

介護施設用見守り巡回ロボットの開発

Development of Patrolling Robot Used for Watching Over Residents of Nursing Homes

鈴木 薪雄* 戸田 貴弘*
Makio Suzuki Takahiro Toda

楊 艶艶* 間宮 祥太郎*
Yanyan Yang Shotaro Mamiya

It is predicted that the number of care workers will become insufficient as the number of care recipients increases due to the aging of the population, and the working environment of care workers is expected to continue to deteriorate. In order to keep the care recipients safer and reduce the burden of the care workers, the authors have developed a robot that watches over the care recipients by autonomously patrolling the nursing homes. The robot, while avoiding obstacles, keeps patrolling by following the preset route. When a person is detected, the robot will begin to track him or her and simultaneously send signals to the information terminals of the care workers to notify them. In this report, the authors will describe the environmental measurement method and the control method of the robot, and also the results of the field verification experiment of a nursing home.

KEY WORDS: Patrol robot, Avoiding obstacles, Track a person, Nursing homes

1. はじめに

内閣府の報告によれば、2025年には日本の65歳以上の高齢者人口比率は30%に達するとされている¹⁾。これに伴い、介護従事者は、増加傾向にあるものの、2025年には37.7万人不足すると予測されている²⁾。これに対して、厚生労働省は介護ロボットの開発・普及の促進を進めており、①移乗介助、②移動支援、③排泄支援、④見守り・コミュニケーション、⑤入浴支援、⑥介護業務支援の6分野を「ロボット技術の介護利用における重点分野」としている。

我々は、介護施設において、少ない人数で長時間にわたり介護業務を行う夜間に着目し、夜間の施設内を自律的に見守り巡回するロボットを開発した。ロボットが常に施設内を見守っている状況を作ることで、施設職員は、おむつ交換やナースコール対応など、人が行うべき業務に集中することができ、介護サービスの質の向上、施設職員の負担軽減が期待できる。

本報告では、開発した見守り巡回ロボット「くるみ」(外観をFig. 1に示す。)について、システ

ム構成と、主要機能である見守り巡回機能の制御アルゴリズムについて説明する。更に、厚生労働省の事業委託先である公益財団法人テクノエイド協会が実施した「介護ロボット等モニター調査事業」に採択され、有用性と導入効果の調査を行ったので³⁾、その結果を示す。



Fig. 1 Appearance of KURUMI

*開発本部 開発グループ

2. 見守り巡回機能

本ロボットの主機能である「見守り巡回機能」は、「巡回」、「通知」、「追尾」の各機能を駆使して、夜間の介護施設において施設利用者を見守る機能である。

「巡回」とは、施設内の決められたエリアを自動で見回る機能である。巡回中、車椅子やワゴンなどの障害物があると自律的に回避することができる。

「通知」とは、巡回中に徘徊者や転倒者を発見したら、施設職員が持つ情報端末に音と画像でお知らせする機能である。発見場所はスマホアプリから確認することができる。

「追尾」とは、施設職員が発見者の安全を確認するまで、発見者を見失わないように追いかける機能である。追尾中も定期的に情報端末に状況が通知される。

3. システム構成

3.1 外観・仕様

介護施設に導入されるロボットは、産業用とは異なり日常的に人が接するサービスロボットであり、ロボットの安全機能は勿論ながら、その外観も重要な要素で、両者を両立させる必要がある。そこで我々は、柔らかい外装を持ち、施設利用者や職員が親しみやすく、威圧感や恐怖感を与えない外観を目指した。デザインに関しては、名古屋芸術大学に協力いただき、学生によるデザイン・コンペティションを実施した。各学生が製作したロボットの1/2スケールモデルを実際の介護施設に持ち込み、最も人気があったデザインを採用した。最も人気があったのは、「おくるみ」に包まれた赤ちゃんをモチーフとしたデザインで、ロボットの名称を「くるみ」とした。

ロボットの顔に相当する位置にパネルディスプレイを配置し、瞬きをする目を表示し、かわいらしい印象を与える表情を作っている。ランダムな時間間隔(4~5s)で瞬きをすることで機械的な印象の軽減を図っている (Fig. 2 参照)。

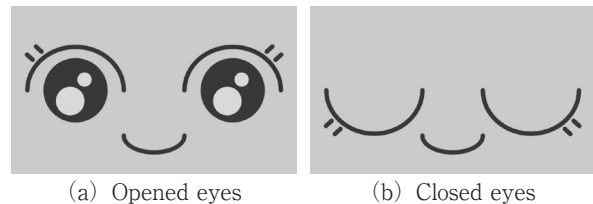


Fig. 2 Face patterns that appears on the panel display.

