

在宅転倒検出および緊急対応システムの開発

研究チーム名：転倒検出・緊急対応システム研究（課題番号：205010）

研究期間：令和2年4月1日～令和5年3月31日

研究代表者：モシニヤガ ワシリー 研究員：高橋伸弥、橋本浩二

はじめに

世界保健機関によると、65歳以上の最大4割以上が毎年、転倒事故を経験している。年齢とともに人体は脆弱になるため、高齢者が転倒によって深刻な合併症を伴う重傷（股関節骨折、頭部外傷など）を引き起こす可能性が高まる。一人暮らしの単身高齢者にとってはとりわけ深刻な問題である。在宅時の転倒や急病発生時、迅速な119通報あるいは別居親族等への連絡・救急搬送を期待できない場合、処置が遅れてしまい重症化（寝たきりの状態）を招く、あるいは最悪、孤独死となるといった重大なリスクが存在する。

現在、転倒検出や緊急対応が可能な在宅高齢者のための様々なシステムが存在しているが、認知症の高齢者にとっては、その利用に問題がある。例えば、ウェアラブル機器（ペンダント型や手首型機器）は安価だが紛失しやすく、転倒時に意識を失った場合は役に立たない。カメラやモーションセンサなどを使用するスマートシステムは高機能だが高価であり、センサの範囲が限定されること、種々のノイズに影響を受けること、ゆっくりな転倒の検出ができないことなどの問題がある。さらには利用者のプライバシーに懸念が残る可能性もある。また対象人物の転倒検出が可能なホームロボットも登場しているが非常に高価であり、誰でも容易に利用できるものとはなっていない。

そこで、本研究では、在宅高齢者居室内において正確・実時間で自動的に転倒および緊急対応を検出する低コストのシステムを開発した。

【研究成果】

開発したシステムは図1に示すように、高齢者宅の天井に取り付ける1個以上のセンサノードと、中央制御部から構成される。各センサノードは、ドップラーセンサ、スピーカーフォン、信号処理部と判断部から構成され、人間の行動を検知する。転倒したと認識された場合、音声認識・合成技術を用いて対象人物との自動対話を行いつつ、緊急対応の内容を決定し、LineNotify サービスで自動的に介護者へ通報する。

本研究チームでは、以下の項目に関する研究を行った。

- ①「転倒検出技術の開発」：ドップラーセンサと AI を用いて、人物の転倒を認識・判別する技術開発を行った。
- ②「ユーザーとシステム間の音声対話による緊急対応を実現する技術の開発」：音声対話により人物の状態や危険性、支援の種類を決定するための技術開発を行った。
- ③「プロトタイプ・システムの開発・評価」：①および②の成果をベースとしてシステムを試作し、技術検証を行った。

