

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420340

研究課題名(和文) センサネットワークに高精度超音波計測を導入した介護環境等での動き検知システム

研究課題名(英文) Study on movement-detection system in care environment using precise ultrasonic measurement method installed in sensor network

研究代表者

疋田 光孝 (HIKITA, MITSUTAKA)

工学院大学・公私立大学の部局等・教授

研究者番号：00407157

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：(1)IFFTの周波数に対応する超音波を送信し、送受信波の相対的な振幅と位相から計算したインパルス応答を基に正確な距離情報を得る新手法を提案した。(2)時間が若干異なるインパルス応答間で引き算することにより、時間的に動かない物体の影響を取り除き、動物体のみを検知出来ることを示した。介護環境等での動きをプライバシーの侵害無しにモニター出来る可能性を確認した。(3)ロックインアンプをPCで制御する自動測定系を構築した。これらは疑似的なセンサノードとセンターノードに対応し、提案センサ装置がZigBeeセンサネットワークへ導入可能性であることを示した。

研究成果の概要(英文)：(1) We have proposed a new accurate ultrasonic distance-measurement method. Ultrasonic waves at discrete frequencies which correspond to those of IFFT procedure are transmitted. Based on the relative amplitudes and phases between the received and transmitted waves, the impulse responses can be calculated, which can provide accurate distance information. (2) We have shown that if we subtract the impulse responses at a bit different times we can detect only moving object excluding effects of non-active objects. We also confirmed the possibility of monitoring the elderly in care environment without any invasion of privacy. (3) We constructed automatic measurement systems based on Lock-in amplifier controlled by PC. They correspond to pseudo-sensor nodes and pseudo-center node, which indicate that these systems will be installed in ZigBee based sensor network.

研究分野：工学

キーワード：介護環境 超音波計測 動き検知 センサネットワーク IFFT ZigBee

## 1. 研究開始当初の背景

移動通信の進歩に伴って、最近提案されたセンサネットワークと言われる新概念がある。非常に多数のセンサ(センサノード)を配置し、各センサからの出力信号を主に移動通信と同様の手段により構築したネットワークを介して集約し、それ等のデータに基づき、家庭やオフィスの住環境の制御、ビルや市街単位での環境モニター、大規模な地域単位での自然環境状態の観察や保護などを行うものである。センサネットワークは、21世紀における携帯電話に匹敵するインパクトの大きい新概念であり、産業的にも大きく成長するといわれている。

我々は、センサネットワークをベースに病院や要介護者住宅のモニターを、超音波を用いて行う研究を進めた。病室における患者のモニターや独居老人の住状況のモニター等は今後益々重要になる。現在は主に、①起床時前後での家電器具の電源の ON/OFF をモニターするなど極めて間接的な検知方法、② CCD カメラ等により病人や住人の動きを監視する極めて直接的な手法が採用されている。前者は精度的な面で課題が多く、後者はプライバシーの面で用途は限定される。本研究は、これ等の課題に解決を与えるもので、ON/OFF モニターに比べ精度は極めて高く、CCD カメラに比べるとヒト等の動きは検知するが人物像は示さない。

## 2. 研究の目的

既存の距離センサ技術には車載用途として実用化されているものが多く、代表例にはミリ波を用いた車載距離センサ、超音波を用いたバックサイドソナー等がある。前者はミリ波の送受信装置は大型でかつ消費電力が大きく、単一バッテリーで数年の動作が要求されるセンサノードには採用出来ない。また、角度方向の情報はビームを走査することで得るため高速の信号処理が必要でセンサネットワークには本質的に向かない。後者は、バースト状に超音波パルスを送信し、反射物体からのパルスの時間遅れより距離を特定するものである。一般に反射波の包絡線検波から反射物体までの距離を測定するため、接近した複数の反射物体は識別出来ない。また、ミリ波の距離センサ同様、角度方向の情報取得にはビームの走査が必要なため複数のトランスデューサを位相を変化させ同時に動作させる必要があり、消費電力も増加する。以上のように従来手法は、特に極端な低消費電力化が必要なセンサノードには適用出来ない。また、本研究対象の一つである物体の動きに関しては全く対応できない欠点がある。

