

徘徊高齢者搜索のための BLE ビーコンの電波強度分布を用いた位置推定手法

白松 俊^{1,a)} 山野 太靖¹ 岩田 彰¹ 永井 明彦^{2,1} クグレ マウリシオ¹

概要：認知症患者の増加により，徘徊高齢者の見守り技術の社会的需要が増している．本研究では，徘徊高齢者が Bluetooth Low Energy (BLE) のビーコンを保持し，探索者がスマートフォンを持って高齢者を搜索している状況を想定する．このとき，必ずしも探索者が徘徊高齢者と面識があるとは限らないため，面識が無くても声掛けの手がかりにできる精度を持つ位置推定が必要である．そのための技術的課題として，徘徊高齢者の BLE ビーコン 1 台と探索者のスマートフォン 1 台のみという状況で，多数のセンサーを使わずに電波強度の変動に対処する必要がある．本稿では，(1) 探索者の移動につれて計測地点を増やし，(2) あらかじめ測定しておいた電波強度分布を用いて計測結果を確率的に統合する，という 2 つのアプローチにより，BLE の電波強度の変動に対処した．第一段階として，徘徊高齢者が動いていない状況を仮定した測位実験を行った結果，面識が無くても声掛けの手がかりとして使い得ることを示唆する測位精度が得られた．

1. はじめに

高齢化が進むにつれ，認知症患者の数が増え続けている．2025 年には日本の認知症患者数が 700 万人，高齢者の 5 人に 1 人が認知症という事態が予想されている [1]．徘徊は認知症患者の症状の 1 つであるが，家族などの介護者にとって徘徊高齢者の探索は非常に負担が大きく，支援技術の必要性が高い．本研究グループではこれまで，Bluetooth Low Energy (BLE) のビーコン (発信機) を認知症高齢者に持たせることで見守るシステム「さがし愛ネット」を開発し，社会実験を行ってきた [2]．むき出しの BLE ビーコンは高齢者の心理的抵抗が強く所持され難いと考えられるが，この社会実験では御守袋に近いデザインの「見守袋」に BLE ビーコンを入れることで，高齢者の心理的抵抗を軽減している．認知症高齢者に持たせる機器として GPS (Global Positioning System) のセンサではなく BLE ビーコンを選択した理由は，その省電力性である．BLE ビーコンであれば長期間携行しても動作するが，GPS センサは頻繁な充電など電力供給が必要となるため，いざ徘徊行動が発生した時に動作しない恐れがある．

従来の「さがし愛ネット」システムでは，探索者が持つスマートフォンが BLE ビーコンの信号を受信したタイミングで，詳細な位置推定は行うことなく高齢者発見のアラートを発していた．しかし詳細な位置推定を行わない従来手法では，例えば「認知症サポーター」[3] 等のボランティアは探索対象の高齢者と面識がない場合も多いため，どの人に声掛けをして良いかという判断が難しい．そこで本稿では，そのような状況下でも声掛けの手がかりとして使えるような精度の位置推定手法の開発を目指す．

2. 本研究の位置付け

本研究が想定する状況では，BLE ビーコンを徘徊高齢者が保持し，探索者がスマートフォンを持って高齢者を搜索する．BLE ビーコンの電波強度，すなわち RSSI (Received Signal Strength Indicator) の値は，基本的には距離に近いほど強く，遠いほど弱くなるので，これを利用して位置推定を行う．ただし，RSSI 値の変動は非常に大きく，また周囲の環境の影響も大きいので，1 回の測定だけでは距離や位置を推定できない．

多くの従来研究ではこの電波強度の変動に対処するため，文献 [4][5] のように多数の電波発信機や多数の受信機を用いて計測回数を増やし，それらを統合するというアプローチをとっている．Jie ら [4] は，あらかじめ RSSI 値と距離の関係を表す分布を計測しておき，これを用いて多数の RSSI 測定値を統合することで，RSSI 値の変動に対処

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku,
Nagoya 466-8555, Japan

² 筑波大学
University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki
305-8577, Japan