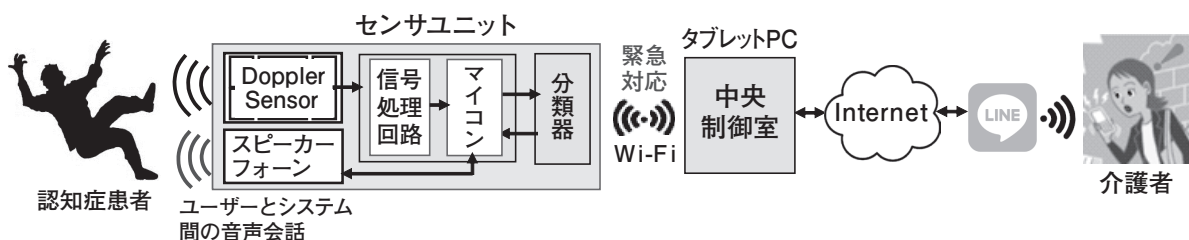


図1 開発したシステムの概要

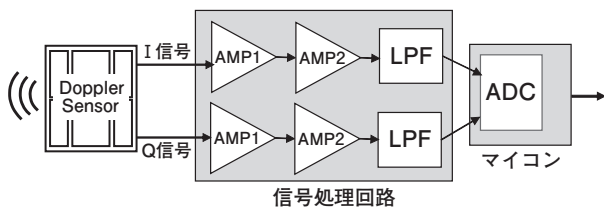


図2 信号処理回路のブロック図

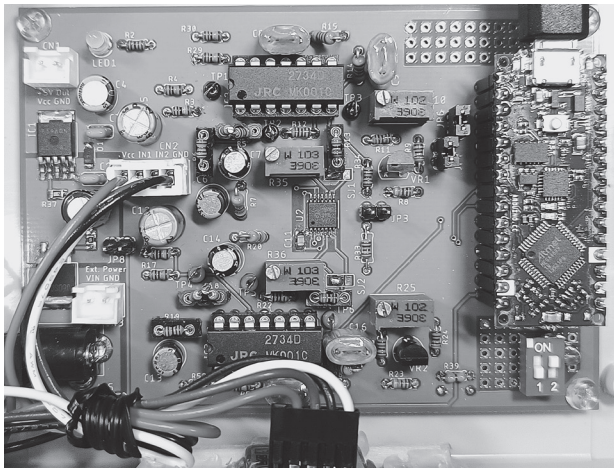


図3 24GHz帯ドップラーセンサ・センサ回路基板・制御用マイコンで構成される実験用センサユニット（センサユニット）の外観

1. 転倒検出技術の開発

近年、屋内（居室内）で使用可能な高精度かつ小型のドップラーセンサが入手できるようになったことを機に、ドップラーセンサを用いた様々な信号処理手法が提案されている。しかし、高齢者世帯への設置を考えた場合、既存の手法では高精度ドップラーセンサの使用を前提とした高度な信号処理系の実装が必要であるためコストは下がりにくく、一般世帯への普及には相当のハードルが存在する。そこで我々は、安価なドップラーセンサと信号処理回路、マイコン、および分類器を実行する組み込みコンピュータをボードで構成される小型センサユニットを提案し実際に構築した。

本ユニットは新電波法規則に対応した24GHz帯ドップラーセンサ1個を用いる。図2にセンサに接続信号処理回路の構成を示す。センサは直交検波出力IおよびQを備えており、両方とも活用することで将来的に人物の動き推定の高精度化が期待できる。I、Qそれぞれに同一構成の増幅2段（ゲイン $200 \times (200 \pm 10)$ ）およびカットオフ周波数120Hzのローパスフィルタ（LPF）をOPアンプ（AMP1、

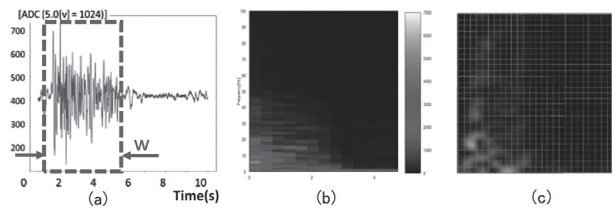


図4 センサユニットの信号処理結果。(a)はドップラーセンサの出力、(b)は時間間隔(w)で求めた信号のスペクトログラム、(c)は正規化したスペクトログラム

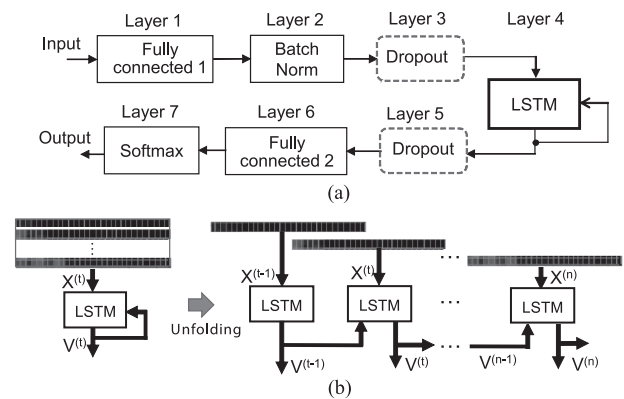


図5 (a) LSTM/RNN アーキテクチャ、(b) 時間展開操作

AMP2) で構成した。1段目はDCカットフィルタ付き非反転増幅回路構成、2段目は高精度基準電圧源をオフセット電位として用いる反転増幅回路構成とし、LPFは正帰還形とした。マイクロコンピュータ（ATmega4809）はデジタルポテンシオメータIC（MCP4631-103E）を介して2段目の増幅率制御およびPCとの通信制御を行う。また定在波の除去は制御マイコンにおいてデジタルフィルタとして実装した。実験用の筐体に組み込んだセンサユニットボードを図3に示す。