本研究では、(i) 新しい高精度超音波距離計測法を開発し、2次元に分布した複数の反射物体に関して各々に対する距離計測を可能にする。(ii) 複数の反射物体に対する若干時間の異なる距離計測結果の差より静止物体

を消去し動く物体のみを検知する。(iii) センサネットワークを想定し、我々の提案手法がセンサノード、センターノードの一部として搭載出来ることを具体的に示す。

## 3. 研究の方法

上記の特徴 (i)、(ii)、(iii) は以下の独創的な提案により実現を図った。(i) 新しい高精度な超音波距離計測法を提案した。センサノードの一部として超音波送受信機能を搭載した1対のノード間でIFFT(Inverse Fast Fourier Transform)周波数に対応したCW(Continuous Wave)超音波を送受信する。送信に対する受信超音波の相対振幅/相対位相を求め ZigBee 等でセンターノード(別電源で動作)へ送る。そこで一括IFFT処理を行うことにより、反射物体を介した送受信トランスデューサ(ノード)間のインパルス応答を導出する。インパルス応答には各反射物体からの正確な距離情報が含まれており、極めて正確な距離計測が可能である。(ii) 時間が若干異なる上記の2つのインパルス応答間の差を求めることで静止物体の影響を消去し、ヒト等の動きのみを抽出しフォローする。従来のパルスエコー法を用いた超音波距離計測の高精度化には、符合拡散方式、チャープ信号方式がある。しかし、どちらも送受信側で重い信号処理が必要であり、電池1ヶで年単位の動作が要求されるセンサノードには採用出来ない。また、上記のようにヒト等の動きの検知には全く適用出来ない。(iii) ZigBee をベースにしたセンサネットワークに本手法を導入することを提案した。測定自動化を図るため疑似的なセンサノードと疑似的なセンターノードを開発し、自動測定を行うと共に、センサネットワークへ本装置が搭載可能であることを示す。

## 4. 研究成果

## (1) IFFT 処理に基づく新超音波距離計測法

反射物体を介してトランスデューサ間で超音波を送受する場合を図1に示す(実際には、各トランスデューサは別々のセンサノードに搭載される)。簡単のため、トランスデューサは図2に示すような周波数特性を有すると仮定する。送信トランスデューサからIFFTに対応する離散的な周波数のCW超音波を送信すると(a)図)、受信波は伝搬と反射のため振幅は減少し、位相は回転する(b)図)。送信波に対する受信波の相対振幅と相対位相は、送受信トランスデューサ間のディスクリット伝達関数  $G(\omega_i)$ 、 $i=1\sim n+1$  となる。従って、IFFT処理すると送受信トランスデューサ間のインパルス応答が得られる。ここで、IFFTの周波数間隔を  $\Delta f$  とすると、時間軸では  $T=1/\Delta f$  を周期に繰り返される。従って、折り返しの影響が無視出来る  $T$  すなわち  $\Delta f$  を定める必要がある。

センサノードでは各周波数に対する  $G(\omega_i)$  すなわち相対振幅/位相を求め、ZigBee を介

してデータをセンターノードへ送る。センターノードでは別電源で IFFT 処理等を行うため、センサノードの消費電力は極めて小さく出来る。インパルス応答のピーク点から送受信トランスデューサ間の遅延時間が求まる。遅延時間に超音波の速度 340m を掛けると、反射物体を介した送受信トランスデューサ間の距離を正確に求めることが出来る。

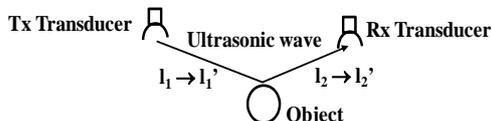


図 1 反射物体を介した超音波の送受信

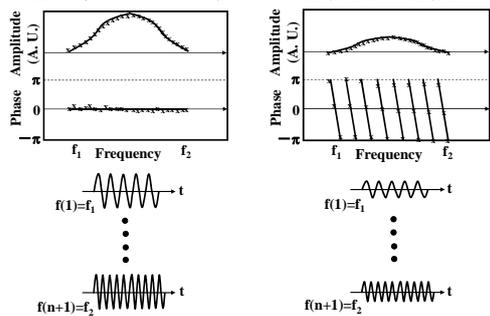


図 2 IFFT 周波数の CW 超音波の送受信

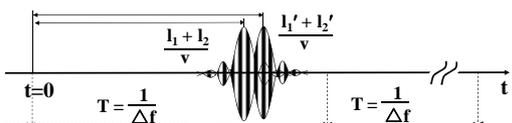


図 3 図 1 の系のインパルス応答 (IFFT 処理結果)