ロボットの基本的な仕様を Table 1 に示す。サイズは直径500mm、高さ1000mm、重量は51kgである。測域センサ、赤外線領域対応カメラ、外装に内蔵された接触検知センサ、マイクを搭載している。12V/20Ahの鉛バッテリーを2つ内蔵しており、約6時間の充電で8時間の連続走行が可能である。最大速度は2km/hである。Wi-Fi通信、LTE通信、Bluetooth通信が可能である。

Table 1 Basic specifications.

Size	Diameter: 500mm Height: 1000mm
Weight	51kg (Batteries included)
Sensors	Infrared camera, Laser range scanner, Contact detection sensors, Microphone
Exterior	Material: Urethane foam (Contact detection sensors included)
Battery	Lead battery (12V 20Ah × 2) Charging time: About 6 hours
Continuous running time	>=8hours
Velocity	Patrolling: 1km/h, Tracking: Max. 2km/h
Required aisle width	>=700mm
Communication	Wi-Fi / LTE / Bluetooth

3.2 環境認識センサ

ロボット周囲の環境情報を取得するため、測域センサ、赤外線領域対応カメラを各1基搭載している (Fig. 3 参照)。

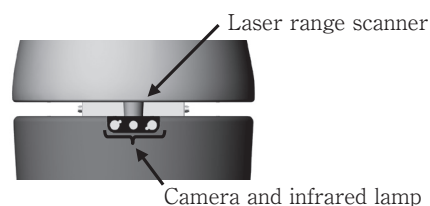


Fig. 3 Placements of the laser range scanner, camera, and infrared lamp

測域センサは床面より高さ 390mmの位置に設置され、前方の視野角 230°で水平面にある物体との距離を取得できる。測定の信頼性や、測定値の処理を行う計算負荷から、最大でロボットから半径 5mの範囲を有効な値として使用する。

カメラは床面より 358mmの高さに設置され、広角レンズを用いた前方の視野角は 132°である。また、夜間の介護施設内は一般に低照度下にあるため、暗所においても撮像できるように、赤外線 LEDランプを備える。カメラで得た画像に対し、機械学習による識別器を用いて、人や施設内に存在する物体を検出し、測域センサからの情報と総合、ロボットと物体の衝突回避及び巡回中の人認識を行う。識別器の作成にはTensorFlowを使用し、ネットワークモデルにはMobileNet-SSDを用いた。ハードウェアにはRaspberry Pi 3Bを用い、実用的なフレームレートを確保するため、Intel社のNeural Compute Stick 2を接続し計算を補助している。

各センサの検出範囲を図示したものを、Fig. 4に示す。

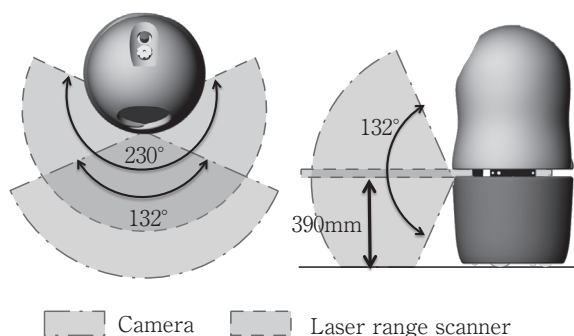


Fig. 4 Detection areas of sensors.

3.3 外装

ロボットの外装には、接触検知センサが内蔵されている。発泡ウレタン製外装の変形に伴い空気が出入りする気流を監視し、物体との衝突だけでなく、手を添える程度の接触を検出することも可能である。接触した位置の検出については気流センサのチャンネル毎となり、本ロボットでは8チャンネルを備える。物体が接触した部位がわかるため、その接触部位に応じた回避行動を自律的にとるこ

とができる。

3.4 ユーザーインターフェース

Fig. 5に示す通り、ロボットの後頭部に、操作ハンドルと非常停止ボタンを備えている。操作ハンドルは、力覚センサと接続されており、手の軽い力で直感的にロボットを移動させることができるパワーアシスト機能を実現している。非常停止ボタンは、万が一想定外の動作をした場合に、動力を遮断して停止させることができる。

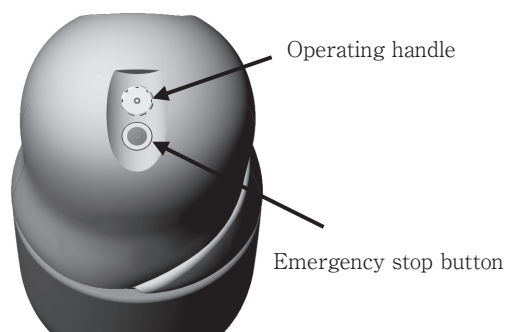


Fig. 5 Placements of operating handle and emergency stop button.