^{a)} siramatu@nitech.ac.jp

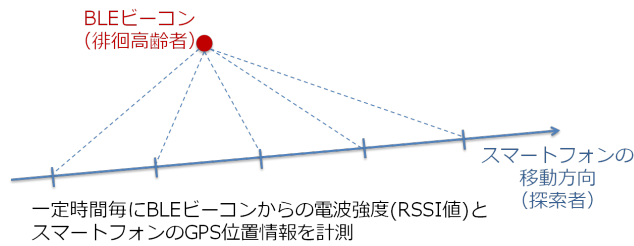


図1 本研究における電波強度変動へのアプローチの概要

している。また、Stoleru ら [5] は、格子状のグリッドを用いた確率的な位置推定手法を示した。これらの従来研究では、環境に多数の電波発信機を設置しておき、受信機の位置を推定するという状況を想定している。これに対して本研究では、徘徊高齢者が所持する BLE ビーコン（発信機）と探索者が所持するスマートフォン（受信機）はそれぞれ1つずつという状況を想定しており、従来手法をそのまま適用することはできない。

そこで本稿では図1に示すように、(1) 探索者が移動するつれて一定時間毎に計測することで、計測地点を多地点に増やし、(2) あらかじめ測定しておいた確率分布に基づいて多地点の計測結果を確率的に統合する。これら2つのアプローチにより、ビーコンもスマートフォンも1つずつしかない状況下で電波強度の変動に対処するとともに、面識のない探索者でも声掛けの手がかりとできるような位置推定精度の実現を目指す。

3. 提案手法: 多地点計測結果の確率的統合

3.1 アプローチ概要と問題の単純化

前節でも述べたように、本研究が想定する BLE ビーコンも受信機も1つずつの状況下では、RSSI 値の変動の影響を受けやすい。そこで、図1にも示したような、以下の2つのアプローチにより RSSI 値の変動に対処する。

アプローチ (1) 探索者が移動するつれ、一定時間毎にビーコン信号の RSSI 値と探索者の GPS 位置情報をスマートフォンで計測することで、計測地点を多地点に増やす。これらの計測結果を統合することにより、電波強度の変動に対処する。

アプローチ (2) 多地点での RSSI 値と GPS 位置情報の計測結果を、あらかじめ測定しておいた確率分布に基づいて確率的に統合する。具体的には、まず、事前に RSSI 観測値に対する距離の条件付き確率の分布を用意する。探索者の周辺を格子状の細かいグリッドに分割した上で、確率分布に基づき多地点での計測結果をグリッド毎に統合する。これにより、当該グリッドにおける BLE ビーコンの存在確率を求める。

なお、本稿では位置測定手法の予備的検討の段階にあり、

問題を単純化する必要があるため、以下の2つの仮定を置く。

仮定 (1) 本来はアプローチ (2) で計測結果を統合する際に徘徊高齢者の移動を考慮する必要があるが、本稿では徘徊高齢者が止まっていると仮定する。

仮定 (2) アプローチ (2) で事前に用意する分布は環境の影響を受けるため、本来であれば様々な環境で分布を測定しておき、測位環境と似た環境の分布を選択して用いる必要があるが、本稿では分布の測定環境と測位環境が同じであるという理想的な状況を仮定する。

3.2 提案手法の定式化

アプローチ (2) のためには、あらかじめ RSSI 値と距離の関係を表す事前分布を計測しておく必要がある。Jie ら [4] は多数の電波発信機を設置する状況において、そのような事前分布を用いる手法を提案した。本稿では、ビーコンとスマートフォンが1つずつという状況の違いはあるにせよ、やはり同様の分布をあらかじめ計測しておくことでアプローチ (2) に用いる。具体的には、観測された RSSI 値 $r[\text{dBm}]$ に対し、ビーコン・スマートフォン間で取り得る距離 $d[\text{m}]$ の条件付き確率 $p(d|r)$ の分布を、あらかじめ計測しておく。

このような確率分布を計測する際、RSSI 値 r を固定して距離 d を計測できれば簡単だが、実際には RSSI 観測値は固定できないため、距離 d の方を固定して RSSI 値 r の変動を計測する。すなわち、まずは距離 10m のときの RSSI 値の頻度分布、20m のときの RSSI 値の頻度分布、というように、距離ごとに RSSI 値の頻度分布を測定する。このとき、距離 $d[\text{m}]$ のとき RSSI 値 $r[\text{dBm}]$ が観測された回数を $\text{freq}(r, d)$ とおくと、RSSI 値 $r[\text{dBm}]$ のときに距離 $d[\text{m}]$ である確率 $p(d|r)$ は、一般的には以下になる。