### (2) 新計測法による動き検知

上記の測定法は、符合拡散法のようにレプリカとの相関やチャープ信号法のようにパルス圧縮などの処理を必要としない。図 1 で  $t=t$  時の各トランスデューサと反射物体間を  $l_1, l_2$  とし、 $t=t'$  時には物体が移動し  $l_1 \rightarrow l_1'$ 、 $l_2 \rightarrow l_2'$  となるとする。 $t=t$  と  $t=t'$  における各インパルス応答の差を求めると、図 3 のような結果が予想される。 $t=t$  から  $t=t'$  の間で物体に動きがある場合は動いた先々でのインパルス応答が表れるが、両者の差を取ると動きがない場合は互いに打ち消しあい出力はない。すなわち、静止物体は消去し動物体のみを表示することが出来る。介護環境におけるモニターなどでヒトの動きのみを検知する手段として有用である。

### (3) 本提案を搭載した疑似的なセンサノードとセンターノード

ZigBee 用センサノードとセンターノードを実際に作成し、本提案の超音波による計測実験を行うのは時間と労力の関係から難しい。本研究では測定の自動化を目指して、ほぼ同等の機能を有する疑似的なセンサノードを開発した。更に、センターノードに対応する疑似センターノードも開発し、両者を合わせて実際のセンサネットワークでの計測に極めて近い動作を実現した。ただし、

ZigBee を用いた Air 部の伝送路は、付帯する装置が必要なため、実験ではケーブルによりセンサノードとセンターノード間を接続することで、等価的に実現した。

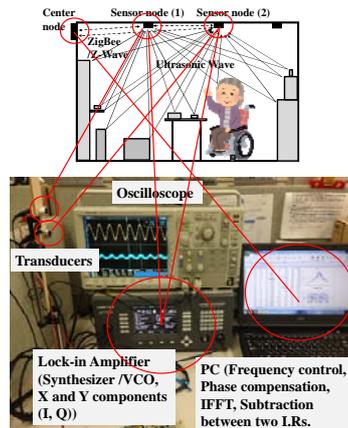


図 4 開発した ZigBee ベースの超音波送受信機能を有する疑似センサノードと IFFT 機能等を有する疑似センターノード

図 4 に開発した ZigBee ベースの超音波送受信機能を搭載した疑似センサノードと IFFT 機能等を有する疑似センターノードを示す。センサノード (1)、(2) には超音波の送受信機能が必要であり、実験では 40kHz の送信と受信トランスデューサを空間に設置することで実現した。また、各ノードは 40kHz を中心に IFFT 周波数に対応する送信信号を生成する必要がある。これは、ロックインアンプ内のシンセサイザを用いて対応する周波数信号を時系列的に生成することで実現している。

受振トランスデューサからの信号は、送信信号と比較し相対振幅と相対位相を抽出する必要があるが、これはロックインアンプに受信トランスデューサからの信号を再び戻すことにより、ロックインアンプ内の DBM (Double Balanced Mixer) を活用して、送信信号を基本にした受信信号の同相すなわち X 成分 (I) と直交すなわち Y 成分 (Q) を求めている。

これらの成分は ZigBee を介してセンターノードへ送られるが、実験ではケーブルを用いて直接センターノードに対応する PC へ伝送している。PC では、ロックインアンプからの受信信号の同相成分 (I) と直交成分 (Q) を用いて、それらを相対振幅と相対位相に変換し、更に IFFT 処理を加えることでインパルス応答を求めている。また、PC には指定された時間間隔で再び上記の一連の操作を実施するように、ロックインアンプを制御するソフトが組み込まれている。従って、異なる時間のインパルス応答が自動的に蓄積されることになる。

