014 年 10 月

©電子情報通信学会 2014

図 1 睡眠モニタリングエージェントとケアサポートシステム

その展望を解説する。

本稿の構成は以下のとおりである。以下，2．では睡眠モニタリングエージェントとそのシステムを紹介し，3．では睡眠段階推定について述べる。4．では被験者実験の結果を示し，5．では今後の展開について議論する。最終章である 6．で本稿をまとめる。

2. 睡眠モニタリングエージェントとケアサポートシステム

睡眠モニタリングエージェントから構成されるケアサポートシステムを図 1 に示す。提案エージェントは高齢者が保有するスマートフォンやタブレット（もちろん，ノート PC でも構わない）に導入され，睡眠状態を把握する。ここで重要なことは，提案エージェントは高齢者ごとに与えられ，各人の睡眠のリズムや特徴を理解しながら，個別に睡眠段階を推定することである（なお，睡眠段階については 3.1 にて述べるが，浅い睡眠から深い睡眠にかけて，覚醒（W），REM 睡眠（R），ステージ 1～4 の 6 段階に分かれる）。以下，このシステムについて，次の 3 者の立場から説明する。

• 高齢者の立場

図に示す介護福祉施設では，高齢者は各人に居室が与えられ，あるスケジュールに沿って生活を送る。例えば，起床した後，食事をとってから服薬し，血圧や体温などの健康状態を測定する。そして，散歩やリハビリなどの適度な運動をとり，就寝前にトイレに行き睡眠に入る。このようなライフスタイルの中で，毎晩，睡眠モニタリングエージェントは高齢者の睡眠段階を推定し，睡眠状態を把握する。そして，深く安定的な睡眠の場合は健康状態，浅く不安的な睡眠の場合は体調が優れていない可能性が高いと捉える。

• 介護士の立場

睡眠モニタリングエージェントが推定した高齢者の睡眠段階

は，遠隔にいる介護士の持つタブレットや PC などに表示され，高齢者の睡眠状態を把握する。その中で，高齢者がベットから転倒あるいははいはいした場合は，介護士にイーサネットか WiFi のネットワーク経由で緊急通知メールが送信される。また，推定された睡眠状態から，眠りの深いときにおむつ交換をすることで目覚める可能性を下げ，一方，眠りの浅いときに起こすことで機嫌良く目覚めさせるケアサポートをする。

• ケアプランナの立場

高齢者ごとの大まかな 1 日のスケジュールを作成するケアプランナは，睡眠モニタリングエージェントが提供する睡眠状態の情報をを用いることで，今まで深く考慮されてこなかった睡眠をケアプランに反映できるようになる。具体的は，深く睡眠を導くようなケアプランを作成できるようになる。特に，毎日，高齢者の睡眠状態が保存されていくため，高齢者ごとのビッグデータが蓄積され，更に適切なケアプランの構築に貢献する。

上記のような介護は通常の介護福祉施設では実現できておらず，個々の高齢者に対して生き生きとしたライフスタイルを設計する新たな介護支援の可能性を示している。

3. 睡眠段階と推定システム

3.1 睡眠段階

睡眠モニタリングエージェントは，図 2 に示すような睡眠段階を推定する。この図において，縦軸は 6 段階に分かれた睡眠段階，横軸は睡眠時間を示す。睡眠段階は，2．で触れたように浅い睡眠から深い睡眠にかけて，覚醒，REM 睡眠，ステージ 1～4 に分かれており，それぞれ W，R，1，2，3，4 と記載している。睡眠段階は，一般的に眠り始めに深い睡眠となり，浅い睡眠と深い睡眠のサイクルを繰り返しながら，徐々に浅い睡

図 2 睡眠段階

眠の時期が多くなり、起床へとつながる。特に、睡眠段階のステージ 3 と 4 の割合が多いときは睡眠が深く安定し、逆に少ないときは睡眠が浅く不安定となる傾向にある。また、各睡眠段階の割合は年齢とともに変化し、年齢が上がるにつれてステージ 3 や 4 の睡眠時間は減る傾向にある⁽⁶⁾。