$$p(d|r) = \frac{\text{freq}(r, d)}{\sum_d \text{freq}(r, d)} \quad (1)$$

ただし、計測回数を十分に大きくできない場合は、平滑化 (smoothing) が必要になる。具体的には、確率の積算処理を行う際などに、確率ゼロが1箇所でも混じると最終的な確率もゼロになってしまうというゼロ頻度問題 [6] に対処するために、全ての 1 を足すラプラス平滑化を行う。また、RSSI が $1[\text{dBm}]$ ずれた場合の頻度を重み α (ただし $0 < \alpha < 1$) で加味することで、計測回数の少なさを補う平滑化も行う。これらの平滑化を行った場合の確率 $p(d|r)$ は、以下のように算出される。

$$p(d|r) = \frac{\text{freq}(r, d) + \alpha(\text{freq}(r-1, d) + \text{freq}(r+1, d)) + 1}{\sum_d \text{freq}(r, d) + \alpha(\text{freq}(r-1, d) + \text{freq}(r+1, d)) + 1} \quad (2)$$

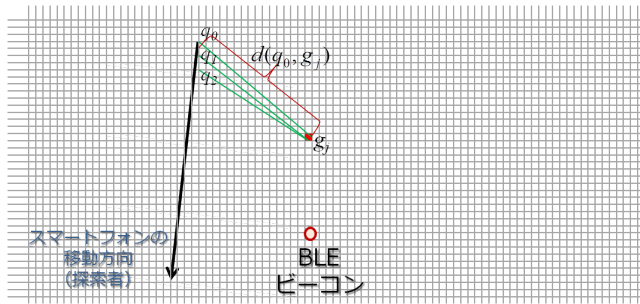


図 2 探索者のスマートフォンによる計測地点 $[q_i]_{i=0,1,2,\dots}$ とグリッド g_j の関係

上記の平滑化に加え、対数正規分布の混合分布としてのモデル化を行っても良いのだが、本稿では式 2 の $p(d|r)$ をそのまま用いて多地点計測結果を確率的に統合し、位置推定を行う。まずは図 2 に示すような格子状の細かいグリッドを設定し、グリッド毎に BLE ビーコンの存在確率を計算する。そのために、まずは探索者の移動につれて一定時間間隔 Δt ごとに m 回まで計測する地点を $[q_i]_{i=0,1,2,\dots,m}$ とおき、各計測地点での RSSI 観測値を $[r_i]_{i=0,1,2,\dots,m}$ 、計測地点 q_i からグリッド g_j への距離を $d(q_i, g_j)$ とおく。このとき、 q_i と r_i はそれぞれ時刻 $t = i\Delta t$ の計測地点および RSSI 観測値である。時刻 $t = m\Delta t$ までの観測値 $[r_i]_{i=0,1,\dots,m}$ のとき、グリッド g_j に BLE ビーコンが存在する確率 $p(g_j|[r_i]_{i=0,1,\dots,m})$ は、以下のような確率の積によって算出できる。

$$p(g_j|[r_i]_{i=0,1,\dots,m}) = \frac{\prod_{i=0}^m p(d(q_i, g_j)|r_i)}{\sum_j \prod_{i=0}^m p(d(q_i, g_j)|r_i)} \quad (3)$$

この存在確率 $p(g_j|[r_i]_{i=0,1,\dots,m})$ によりグリッド g_j を降順にソートした上で、上位 n 個のグリッドを BLE ビーコンの推定位置と見なす。

また本稿では、存在確率 $p(g_j)$ で降順にソートした時の上位 n 個のグリッドのうち、最も真の BLE ビーコンの位置に近いグリッドからの誤差を、測位誤差と見なす。すなわち、真の BLE ビーコンの位置を ble 、存在確率が k 位のグリッドを $g_{rank=k}$ とすると、測位誤差は $\min_{k \leq n} d(g_{rank=k}, ble)$ となる。

これにより、先述した 2 つの仮定を置いた場合に、確率的に徘徊高齢者の位置を推定することができる。

3.3 比較手法の定式化

提案手法では多地点の計測結果を確率的に統合したが、幾何的に統合する手法も考えられる。比較対称として、そのような幾何的な統合手法についても述べる。以下、これを比較手法と呼ぶ。具体的には、RSSI 値毎の距離の確率分布を用いるのではなく、RSSI 値毎の距離の平均を用いて計測地点 q_i を中心とする円を $i = 0, 1, \dots, m$ について描く。図 3 に示すように複数の円が描かれ、探索者の進行方向右側と左側に交点群が複数現れる。この探索者の進行