### (4) 本提案による距離計測の実験結果

本提案手法による高精度な距離計測の実験結果を示す。図 5(a) に示すように、実験系

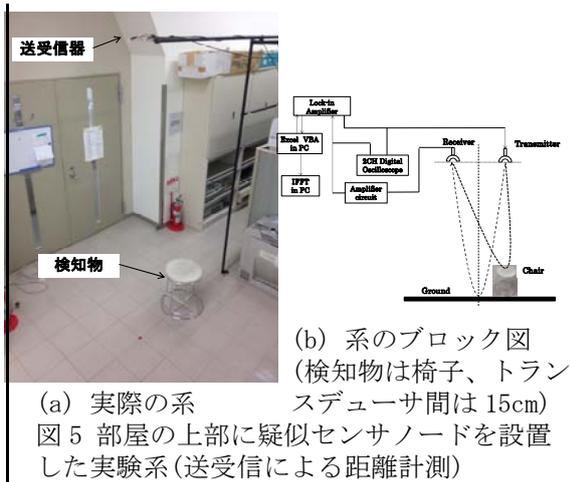
は図 4 の上図に極めて近い構成とした。図 5(b)に系のブロック図を示す。送受信トランスデューサは約 2.5m 上部に設置し、トランスデューサ間は約 15cm 離している。反射物体は検知物である丸椅子と一様な床である。

図 6(a)に、検知物の無い状態での図 5 の測定結果、すなわちインパルス応答を示す。床までの距離約 2.5m に対応するインパルス波形が明確に観測されている。図 6(b)に、検知物である丸椅子を送受信トランスデューサ間の中間に置いた場合のインパルス応答を示す。トランスデューサから椅子までの距離約 2.1m に対応して、同様にインパルス波形が明確に観測される。図 6(c)に、椅子を中心から約 30cm 離れた場合のインパルス応答を示す。インパルス波形から、椅子までの距離は若干増加することが分かる。更に、送信トランスデューサからの 40kHz の超音波は椅子へ斜めに入射する。受信トランスデューサへ反射して来る超音波は椅子の座面のふちから主に反射して来るものと考えられる。図 6(b)の座面全体から反射する場合と異なり、距離による変化と反射強度の変化が反映され、インパルス波形の振幅は小さくなって現れている。一方、床からの反射は図 6(a)の場合と全く同じ距離に同じ振幅で現れる。図 6(d)に、更に椅子を中心から約 60cm 離れた場合のインパルス応答を示す。インパルス波形から、椅子までの距離は更に増加していることが分かる。また、送信トランスデューサからの 40kHz の超音波は椅子へ一層斜めに入射する。送信トランスデューサの指向性と椅子の反射に關与する座面のふちは更に小さくなるため、インパルス波形の振幅は図 6(c)より更に小さくなって現れている。

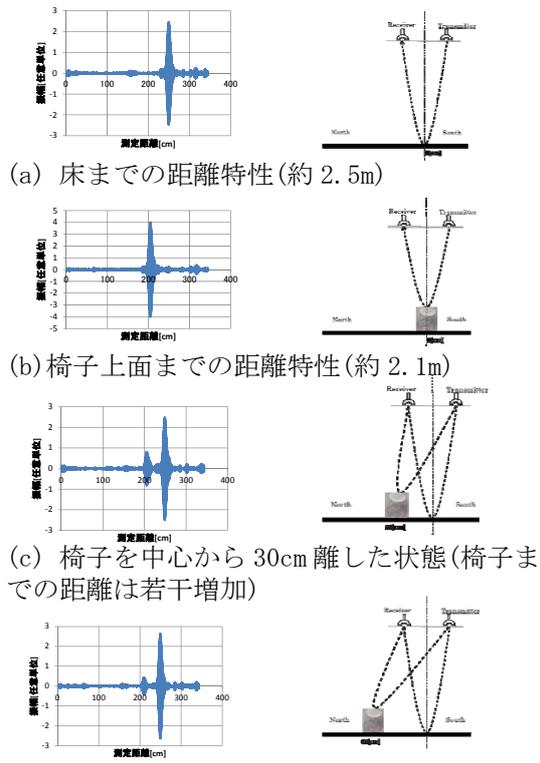
以上の結果から、図 5 のような部屋を想定した実験系において、検知物体までの距離特性が極めて正確に測定出来ることを示した。また、図 4 の疑似センサノードと疑似センターノードの有効性も示された。