本ユニットでは、ドップラーセンサで人物の動きを常時モニタリングし、センサの出力信号（図4, a）を逐次、短時間フーリエ変換を用いてスペクトログラム（図4, b）とその正規化（図4, c）をする。そして、正規化したスペクトログラムはLong-Short Term Memoryの再帰型ニューラルネットワーク（LSTM-RNN）ベースの分類器に適用される。

開発したLSTM-RNN分類器は、7層アーキテクチャ（図5, a）を採用して転倒を識別する（図内の破線の層は学習段階でのみで使用される）。このアーキテクチャは、時間展開（図5, b）を使用して入

力データを固定長 ($n = 28$) のシーケンスを分割し、シーケンス間で $n/2$ の重複を持たせてカスケード方式で処理する。

RNN には、完全接続入力層 (Fully Connected 1) に 784 個のセル、LSTM 層に 128 個のセル、完全接続出力層 (Fully Connected 2) に 6 セルがある。出力のセルは、急転倒、動作時急転、倒緩慢転倒、しゃがむ、横になるとその他、6 クラスに対応する。クラスの確率スコアは、Softmax とクロスエントロピー誤差を使用して計算される。最大の確率スコアを持つ出力によって、現在の時間間隔 w の分類結果が決まる。危険だと判定された場合、迅速に介護者へ通知する。

2. ユーザーとシステム間の音声対話による緊急対応を実現する技術の開発

転倒したと認識された場合、音声認識・合成技術を用いて対象人物との自動対話を行う機能の実現方法について検討した。この対話機能を実現するには、まずは正確にユーザーの発話内容を音声認識することが必要となる。このとき、ユーザーにマイクを常に装着しておいてもらうことは不可能なため、ハンズフリーの音声入力を実現しなくてはならない。そこで、ハンズフリーマイク入力の実現可能性について、2 種類の音声入力装置による音声認識性能を比較した。使用した音声入力装置は、① Shenzhen eMeet technology 社の遠隔会議用スピーカーフォン EMEET Luna と② Google Home Mini の 2 種である。比較実験においては、3 種類の音声 \times 2 パターンの話し方 (はきはき / もぞもぞ) \times 雑音の有無 (テレビ音声) の 12 種の音声を 10 回ずつ入力した。この時、話者と入力装置との距離は 1.3m とした。実験の結果、①のスピーカーフォンでは、雑音無しではきはきと話したときは高精度に認識したが、それ以外では誤認識が多く、逆に②の Google Home では、雑音ありでもぞもぞと話した場合以外は高精度な認識が可能なが分かった。これらの結果から、Google Home のような入力デバイスを利用することでハンズフリーの音声対話が可能であることが示唆された。しかし、一方で Google Home を利用する場合は、ネットを経由して認識結果を取得するため、若干の遅延が発生する

こと、また利用者以外の音声を拾ってしまう可能性があることなど、いくつかの課題が残された。

次に、利用者の状態に応じて、音声合成で呼びかける際の聞き取りやすさについて検討した。本システムで対象とするユーザーは高齢であるため、かなりの割合で加齢性難聴を発症している可能性がある。加齢性難聴では、高域周波数の音の弁別機能が低下するため、摩擦音と破擦音を異聴するなど様々な問題が起きることが知られている。近年の AI 技術の進化により合成音声の品質も劇的に向上しているが、多くの場合健聴者を対象としたものであり、高齢者に聞き取りやすい音声であるとはいえないのが現状である。高齢者に聞き取りやすい音声加工法についての検討は、別の研究プロジェクトで実施しており、単語先頭子音をその子音の種類に応じて加工することが効果的であることが示されていることから、その結果を提案システムに採用することとした。