3.2 従来の睡眠段階推定

睡眠段階を測定する代表的な手法として、Rechtschaffen & Kales の判定法⁽⁷⁾が有名であるが、この方法は図 3 に示すように、被験者に特殊な器具を装着させ（同図上）、EEG（脳波）、EMG（筋電図）、EOG（眼球運動）のデータを取得し（同図下）、医師の専門知識と経験に基づいて睡眠段階を判定しなければならない。しかし、このような拘束型睡眠段階推定手法を介護福祉施設に应用する場合、高齢者は器具を一晩中付けなければならない、非現実的であるばかりか、深く安定的な睡眠の妨げにもなる。

この問題を解決するために、渡辺らは図 4 に示すように直接器具を付けずに生体データ（心拍、呼吸、体動）を計測できる無拘束エアマットレス型センサを開発し、得られたデータから睡眠段階を判定することに成功した⁽⁸⁾。この方法は、心拍（厳密には心拍数の中周波数成分）と睡眠段階には強い相関がある

図 3 拘束型睡眠段階推定：R&K 法

図 4 無拘束型睡眠段階推定⁽⁸⁾

という数多くの知見^{(9)~(11)}に基づいて考案されており、無拘束で睡眠段階推定を実現した。

しかし、この方法に代表される無拘束で睡眠段階を推定する手法には次の問題がある。まず (1) 推定精度は個人差があり、不安定である。また (2) 睡眠段階を大まかに表す心拍数の中周波数成分は、体調の変化が少ない 20 代の若い人のサンプルで算出されているため、体調の変化が頻繁な高齢者では正確に睡眠段階を推定できるかは不明である。更に (3) 3.1 で述べたように、睡眠のリズムも深さも年齢とともに変化するため（高齢者になると深い睡眠の割合は減るため⁽⁶⁾、高齢者にそのまま適用するには限界がある。

3.3 睡眠段階推定システム

3.2 で述べた問題を解決するために、我々は渡辺らの方法を発展させ、得られた心拍と体動の生体データから各人の睡眠の特性に合わせて睡眠段階を推定する方法を提案し、渡辺らの手法よりも高い推定精度を示すことに成功した⁽⁴⁾。ここで重要なことは、我々の手法は各人の睡眠の特性に合わせて睡眠段階を推定するため、若者が高齢者かの年齢を気にしなくてよいことである。具体的なメカニズムとその流れを図 5 を用いて、以下に説明する。

(1) 心拍・体動データの取得

図 6 に示すフィンランドの VTT 技術研究センタが開発した無拘束型センサ（Emfit センサという）を用い、このセンサから心拍と体動の生体データを取得する。このセンサは渡辺の開発した空気圧とは異なり、圧電素子の

図 5 提案システムの概要

図 6 Emfit センサ © EMFIT

変化から身体データ（心拍、呼吸、体動）を計測できるもので、図 7（b）に示すようにベッドの下に敷けば寝ただけで測定可能である（この図は介護福祉施設に Emfit センサを設置したときの写真である）。なお、このセンサは高いデータの精度からフィンランドでは医療器具として認定されているため採用したが、我々の睡眠段階推定手法は心拍と体動のデータが取得できれば、どのようなセンサでも構わない。

このような特徴から、高齢者は同図（a）に示すようにいつもと同じベッドに寝ただけで睡眠段階を推定できるようになる。通常と違う唯一のところは、同図（c）に示すように Emfit センサの電源と生体のデータを PC サーバに送信するためのイーサケーブルだけである（この介護福祉施設では、プラグの位置がベッドの上にあるため、配線が見えるが、ベッドの下にあれば配線は隠れる）。

（２）心拍データの周波数成分への変換

（１）で得られた生体データのうち、心拍数に FFT

(a)

(c)

(b)