(5) 本手法による動き検知の実験結果

動きの検知のためには、介護環境にあるヒト等を考慮し、動き検知を必要とする状況を想定する必要がある。ベット等で寝ているときの動きや歩行の有無を検知する必要があると考えられる。これ等は、図 5 のような上部からの検知より、横方向からの検知の方が現実的と考え、図 7(a)に示す動き検知用の実験系を構築した。図 7(b)にブロック図を示すように 3.5×2.5m 四方をカーテンで囲い、部屋を模した系とした。約 1.5m の高さを送受信トランスデューサを水平に設置し、トランスデューサ間は約 50cm とした。反射物体は 10cmφのシリンダー2本を束ねた物とし、トランスデューサと背後のカーテン間を自由に移動可能にした。反射物体はヒトに比べると小さいが、ヒトの着物は凹凸があり、移動と共に反射条件が変化する。従って、若干小さいが、定量性のある物で作成した。

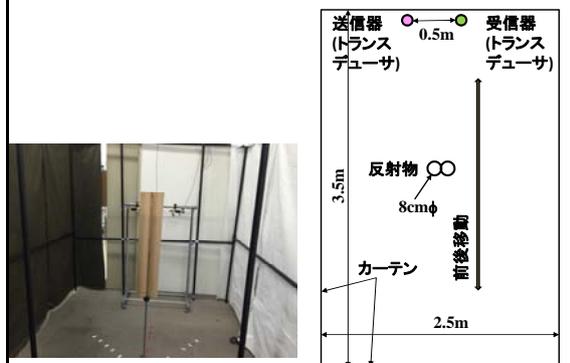


(a) 実際の系 (b) 系のブロック図 (検知物は椅子、トランスデューサ間は 15cm) 図 5 部屋の上部に疑似センサノードを設置した実験系(送受信による距離計測)



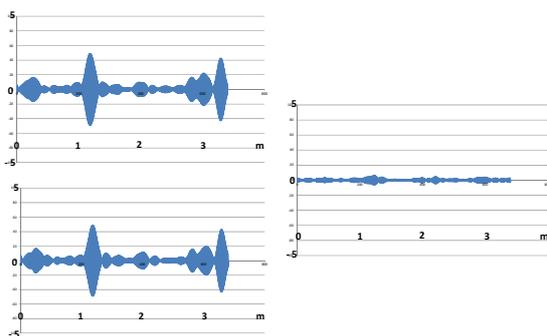
(a) 床までの距離特性(約 2.5m) (b) 椅子上面までの距離特性(約 2.1m) (c) 椅子を中心から 30cm 離れた状態(椅子までの距離は若干増加) (d) 椅子を中心から 50cm 離れた状態(椅子までの距離は増加したが、床は変化せず)

図 6 部屋を用いた距離計測実験

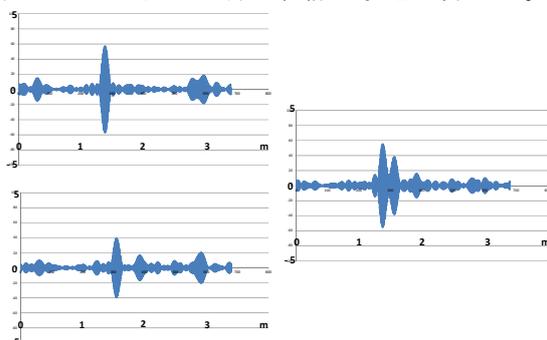


(a) 実際の系 (b) 系のブロック図 図 7 動き検知用の実験系 (3.5×2.5m 四方をカーテンで囲い、移物体は 10cmφのシリンダー2本で構成)