3.5 アプリケーション

一般的な情報端末（スマートフォン）に専用のアプリをインストールすることで、見守り巡回のスタート/ストップ、巡回中の人発見通知の受け取りができる。Fig. 6に画面を示す。

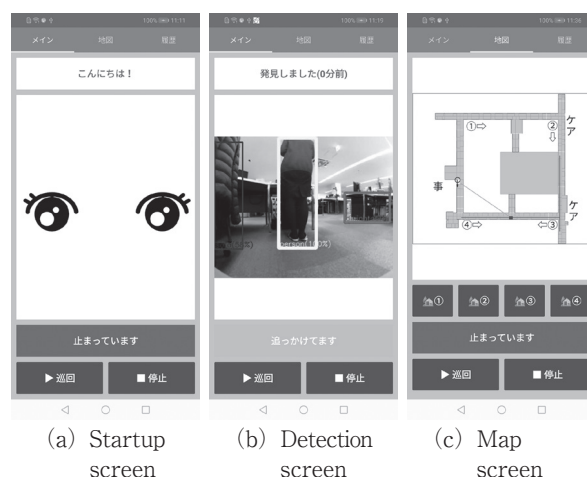


Fig. 6 Screens of KURUMI application for information terminals

4. 制御アルゴリズム

4.1 行動決定

アルゴリズムの基本的な考え方として各行動に優先度を持たせる設計とした (Fig. 7 参照)。

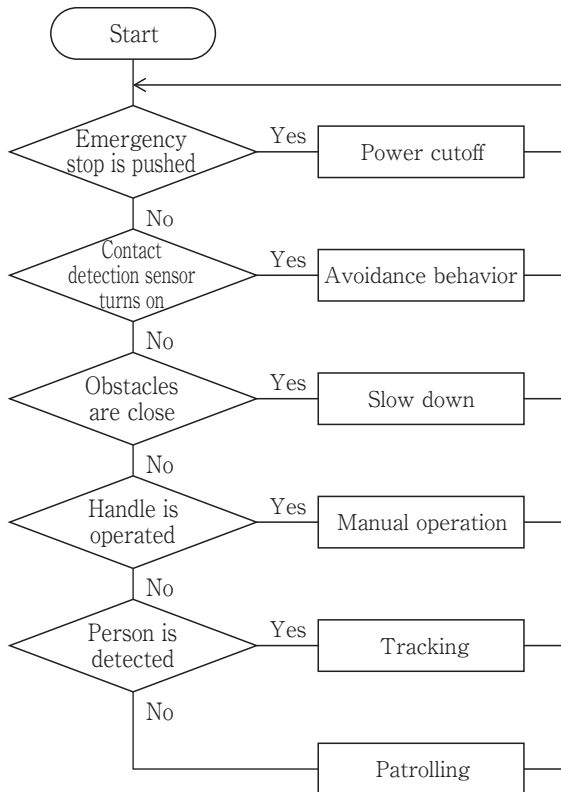


Fig. 7 Flow chart of priority action decision

具体的には、周囲やロボット自身の安全のため、非常停止ボタン押下に対する動力遮断を最優先とし、安全確保の必要性が高い行動を優先的に実行する。動力遮断以下、物体との接触状態からの離脱、障害物接近に対する減速、人による操作ハンドルでの操作、人検出した場合の追尾の順に実行する。そして、上記状態が発生していない場合に自律巡回を行う。自動走行（自律巡回、追尾動作）よりも人による操作入力を優先することで、現場の状況に応じて施設職員が対処をしやすい。

4.2 巡回経路設定

ロボットは介護施設の地図を記憶しており、その地図を頼りに移動することができる。経路の指示を簡単にするため、ロボットが通行できる場所をいくつかのブロックに分割し、そのブロック番