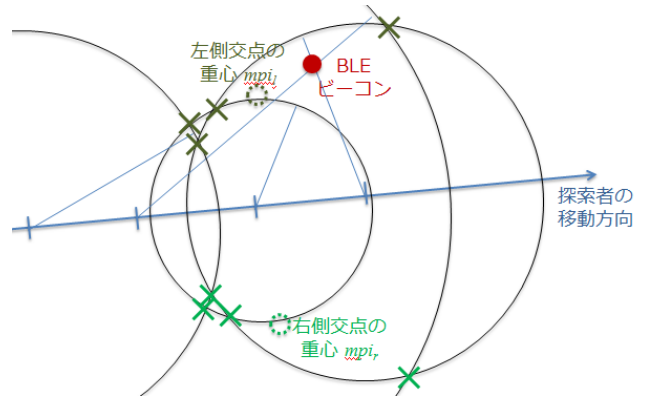


図 3 比較手法: RSSI 値毎の距離平均を半径とする円の交点の重心による計測結果統合

方向右側の交点群の重心を mpi_r 、左側の交点群の重心を mpi_l と置き、これにより BLE ビーコンの位置推定を行う。また本稿では、BLE ビーコンの真の位置とより近い方の誤差、すなわち $\min(d(mpi_l, ble), d(mpi_r, ble))$ を測位誤差と見なす。

次節では、提案手法と比較手法の測位誤差を比較する評価実験を行う。

4. 位置推定実験

4.1 実験条件

比較的広く障害物の少ない名古屋工業大学のグラウンドにおいて、実際に BLE ビーコンの位置推定実験を行った。BLE ビーコンにはホシデン株式会社製の BLE ビーコンモジュール HRM1017 を搭載し、実際の運用時と同様、御守袋に見立てた「見守袋」に入れて実験を行った。BLE ビーコンの出力電力は 1[mW] に設定した。

4.2 確率分布の計測

まずは、事前に RSSI 値の頻度分布の計測を行い、 $\text{freq}(r, d)$ および $p(d|r)$ の分布を求めた。このとき、平滑化の際のパラメータ α の値は 0.5 に設定した。図 4 に示すように、BLE ビーコンを入れた「見守袋」を植木の地上 1m 付近に結わえ付け、スマートフォンまでの距離を 2m から 50m ま



図 4 $\text{freq}(r, d)$ および $p(d|r)$ の分布計測のための設定

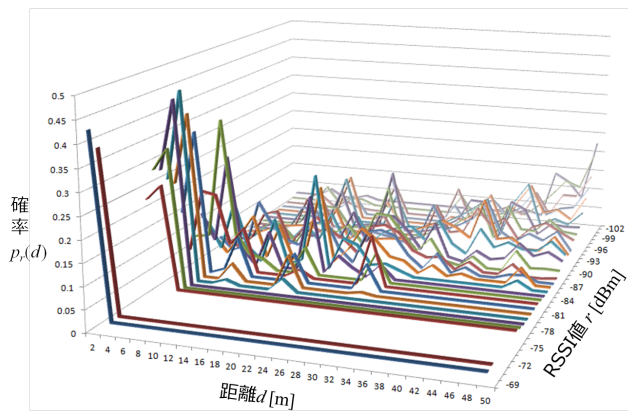


図 5 計測により得られた $p(d|r)$ の分布

で動かすことで、各距離で RSSI 値を 100 回計測した。これを平滑化して求めた $p(d|r)$ の確率分布を図 5 に示す。複数の距離でピークを持つ分布になっていることがわかる。これは、直接届く電波と地面からの反射波が逆位相になる距離で、直接波と反射波が打ち消し合うことが原因と考えられる。

4.3 位置推定実験

測定した $p(d|r)$ の分布を用いて、実際の位置推定実験を行った。図 6 に示すように、探索者が BLE ビーコンの後方 30m から接近し、追い越して 10m 先まで、計 40m のルートを歩行する。最接近時の距離が 5m になる歩行ルート A と、最接近時の距離が 20m になる歩行ルート B を設定した。探索者はスマートフォンを体の前に保持し、ルート A, B それぞれ 5 回ずつ歩行した。探索者の歩行速度は 1[m/s]、すなわち 3.6[km/h] とした。スマートフォンによる計測の時間間隔は $\Delta t = 1000[ms]$ つまり 1 秒と設定し、BLE ビーコンによる発信間隔も同じ 1000[ms] に設定したため、計測地点は $[q_i]_{i=0, \dots, 40}$ (すなわち $m = 40$ まで) となった。提案手法における格子状のグリッドのサイズは、50cm 四方に設定した。