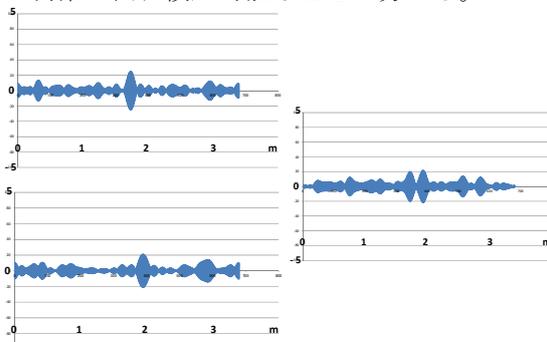
初めに、反射物体が静止状態にある場合に関して示す。図 8(a)に反射物体が 1.2m に存在したときのインパルス応答を示す。本来静止状態では、時間が経ってもインパルス応答間の差は打消し合い出力は出ないはずである。左上図は初期状態のインパルス応答、左下図は 1 分後のインパルス応答である。右図は初期と 1 分後のインパルス応答の差である。両者の差は互いにほぼ完全に打消し合い反射物を含め全ての物体が静止状態であることを表している。引き続き 1 分刻みでインパルス応答を測定した。数分の経過では初期との差には大きな変化は無いが、徐々に差が拡大する傾向はあり、伝搬条件が僅かに変化していることが分かった。測定繰り返しは 2~3 分以内に抑えるのが良いと判断される。



(a) 1.2mにある静止反射物のインパルス応答(左上:初期、左下:1分後)とそれらの差(右)。差は互いに打消し合い、静止状態が分かる。



(b) 1.4m(左上)から 1.6m(左下)へ移動した時のインパルス応答とそれらの差(右)。移動分が明確に表れ検知可能なことが分かる。



(c) 1.8m(左上)から 2.0m(左下)へ移動した時のインパルス応答とそれらの差(右)。移動分が明確に表れ検知可能なことが分かる。  
図 8 動き検知の実験結果(動く前後のインパルス応答の差より動き検知が可能)

図 8(b)に反射物体が 1.4m から 1.6m へ移動した場合のインパルス応答を示す。左上図は初期状態のインパルス応答、左下図は 20cm 移動後のインパルス応答である。右図は初期と移動後のインパルス応答の差である。差より、反射物体の 1.4m から 1.6m への移動の様子が明確に判断出来ることが分かる。

図 8(c)に反射物体が 1.8m から 2.0m へ移動した場合のインパルス応答を示す。左上図は初期状態、左下図は 20cm 移動後のインパルス応答である。右図は初期と移動後のインパルス応答の差である。反射物体が送受信トランスデューサから離れるにつれ、反射波の振幅も減少し差の振幅も小さくなるが 1.8m から 2.0m への移動の様子は明確に判断出来る。一般に反射波の振幅は距離の二乗に逆比例して減衰するため、検知範囲に対応して特に受信トランスデューサ後段の増幅器の利得等を設定する必要があることも分かる。

## (6) 総括

将来のセンサネットワークへの導入を目指し、超音波による介護環境等のモニターの研究を進めた。当初設定した 3 項目の目標：  
(i) 新しい高精度超音波距離計測法を開発し、複数の反射物体に対する距離計測を可能にする。  
(ii) 複数の反射物体に対する時間の異なるインパルス応答の差より静止物体を消去し動物体のみを検知する。  
(iii) センサネットワークを想定した自動測定システムを構築し、センサノード、センターノードに搭載出来ることを示す。以上に対して理論的および実験的な検討を行い、ほぼ当初の目的を達成する結果を得た。今後は、更に実環境に近い条件で実用化に向けた検討を行う。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- (1) Y. Kaneta and M. Hikita, "Study on movement detection in care environment at 40 kHz - Aiming at installation in sensor network -," Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), 2015.
- (2) Y. Kaneta, T. Sato and M. Hikita, "Study on movement detection in care environment using precise ultrasonic distance measurement at 40 kHz installed in sensor network," IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding (査読有), 2015.
- (3) M. Hikita, T. Sato and Y. Kaneta, "Comparison between millimeter-wave technique and ultrasonic technique for movement detection in care environment - Installed in ZigBee-based sensor network -," Proc. of International Symposium on Engineering and Applied Science (査読有),

2015.