最後に、音声対話機能の基本性能を検証するために、名古屋工業大学で開発されたオープンソースの音声インタラクションシステム構築ツールキット MMDAgent を用いたプロトタイプ音声対話システムを実装した。最終的には、ドップラーセンサを用いた転倒検出機能と連携して、音声対話を開始したり、発話内容を制御したりする必要があるが、プロトタイプ音声対話システムにおいては、まずは Microsoft 社 Kinect センサからの入力と連携する機能を実装し、センサ入力情報に応じて音声対話を制御することとした。また具体的な対話機能の実装においては、当初想定していた、単純な「はい」または「いいえ」による一連の質問により状況の重大度を評価する方法は、迅速な緊急性の判断が難しいことから、よりの確に短い質問で緊急度を判断する方法を検討する必要があることがわかった。転倒検出後、「大丈夫ですか？」といったシステムからの呼びかけに対して応答がなかった場合に何らかのアラートを発出するなどの仕掛けとしたほうがよい。この問題に関しては、正確な医学的知識を持った専門家の意見を参考に検討を進めていくこととしたい。

3. プロトタイプ・システムの開発・評価

提案した技術開発成果をもとに、プロトタイプ・

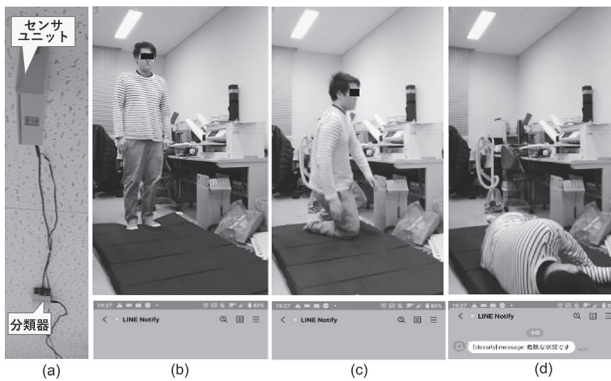


図6 (a)天井に設置したプロトタイプ・システムの写真, (b)人物の転倒の写真とそのとき介護者の携帯機器スクリーンショット

システムの開発と評価を行った。評価に際して、時間的制約のためシステム構成を簡素化する必要性があったため、実証評価については分離して実施することとなった。すなわち、ドップラーセンサを居室内の天井に固定したうえで、センサから常時出力される信号に対して連続的に分類処理を行い、実時間での人物の転倒行動を検出するシステムの構築を行った。

図6(a)にはプロトタイプ・システム写真を示す。

本システムでは、独居高齢者の居室内において人物の動きを検出した場合に、実時間転倒検出システムからの結果として、①転倒(2~3秒)、②緩やかな転倒(5秒以上)、③歩行中に転倒、④横になる、⑤しゃがむ、その他の行動のいずれかの判別を目標とした。まず、①から⑤までの判別を可能とするLSTM-RNN型分類器を構築し、そしてその評価を行った。分類器の構築に先立ち学習用データセットの生成が必要であり、我々は20代の男性6名の被験者の協力のもと①から⑤に関する多数のデータを取得し、LSTM手法に基づく学習済みモデルの生成を行った。またセンサユニットを天井に設置し、連続的にセンサから出力されるデータストリームに対して、その分類器を用いて、危険な「転倒」行動を実時間で検出し介護者に通知を送る「危険判定システム」を開発し、その実用性を検証した。

学習の段階では、入力信号は学習用データセットであったが、実際の分類処理では、ドップラーセンサで計測しながら得たデータストリームは入力バッファに蓄積され、固定時間セグメントに切り出しつつ学習時と同様の処理を経て、生成済み分類器に入

力することで、予測ラベル(1:転倒、2:緩やかな転倒、3:歩行中の転倒、4:横になる、5:しゃがむ)が得られる。5つの出力のうち最大値となったものが、その時系列データ・セグメントに対する分類結果となる。分類処理中もセンサからのデータストリームが入力バッファに格納され続けるので、時間軸をスライドさせていきながら連続的に分類処理を繰り返していくことで、実時間での動作検出を実現した。