号で経路を指示できるようにした。ブロックの分割は、経路を設定しやすくするため、施設内の扉、出入り口、平らな壁、段差、交差点などの巡回を行うフロアの中で特徴的な地点を境目にした。ある施設に対して、上記の通りに作成した地図は、ブロックの一边が最小0.38m、最大10.8mとなっている (Fig. 8 参照)。これにより、特定の居室に移動するには、その居室前のブロック番号を使うことができる。ロボットの巡回経路はオフラインで設定を行う。ロボットが通過するブロックを指定するが、必ずしも通過するすべてのブロックを指定する必要はない。例えば、Fig. 8のように回廊になっている施設の場合、各コーナーにある4つのブロック (Fig. 8中のSub goal) を指定することで、ロボットは施設1周を走行できる。

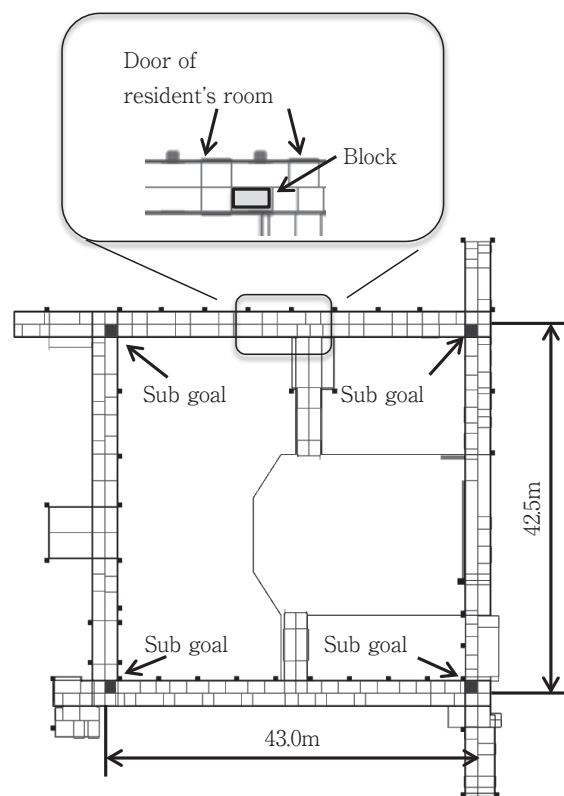


Fig. 8 A block map of corridors for robot navigation.

4.3 進行方向決定

従来型の特別養護老人ホームは、多数の部屋が廊下でつながった構造をしている。廊下には車椅子や備品搬送用の台車など、事前に予測できない障害物が存在する場合が想定される。そこで、単純に指定されたブロックに進むのではなく、ロ

ロボットを中心とした方向毎に設定した重みと各方向における障害物との距離による評価関数を用い、ロボットは評価関数の値が大きい方向へ走行するアルゴリズムを構築した。このアルゴリズムにより、地図上にない障害物をよけながら目標のブロックに到達することが可能となる。

測域センサで計測した周囲の物体を含む2次元マップ（前方3m、後方1m、左2.5m、右2.5m）を作成し、100mm四方のマスキに区切る。マスキは空地かまたは障害物かの属性を持ち、測域センサの値を離散化する時、マスキの一部または全部に物体の領域が含まれていれば障害物とする。更に、障害物に対して画像処理の1つであるモルフォロジー処理の膨張を適用し、ロボットの半径相当だけ仮想的に拡大させる。この処理により、マップにおいて、ロボットは機体の中心を自己位置として扱うため、拡大された障害物と同じマスキに侵入しないよう制御すれば、障害物との接触がない。

例として、ロボットの正面に4本脚のテーブルが壁際に置かれている状況を考える。この時、ロボットのカメラから撮影された画像を、Fig. 9に示す。測域センサは高さ390mmの位置にあるため、テーブルの脚は検出できるが、天板は検出できない。