(4) Y. Kaneta, T. Sato and M. Hikita, “Study on movement detection for care environment using precise ultrasonic distance measurement - Comparison between ultrasonic wave and sound wave at upper vocal register -,” Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), 2014.

(5) M. Hikita, T. Sato and Y. Kaneta, “Millimeter-wave-based simulation and basic experiment for ultrasonic radar sensor - Installed in sensor network -,” Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference (査読有), 2014.

(6) T. Sato, Y. Kaneta and M. Hikita, “Ultrasonic precise distance measurement and movement detection installed in sensor network,” IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding (査読有), 2014.

(7) M. Hikita and T. Sato, “Ultrasonic radar sensor installed in sensor network for care environment,” Proc. of International Workshop of Antenna and Theory (査読有), 2014.

(8) 疋田、佐藤、金田、”高精度超音波距離計測をセンサネットワークへ導入する研究—介護環境モニター等への応用を目指して—,” 第43回EMシンポジウム論文集, 2014.

(9) T. Sato, N. Tobita and M. Hikita, “Study on movement detection using precise ultrasonic distance measurement - Application to care environment -,” Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics (査読有), 2013.

[学会発表] (計 9件)

(1) Y. Kaneta and M. Hikita, “Study on movement detection in care environment at 40 kHz - Aiming at installation in sensor network -,” Symposium on Ultrasonic Electronics (Tsukuba, Japan), 2015.11.5

(2) Y. Kaneta, T. Sato and M. Hikita, “Study on movement detection in care environment using precise ultrasonic distance measurement at 40 kHz installed in sensor network,” IEEE International Ultrasonics Symposium (Taipei, Taiwan), 2015.10.12

(3) M. Hikita, T. Sato and Y. Kaneta, “Comparison between millimeter-wave technique and ultrasonic technique for movement detection in care environment - Installed in ZigBee-based sensor network -,” International Symposium on Engineering and Applied Science (Kuala Lumpur, Malaysia), 2015.9.2

(4) Y. Kaneta, T. Sato and M. Hikita, “Study on movement detection for care environment using precise ultrasonic

distance measurement - Comparison between ultrasonic wave and sound wave at upper vocal register -,” Symposium on Ultrasonic Electronics (Tokyo, Japan), 2014.12.3

(5) M. Hikita, T. Sato and Y. Kaneta, “Millimeter-wave-based simulation and basic experiment for ultrasonic radar sensor - Installed in sensor network -,” Asia-Pacific Microwave Conference (Sendai, Japan), 2014.11.4

(6) T. Sato, Y. Kaneta and M. Hikita, “Ultrasonic precise distance measurement and movement detection installed in sensor network,” IEEE International Ultrasonics Symposium (Chicago, USA), 2014.9.3

(7) M. Hikita and T. Sato, “Ultrasonic radar sensor installed in sensor network for care environment,” International Workshop of Antenna and Theory (Sydney, Australia), 2014.3.4

(8) 疋田、佐藤、金田、”高精度超音波距離計測をセンサネットワークへ導入する研究—介護環境モニター等への応用を目指して—,” 第43回EMシンポジウム (東京), 2014.6.5

(9) T. Sato, N. Tobita and M. Hikita, “Study on movement detection using precise ultrasonic distance measurement - Application to care environment -,” Symposium on Ultrasonic Electronics (Kyoto, Japan), 2013.11.20

[産業財産権]

○取得状況 (計 2件)

名称: 超音波計測システム

発明者: 疋田光孝

権利者: 工学院大学

種類: 特許

番号: 5812317

取得年月日: 平成27年10月2日

国内外の別: 国内

名称: 超音波距離計測システム

発明者: 疋田光孝

権利者: 工学院大学

種類: 特許

番号: 5442215

取得年月日: 平成25年12月27日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1022>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

疋田 光孝 (HIKITA MITSUTAKA)

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号: 00407157