また分類器からの結果において「転倒」動作を分類したのちに何も動作がない状況が一定時間続いた場合を、高齢者が転倒して動けない危険な状態であることを検出したものと定義したうえで、もしその条件を満たした場合、介護者に通知を行うようにした。

図6(b-d)に人物の転倒とそのとき介護者の携帯機器スクリーンの写真を示す。

実験の結果、転倒動作(①勢いよく転倒、②ゆっくりと転倒、③歩いて転倒)に対して平均92.0%、非転倒動作(④横になる、⑤しゃがむ)に対して平均98.0%、全体の平均93.4%の認識精度を達成した。また前述の条件に基づいて、危険判定情報をリアルタイムに送信・通知することができた。

【総括】

今回のプロトタイプ・システム開発は、一般的な居室を想定して実施したものである。一方でユーザーが転倒に至った事由が急性の脳血管疾患(脳卒中など)の場合、明瞭に発話できないことが想定され、かなり不明瞭な発話をどう認識するかといった課題への対応も求められよう。また浴室・脱衣所など、通常の居室とは異なる面積、空間構造および浴槽の有無がドップラーセンサ信号にどう影響を与えるのかについて、基礎的な評価は行ったものの、まだ道半ばの状況である。今後も本研究を発展・深化させていきたいと考えている。

【研究業績】

- 1) 今村賢幸, モシニヤガワシリー, 橋本浩二, “ドップラーセンサと深層学習による実時間人物転倒検出手法の開発”, 情報処理学会火の国シンポジウム2021, A5-2, 3月

- 2) Takayuki Imamura, Vasily G. Moshnyaga, Koji Hashimoto, "Automatic fall detection by using Doppler-radar and LSTM-based recurrent neural network", Proceedings of the 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (Life Tech 2022), Kyoto, Japan, March 10-12, 2022, pp.40-41.
- 3) T. Imamura, V.G. Moshnyaga, K. Hashimoto, "Fall detection with a single Doppler radar sensor and LSTM recurrent neural network", Proceedings of the IEEE 65-th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2022), Fukuoka, Japan, Aug.7-10, 2022.
- 4) H. Akaike, S. Katsuta, S. Aramaki, V.G. Moshnyaga, K. Hashimoto, S. Ikeda, "Wandering Notification System for Caregivers of People with Dementia", Proceedings of the 2022 IEEE 65-th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2022), Fukuoka, Japan, Aug.7-10, 2022.
- 5) 今村賢幸 橋本浩二 モシニャガワシリー, "ドップラーセンサと LSTM を用いた自動転倒検知システムの精度向上", 電子情報通信学会総合大会, B-19-17, 2022, 3月
- 6) 清水美紗, 橋本浩二, 今村賢幸, Vasily Moshnyaga 人物転倒検出のための 24GHz 帯ドップラーセンサユニットの設計, 電子情報通信学会総合大, B-19-16, 2022, 3月
- 7) K.Nakajima, V.G.Moshnyaga, Hashimoto, "A comparative study of conventional and CNN-based implementations of facial recognition on Raspberry-Pi", Proceedings of the IEEE 19th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Herl'any, Slovakia Jan.21-23, 2021, pp.217-222.
- 8) T. Imamura, V. G. Moshnyaga and K. Hashimoto, "Automatic fall detection by using Doppler-radar and LSTM-based recurrent neural network," Proceedings of the IEEE 4th Global Conference on Life Sciences & Technologies (LifeTech), pp. 36-37, March 2022.
- 9) T. Imamura, V. G. Moshnyaga and K. Hashimoto, "Fall detection with a single Doppler radar sensor and LSTM recurrent neural network," Proceedings of the 2022 IEEE 65-th Inter-national Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), pp. 1-4, August 2022.
- 10) 黒野明日希, 高橋伸弥, 「複数人を対象としたマルチモーダル対話システムの開発」, 情報処理学会 第81回全国大会, 4ZE-02, 2023年3月。