図 7 介護福祉施設のベッドの下に敷いた Emfit センサ

（Fast Fourier Transform）をかけ、周波数成分に変換する。

（３）各人に合った中周波数成分の推定

各人の睡眠の特性に合った適切な心拍数の中周波数成分（厳密には、中周波数成分を表す範囲）を抽出する。しかし、適切な中周波数成分の範囲は人によって異なるため、進化計算の方法を用いて適切な中周波数成分を抽出するマルチ帯域フィルタ（multiband-pass filter）を見いだす⁽¹²⁾。

具体的には、最初にマルチ帯域フィルタをランダムに生成した後、心拍と体動のデータを用いて大まかに推定した睡眠段階との一致度合から推定正確率を計算し、その正確率の高いマルチ帯域フィルタを基に修正をかけ、マルチ帯域フィルタを洗練させていく。図 5 に示す例では、最初にタイプ A～Z のマルチ帯域フィルタがランダムに生成され、ある範囲の中周波数成分を通すタイプ A のフィルタの正確率は 80 %、タイプ A より大きな範囲の中周波数成分を通すタイプ B のフィルタの正確率は 75 %、二つの小さな範囲の中周波数成分を通すタイプ Z のフィルタの正確率は 10 %であることを示している。なお、各フィルタの矢印が乗っている線は、左が低周波数成分、中央が中周波数成分、右が高周波数成分の領域を表している。なお、具体的な正解率の計算に関しては文献⁽¹²⁾を参照されたい。

（４）適切な中周波数成分を抽出するフィルタの選定

（３）におけるマルチ帯域フィルタの洗練化（フィルタの学習）を繰り返すことによって、徐々に正解率の高いフィルタが生成され、ある段階での最高の正解率を持つフィルタを選択する（図 5 に示す例では、タイプ A のフィルタが選択されている）。

（５）適切な中周波数成分から成る心拍データへの変換

（４）で選定されたマルチ帯域フィルタに IFFT（Inverse Fast Fourier Transform）をかけることで、適切な中周波数成分から成る心拍データに変換する。

（６）睡眠段階への変換

（５）で得られた心拍データを 6 段階に離散化することで睡眠段階を変化する。なお、具体的な離散化に関しては文献⁽⁴⁾を参照されたい。

4. 被験者実験

4.1 被験者実験における睡眠段階推定

提案手法の有効性を検証するために、提案手法で推定した睡眠段階と 3.2 で説明した R&K 法で算出された睡眠段階を比較した。なお、後者は病院で睡眠障害を診断するために用いられる一番正確な睡眠段階を推定できる方法であり、PSG と呼ばれている。その結果を図 8 に示す。この図の縦軸は睡眠段階、横軸は睡眠時間（単位は時間）を示し、赤は提案手法で推定した睡

図 8 睡眠段階推定: R&K 方法 vs. 提案手法

眠段階, 青は R&K 法で算出された睡眠段階を示している。この図から分かるように, R&K 法の睡眠段階は細かく遷移しているのに対して, 提案手法の睡眠段階は大まかではあるが, R&K 法の睡眠段階とほぼ同じ傾向を示している。特に, 1 段階の睡眠段階のずれを許容した場合, 91.8 % と高い正解率で一致している。

4.2 介護福祉施設における提案手法の有用性

前節の結果に関して重要なことは, 介護福祉施設における高齢者の睡眠状態を把握するには, R&K 法ほどの精度 (細かな睡眠段階の遷移) は必要なく, 提案手法の大まかな睡眠段階の変化で十分であるということである。これに関して, 1. で述べた高齢者の睡眠の観点から議論すると次のようになる。

(1) 睡眠状態の把握

図 8 の 30 分 (0.5 時間) の前から 1 時間の後を見ると, R&K 法における睡眠段階はステージ 2 と 3 を行ったり来たりしているが, 提案手法では最初の睡眠段階はステージ 2 で, 真ん中はステージ 3, そして, 最後はステージ 2 に戻るという大まかな変化となっている。高齢者が深く眠れているか眠れていないかという観点では前者ほどの細かさは必要ではなく, 後者で十分に判断できる。