図 7, 8 に、ルート A, B それぞれの測位誤差の平均を示す。なお測位誤差としては、前節で述べた $\min_{k \leq n} d(g_{rank=k}, ble)$

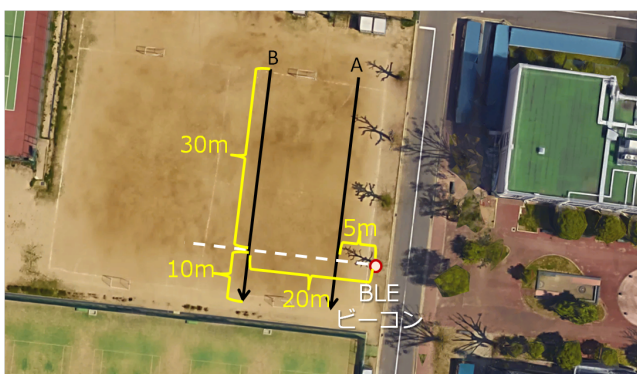


図 6 位置推定実験の設定

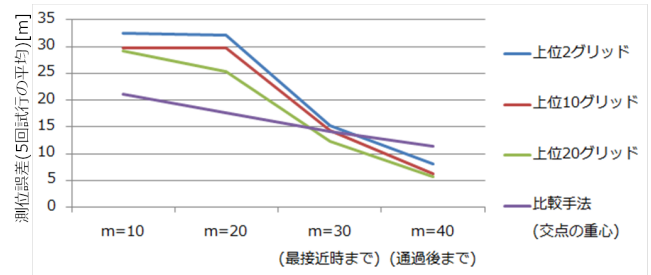


図 7 ルート A (最接近距離 5m) における測位誤差

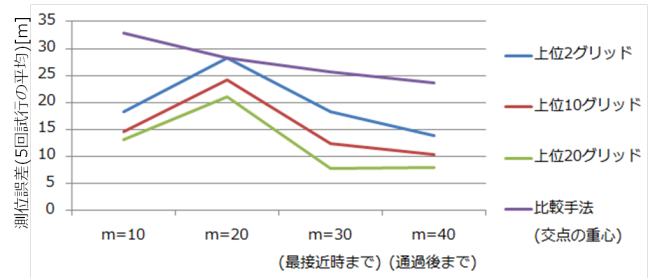


図 8 ルート B (最接近距離 20m) における測位誤差

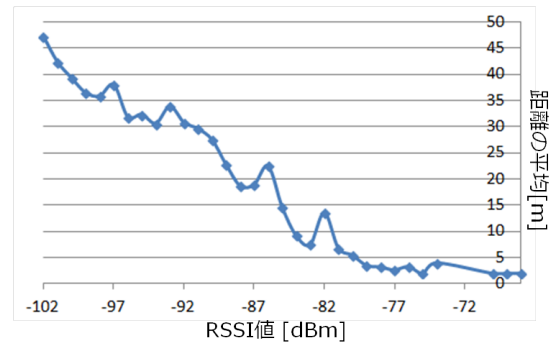


図 9 比較手法で用いた RSSI 値毎の距離の平均

および $\min(d(mip_l, ble), d(mip_r, ble))$ の値を用いている。その結果、多地点計測結果を確率的に統合する提案手法においては、ルート A では、通過後 ($m=40$, 時刻 $t=40[s]$) の最終的な測位誤差が $n=2$ で 8.07m, $n=10$ で 6.21m, $n=20$ で 5.79m であった。ルート B では、通過後の測位誤差が $n=2$ で 13.91m, $n=10$ で 10.32m, $n=20$ で 7.93m であった。

また、RSSI 値毎の平均距離を半径とする円の交点群の重心を用いる比較手法に対しては、ルート A では最初の 20m までは比較手法が優位であったが、最接近後は提案手法が優位になった。ルート B では、最初から通過後まで、全て提案手法が優位であった。比較手法で用いた RSSI 値毎の平均の距離としては、図 5 を平滑化する前の測定結果から得られた図 9 の値を用いた。

4.4 考察

実験により得られた、ルート A で $n=20$ のとき誤差 5.79m, ルート B で $n=20$ のとき誤差 7.93m という精度は、面識のない探索者による声掛けの手がかりとして充分

と言えるだろうか．その環境に存在する高齢者の数や密度に依存するため一概には言えないが，5～8m 程度の誤差であれば 1 回に見渡せる範囲に徘徊高齢者が存在すると考えられるため，声掛けの手がかりとして使えることが示唆される．また，可能性の範囲として 50cm 四方のグリッド 20 個に設定した場合，その面積は 5m² になる．この程度の範囲であれば，グリッドがあまり分散していない限りは声掛けの手がかりになり得ると予想される．この考察から，今後は存在確率の高いグリッドの空間的分散についても分析する必要性が導かれる．