Fig. 9 Image seen from the robot

測域センサから計測された情報に、前述の処理を施した2次元マップをFig. 10に示す。ここで、灰色のマスキは物体がない空間、黒いマスキは測域セ

ンサで測定した障害物を拡大した領域を示している。なお、黒い太線はロボットの進行方向を示している。

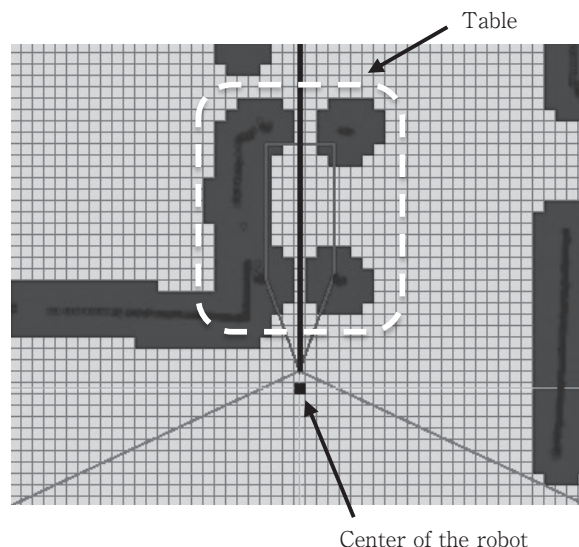


Fig. 10 Two-dimensional map measured by laser range scanner.

測域センサで障害物として検出されたテーブルの脚と脚の間に1マスキ分の幅の空間があり、ロボットが通行できることを示している。しかし実際には、テーブルの天板が干渉し、ロボットは通過できない。このような場合に対応するため、開発したロボットでは、4.5節で述べる人・物体検知システムによってマップの情報を補い、自律巡回を実現している。

進行方向決定のための評価関数について述べる。Fig. 11に示すように、ロボットを中心とするある半径の円と、ある角度毎の放射線を考える。

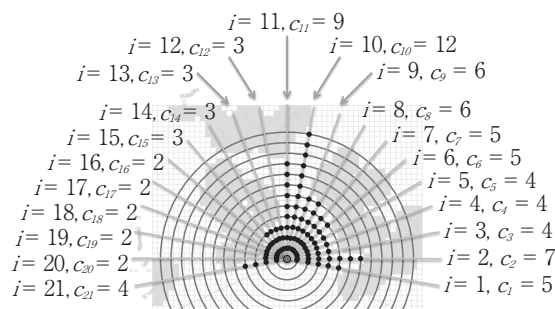


Fig. 11 Determination of the patrol direction

各放射線についてロボットに近い側から、各円との交点が存在するマスキについて物体が存在す

るかを評価し、存在しなければ次の交点が存在するマス目を評価する。上記手順を交点が存在するマス目が障害物となるか、もしくは最大検出距離となるまで繰り返す。各値に目標ブロックの方向から設定される重みをかけた値をそれぞれ評価し、値が最大の放射線の向きへ進行方向を設定する。上記を評価関数 f_i について表すと以下のようになる。

$$\max f_i = w_i c_i \quad (i = 1, 2, \dots, N-1, N)$$

w は各放射線に設定された重み、 c は各放射線が物体と交差するまでに通過したマス目の数である。それぞれの添え字 i は評価する放射線に対応する。Fig. 11において、 $N = 21$ であり、図内に c_i の値を示す。 w_i は目標ブロックの方向に近い放射線を最も大きくし、隣の放射線へ行くに従い減少するよう設定する。

4.4 走行速度制限

ロボットの進行方向に障害物が存在した場合、手動・自動のいずれで制御されている場合においても、あらかじめ求めた制動距離が障害物までの距離未満となるよう走行速度を制限する。これにより、ロボットが障害物に近づくにつれて、速度が制限されるため、万が一、ロボットと障害物が接触することになっても、その時の相対速度は小さく、衝突の衝撃を軽減することができる。

4.5 人・物体検知

ロボットはカメラで取得した画像に対して、3.2節で述べた機械学習による識別器を用い、人や物体（机、車椅子、台車、ソファなど）を検出する。物体検知識別器の学習には、ロボットのカメラで撮影した動画から、識別対象を抜き出した画像を使用した。

巡回中に人を検出した場合は、巡回を中断して発見した人を追尾する。それと同時に、人追尾動作中においては、定期的にカメラ画像を職員が持つ情報端末に送信・通知する。ただし、BLEビー

コン（Bluetooth Low Energy Beacon）を職員が持つようにして、BLEビーコンの信号を受信している間は、人検出しても通知は行わない。

また、4.3節でも述べたが、ロボットの390mm高さに備えられた測域センサではテーブルの脚しか検出できず、その形状を十分に把握することが難しい。その場合でも、物体検知識別器からの情報で測域センサの情報を補完し、障害物を回避して巡回を続けることができる。