(2) 徘徊準備のための情報

認知症者をはじめ眠りの浅い高齢者は, 夜中に起きる回数が多く徘徊する可能性が高いが, この可能性を推定するには (1) で示したような細かな睡眠段階の遷移は必要ではなく, 眠りが浅くなってそろそろ起きそうだという大まかな傾向の方が有用な情報となる。

(3) おむつ交換や起こすタイミング

夜中のおむつ交換や起こすタイミングも (1) で示したような細かな睡眠段階の遷移は必要ではなく, 眠りが深いので, 起こさずにおむつを交換するには今の時間が適しているとか, 眠りが浅くなってきたので, 気持ち良く起こすには今が適切なタイミングであると判断するには, 大まかな睡眠段階で十分である。

図 9 次世代介護支援システム

5. 今後の展望

提案エージェントは様々な展開が可能であるが, その中でも有用な展開について述べる。

・ 次世代介護支援システム

睡眠モニタリングエージェントは, 4.2 で述べたように (1) 睡眠状態の把握 (2) 徘徊準備のための情報 (3) おむつ交換や起こすタイミングに関して有用であるため, それらを統合した図 9 に示すような次世代介護支援システムに展開中である。この図は 10 名規模の高齢者が生活している介護福祉施設内の一つのユニットを表しており, 各部屋に高齢者の睡眠状態を表示している。

具体的には, 青黒い背景の部屋の高齢者は眠りが深く, 白い背景の部屋の高齢者は眠りが浅い状態あるいは起床状態を表している。特に, 眠りの深さは “zzzz” で表現され, 緑色の z の数が睡眠段階のステージを表している (例えば, 緑色の z の数が 2 個なら, 睡眠段階のステージは 2 を意味する)。一方, 覚醒と REM 睡眠は黄色の顔で表しており, 前者が目が開いており, 後者は目が閉じている (REM という記載もある)。更に, ベットは起床状態を表しており, 現在, トイレに行っているか, 徘徊しているかのどちらかを意味している。

介護士は各人の持つタブレット, あるいは, 介護士の部屋にある PC サーバに導入された図 9 に示すシステムから高齢者の状況を得て, 適切かつ効率的な介護を実現する。

・ 見守り介護ネットワークによる在宅介護からスマートタウンへの展開

本稿は介護福祉施設で生活している高齢者を対象としてきた

図 10 見守り介護ネットワークによる在宅介護

が、現実的に考えると、全員が介護福祉施設に入居できるわけではない。この問題を解決するために、提案システムの在宅介護への展開が重要となる。その取組みに向け、図 10 に示ような高齢者、その家族、病院、介護福祉施設をネットワークで結び、ケアサポートシステムによる広範囲からの見守りを検討する。例えば、高齢者を機械的に 24 時間見守るだけでなく、深く眠れない日々が続いたら、その家族に通知し、家族から電話をかけるきっかけを与えるようなエージェントと人の協同による「つながり」を深めるケアなどが展開できる。

更に、このような在宅介護を中心とした見守り介護ネットワークを広げ、数多くの在宅に提案エージェントを導入することによって、街全体で見守りを可能にするスマートタウンにも展開可能である。

6. 結 論

本稿では、超高齢化社会における高齢者の介護支援に焦点を当て、高齢者が健康で快適な生活を送るための「睡眠モニタリングエージェント」とその展望を解説した。特に、提案エージェントは各高齢者に提供され、無拘束型のセンサで得られた心拍数と体動の生体データから睡眠段階を推定し、その情報を遠隔にいる介護士の持つタブレットや PC などに表示することを可能にする。また、睡眠精度に関しても、睡眠障害を診断するために用いられる一番正確な睡眠段階手法である R&K 法と比べたところ、1 段階の睡眠段階のずれを許容した場合、91.8 % と高い正解率で一致している。更に、R&K 法と比べて大まかな睡眠段階を推定する提案エージェントの方が (1) 高齢者の睡眠状態の把握 (2) 徘徊準備のための情報 (3) おむつ交換や起こすタイミングに関して有用であることを明らかにした。最後に、提案エージェントの展望として、次世代介護支援システムと見守り介護ネットワークによる在宅介護からスマートタウンへの展開について議論した。これらは全て、睡眠モニタリングエージェントの有用性を示している。