また，提案手法でも比較手法でも，探索者の移動につれて計測地点を増やすというアプローチ (1) を採用している限り，探索者の進行方向に対して線対称に両側に等確率のグリッドが現れる．そのため，探索者は進行方向両側を見ながら声掛けすべき高齢者を探す必要があるという問題も残されている．よって今後は，進行方向の片側に絞り込むための手法を検討していく必要がある．

ルート B では全区間で提案手法が優位であったのに対し，ルート A でのみ比較的遠方の最初の 20m までで優位性が見られなかった原因として，ルート A は図 6 で確認できる植木により近いルートであることが影響している可能性がある．すなわち，木からの反射波の影響で $p(d|r)$ の分布が変わった可能性がある．この考察から，今後は前節で述べた仮定 (2) を廃し，様々な環境で $p(d|r)$ の分布を計測しておく必要性が示唆される．

また，問題を単純化するために置いた仮定 (1) についても今後は廃し，徘徊高齢者の移動を考慮した手法へと拡張する必要がある．

5. まとめ

本稿では，徘徊高齢者に BLE ビーコンを持たせた状況で，スマートフォンを持った探索者がたとえ面識が無くても声掛けができるように，その手がかりとして十分な精度の位置推定手法の開発を目指した．BLE ビーコンと受信機 (スマートフォン) がそれぞれ 1 つずつという状況下でも，RSSI 値の変動に頑健な位置推定を実現するために，探索者の移動につれて RSSI 値の計測地点を増やし，多地点の計測結果をあらかじめ計測しておいた事前分布に基づき確率的に統合する手法を提案した．実験の結果，最接近時の距離 5m のコースで測位誤差 5.79m，最接近時の距離 20m のコースで測位誤差 7.93m が得られた．この結果により，認知症サポーターなど面識の無い探索者の場合でも声掛けの手がかりになり得る測位精度が実現可能であると示唆された．

本稿の提案手法では，問題の単純化のため 2 つの仮定を置いていた．仮定 (1) では，BLE ビーコンを所持する高齢者の移動を考慮しなかったが，今後は高齢者の移動も考慮する必要がある．仮定 (2) では， $p(d|r)$ の分布計測環境と

位置推定環境に差異がないという理想的な状況を想定していたが，今後は様々な環境で $p(d|r)$ の分布を測定し，位置推定環境に類似した分布を選択できるように拡張する必要がある．また，本稿の提案手法では，探索者の移動経路に対し，両側に線対称に等確率のグリッドが現れる問題が残されていた．この問題に対処し，片側への絞り込み手法を開発する必要がある．さらに，存在確率上位 n 件のグリッドを，探索者のスマートフォン上でヒートマップ的に可視化するユーザインタフェースを実装することで，探索者の声掛け行動の手がかりとなることを検証していく予定である．

謝辞 本研究は，総務省 SCOPE 地域 ICT 振興型研究開発，および，JSPS 科研費 (25870321) の支援を受けた．

参考文献

- [1] 牧陽子：認知症の作業療法への提言—認知症を含む社会的弱者を包摂する地域づくりへの貢献と日本からの発信，作業療法ジャーナル，Vol. 49, No. 7, pp. 780–785 (2015)．
- [2] 永井明彦，竹尾淳，矢口隆明，村上正知，岩田彰：BLE センサと国内普及 5,700 万台のスマートフォンと利用した認知症高齢者見守りシステムの提案，第 54 回日本生体医工学会大会 (2015)．
- [3] 工藤禎子，竹生礼子，川添恵理子：認知症キャラバンメイト登録者の活動阻害要因：未活動者の自由記載の分析，北海道医療大学看護福祉学部紀要，Vol. 18, pp. 9–15 (2011)．
- [4] Jie, Z., Liu, H. and Huang, B.: A new algorithm of mobile node localization based on RSSI, *Wireless Engineering and Technology 2011* (2011)．
- [5] Stoleru, R. and Stankovic, J.: Probability grid: A location estimation scheme for wireless sensor networks, *Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 430–438 (2004)．
- [6] Chen, S. F. and Goodman, J.: An empirical study of smoothing techniques for language modeling, *Computer Speech and Language*, Vol. 13, No. 4, pp. 359–393 (1999)．