4.6 通知と追尾

見守り巡回を行う介護施設内は、無線LANによるネットワークを構築する。それにより、ロボットと情報端末がどこにあっても通信できる。

ロボットが巡回中に人を検出した場合、施設職員が持つ情報端末へ音と画像で通知を行う。また、アプリのマップ画面からロボットの現在位置を確認できる。通知を受けた職員は、情報端末でロボットが撮影した画像を確認し、追尾を解除し巡回に戻らせるか、職員が駆け付けるまで追尾を継続するかの選択ができる。撮影した画像は、日時毎に記録されており、後日、確認することができる。

情報端末に通知した後、ロボットは、その発見した人が行方不明にならないように追尾を行う。追尾制御方法としては、ロボットが常に人に向かう方向の制御と、人までの距離を一定に保つ制御を同時に行っている。人までの距離はあらかじめ設定しており、一例として2mを設定している。この距離は検証試験中に調整を行い、夜間に発見された人がロボットに近づかれても不安にならない程度の距離とした。

5. モニター調査

5.1 調査概要

「介護ロボット等モニター調査事業」は、公益財団法人テクノエイド協会が実施した「開発中又は上市して間もない（1年以内）介護ロボット等について、介護現場における使い勝手のチェックや介護ロボット等活用に係る具体的な課題やニーズの特定等を行い、もって企業が当該機器を開発

又は改良する上で有用となる情報を収集するためのモニター調査を行う⁴⁾」事業である。我々はこの事業に採択され、社会福祉法人天竜厚生会のご協力のもと、モニター調査を行った。

調査対象とした施設は、従来型の特別養護老人ホームで87床の1階建てである。2.6mの幅を持つ廊下を一巡すると171mの経路長となる。廊下には、施設入居者が利用する車椅子が置かれており、実質では、約2mの通行できるスペース幅を持っている。ロボットを300mm/sの運用速度で動作させた場合、廊下に障害物などがあるため若干遅れがあるものの、約15分で一周することができる。調査は、延べ5日間、1日当たり22時から翌日3時までの5時間を職員だけで運用して、ロボットの性能評価とアンケートによる意見収集を実施した。

5.2 結果

巡回に関しては、位置ずれによる自己位置喪失などで1日平均2回、巡回不能となってしまったが、おおむね自律して走行できた。しかしながら、理想は1度も巡回不能にならないことであり、自己位置把握に関して、さらに改善を進めていく。

通知に関しては、1日平均10.2回の通知のうち、対象となる要介護者の発見通知は、1.2回（正答率：11.8%）に留まった。原因は、車椅子や壁の模様を人と判断してしまうことや、BLEビーコンを持っている職員を施設利用者として通知してしまうことが挙げられる。そのため、ロボットに温度センサの搭載や、BLEビーコンの発信条件を見直すなど、改良を進める。

5.3 使用者の意見

ロボット運用後にヒアリングを行い、

- 職員の目が増えることになり、実質的に見ている視野が広がり、より安全な施設運営になる。
- オムツ交換時に目の届かない離れた廊下の様子を見られるようになるのが良い。
- ご利用者が「くるみ」を怖がらない。

といった、導入の利用効果に関して好感的な意見をいただくとともに、

- 前方だけでなく全方位を見守った方が良い。
- なぜ止まっているのかわからない時がある。
- 充電手順、電源ON手順が難しい。
- 手動操作が難しい。

といった、使い勝手に関して改善すべき意見もいただいた。

6. おわりに

本報告では、介護施設の夜間業務において、要介護者の安全と施設職員の負担軽減のために開発した、介護施設用見守り巡回ロボット「くるみ」について述べた。実際の介護施設でモニター調査をした結果、技術者不在で施設職員だけでも運用できるようになったが、まだ課題は残っている。執筆時現在、新型コロナウイルスの影響で実証実験が中断しているが、今後、「くるみ」が信頼されるパートナーとなれるよう開発・改善を進めていく。

謝辞

本稿は「知の拠点あいち重点研究プロジェクト(II)」で行った研究開発であり、神奈川工科大学三枝亮准教授のご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府：令和元年版高齢社会白書（2019）4
- 2) 厚生労働省：2025年に向けた介護人材にかかる需給推計（確定値）について（2015）1
- 3) 厚生労働省：福祉用具・介護ロボットの開発と普及 2019（2020）62-63
- 4) 厚生労働省：福祉用具・介護ロボットの開発と普及 2019（2020）10