しかし、本稿での知見は睡眠モニタリングエージェントとそのエージェントから構成されるケアシステムの大きな可能性を示したにすぎず、今後、被験者数を増やして得られた結果の一般性を向上させることに取り組まなければならない。また、これら以外にも今後の課題として (1) 更なる睡眠段階の精度向上 (2) 5. で挙げた次世代介護支援システムの構築と、見守り介護ネットワークによる在宅介護からスマートタウンへの展開、(3) 長期間における睡眠段階データからの認知症の早期発見に取り組むことが急務である。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) のさきがけプログラムの支援によって行われている。

文 献

- (1) 国立社会保障・人口問題研究所:「日本の将来推計人口」, 2002.
- (2) 総務省, 国勢調査, 2000.
- (3) Y. Tajima, M. Nakata and K. Takadama, "Personalized real-time sleep stage remote monitoring system," *The Eighth International Symposium on Medical Informa-*

tion and Communication Technology (ISMICT 2014), 2014.

- (4) K. Takadama, K. Hirose, H. Matsushima, K. Hattori and N. Nakajima, "Learning multiple band-pass filters for sleep stage estimation: towards care support for aged persons," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E93-B, no.4, pp.811-818, April 2010.
- (5) K. Takadama, "Towards a care support system that can guess the way aged persons feel," *AAAI 2013 Spring Symposia, Data Driven Wellness: From Self-Tracking to Behavior Change*, pp. 45-50, 2013.
- (6) 睡眠学, 日本睡眠学会, pp.27-29, 朝倉書店, 2010.
- (7) A. Rechtschaffen and A. Kales, *A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stage of Human Subjects*, Public Health Service U.S. Government Printing Office, 1968.
- (8) T. Watanabe, and K. Watanabe, "Noncontact method for sleep stage estimation," *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 10, pp. 1735-1748, 2004.
- (9) R. M. Harper, V. L. Schechman and K. A. Kluge, "Machine classification of infant sleep state using cardiorespiratory measures," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, no. 67, pp. 379-387, 1987.
- (10) K. Otsuka, Y. Ichimaru and T. Yanaga, "Studies of arrhythmias by 24-hour polygraphic records. II. relationship between heart rate and sleep stages," *Fukuoka Acta. Med.*, vol. 72, no. 10, pp. 589-596, 1991.
- (11) M. Shimohira, T. Shiiki, J. Sugimoto, Y. Ohsawa, M. Fukumizu, T. Hasegawa, Y. Iwakawa, Y. Nomura and M. Segawa, "Video analysis of gross body movements during sleep," *Psychiatry Clinic Neuroscience*, vol. 52, no. 2, pp. 176-177, 1998.
- (12) H. Matsushima, K. Hirose, K. Hattori, H. Sato, and K. Takadama, "Sleep stage estimation by evolutionary computation using heartbeat data and body-movement," *International Journal of Advancements in Computing Technology*, vol. 4, no. 22, pp. 281-290, 2012.

(SIS 研究会提案, 平成 26 年 6 月 18 日受付)

7 月 28 日最終受付)

高玉 圭樹 (正員)

1998 東大大学院博士後期課程了。同年、国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 入所。2002 東大大学院講師を経て、2006 電通大助教授、2007 准教授、2011 教授、現在に至る。博士 (工学)。マルチエージェントシステム、強化学習、創発的計算手法の研究に従事。著書に「マルチエージェント学習 - 相互作用の謎に迫る -」など。IEEE、情報処理学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会など各会員。

田島 友祐

2013 電通大・電気通信学部卒。同年、同大学院情報理工学研究科博士前期課程入学、現在に至る。学士 (工学)。進化計算、睡眠段階推定に関する研究に従事。