

環境ノイズ検出型人感センサの開発と基礎性能評価

比嘉健太郎^{†1} 大村廉^{†1}

概要: これまで、照明や空調といった設備やシステムにおいて人の検出を行うために様々なセンサが用いられているが、センサ自体が電力を消費することや指向性・検出範囲といった特性を考慮しなければならないという問題がある。本研究ではより低消費電力な人検出センサを開発することを目的として、レクテナ技術をベースにセンサ周囲のノイズを電源およびセンサの入力信号として利用することにより人検出を行うセンサを提案する。本稿では、開発したセンサの出力電圧等の基礎性能を測定し、約 30cm までの範囲において人が居るか居ないかの検出を行えたことを示す。

キーワード: センサ, 入出力デバイス, エナジーハーベスティング, 人検出

Development and Evaluation of Environmental Noise Sensor for Human Detection

KENTARO HIGA^{†1} REN OHMURA^{†1}

Abstract: Various sensors are used to detect the person in facilities and a system such as illumination and the air conditioning, however there are problems that sensors consume energy for working and must consider the directivity of the sensor and the characteristic such as the detection range. The purpose of this study is to develop the human detection sensor which is more low consumption electricity, and we propose a human detection sensor that was based on rectifying-antenna technology, by using the noise around the sensor as a power supply and an input signal of the sensors. In this paper, we measure basic performance such as the output voltage of the sensor, and show that the sensor can detect the human in a range to approximately 30cm

Keywords: Sensor, Input-output devices, Energy-harvesting, Human detection

1. はじめに

これまで、企業のオフィスや大学、一般家庭や店舗など様々な場所で照明や空調といった電気を使用する設備が普及してきている。これら設備は電力を消費して稼働するため、稼働が必要になった時のみ稼働させるような自動制御が行われるようになっており、その自動制御のキーイベントとして特に、それら設備の直接的なユーザーとなる人間がいるかどうか、あるいは設備付近を通過したかどうかといった人を検出することが重要であり、人検出を行うための研究が多く行われている。

自動的に人検出を行う手法として、光や温度変化などの環境を観測するセンサを用いて人がいるかどうか、人が移動しているかどうかといった状況をセンサの出力から推定する手法が一般的である。人検出を行うために用いられるセンサの代表例として光センサ[1]、温度センサ[2]、音センサ[3]、イメージデバイス等があり、それぞれ人を検出するための手法等が研究されている。しかし、センサごとに検出範囲の指向特性からくる不検出やデバイスの特性上静止物体の検出が難しいといった問題点を抱えており、既存のセンサで問題を解決しようとする、同一種類で複数のセンサを用いるか、複数種類のセンサの組み合わせ等を考え

なければならなくなる。加えて、これらセンサやマイコンデバイス自体も電力を消費して稼働しており、一般にいつ設備の制御を行わなければならないかは不明であるため常に電力を消費して稼働し続けることになる。省エネ化を図るため、より省電力なセンサデバイスが研究開発されているが、個々のデバイスはいずれどこかで限界が来ると思われることと、先述のように検出精度を高めるために複数センサを用いると導入・管理コストや消費電力が上がってしまうという問題がある。

デバイス自体の省電力化の取り組みがある一方、太陽光や電磁波をエネルギー源として電力を生み出すエナジーハーベスティングの試みが行われている[4][5]。この試みは主に、商用電源等の十分な電力を電源として使用または供給できない環境下においてセンサノードの電源または充電源として使用できるように研究されているものである。

本研究の目的は、人がいるかどうか、人が近くにいるか遠くにいるかという状況を、簡易かつ省電力に検出できるセンサを開発することである。その手法として、エナジーハーベスティングにおいて電源として利用される電波や商用電源の漏洩ノイズを通じてアンテナから拾い上げ、整流昇圧を行う回路に入力することにより、ノイズ自体をセンサの電源および入力信号として利用するものを検討している。これにより、外部電源を必要とせず人検出が可能なセンサとなると考える。

^{†1} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

2. 研究背景

2.1 既存の人感センサ

人検出を行うためのセンサとして、赤外線センサ、焦電センサ、超音波センサ、カメラが代表的なものとして用いられており、先行事例におけるセンサとして考える。

赤外線センサは、物体に向かって放たれた赤外線の反射光、またはセンサに向かって放たれた赤外線を物体が遮断したことを検出するアクティブ型と環境下の赤外線または温度の変化を検出するパッシブ型の2種類に分かれており、一般にパッシブ型の方は焦電センサとして知られている。

アクティブ型は光を用いることから指向性が強く、広い範囲での人検出を行う際にやや難がある。パッシブ型(焦電センサ)は円錐状の比較的広い範囲での人検出を可能とするが、一定時間の静止時に検出ができなくなる特性がある。

超音波センサは発信した超音波の反射を検出するまでの時間をハードウェアもしくはソフトウェア上で計測することにより人や物体までの距離を検出するものである。比較的長距離でも人までの距離を出すことが可能だが、デバイスの構成上ハードウェア自体のコストや処理コスト、それに付随して消費電力が高くなるのが問題である。

カメラおよびイメージセンサは単純な画素の輝度値や色の変化から人・物体検出を行う方法や、輪郭抽出・顔認識といった技術を用いて人のみ、または特定人物のみセンシングする高度な利用が行われている。しかしそのためにハードウェア自体と処理コスト、消費電力が他に比べて高く、また特にカメラは被写人物のプライバシーについても問題がある。表1に各センサの特徴を示す。

表1 既存の人感センサの特徴

センサ	人検出	静止検出	距離	指向性 検出範囲
赤外線	可	可	不可/難	直線状 ~数m
焦電	可	不可/難	不可/難	円錐状 ~数十m
超音波	可	可	可	直線状 ~数十m
カメラ	可	可	可/難	映る範囲 ~数十m

2.2 RF ベースエナジーハーベスティング

太陽光や風力、圧力といったエネルギー源に加え、空間を伝わる電波をエネルギー源として電力供給を行う取り組みが行われている。中でも電波をエネルギー源として利用する方法は、古くは鉱石ラジオあるいはゲルマニウムラジオと呼ばれる無電源ラジオから、現在ではラジオ局やWi-Fiアクセスポイントといった無線通信設備から発される電波を共振アンテナやLC同調回路、ショットキーバリアダイオード等を用いて電力への変換を行うレクテナ技術が研究開発されている。繁田ら[5]は500MHz帯の地上デジタル放送波や2.4GHz帯のWiMAX, Wi-Fi, 電子レンジといっ

た電波発信源を利用してセンサノードへ電力を供給する試みを行い、幸野ら[6]と井上ら[7]は商用電源周波数におけるエナジーハーベスティングについて検討している。

本研究では、屋内外で利用可能性が高いと思われる商用電源ラインから発される50Hz~60Hz近辺のノイズを主要な電力源として考え、回路の実装を行う。加えてかつ電源ラインに乗って放射されるそれ以上の周波数ノイズも利用できるような、MHz~GHz帯の動作を保證する回路素子を使用する。

3. 提案する人感センサ

3.1 本研究におけるアプローチ

本研究で提案する人感センサは、空間中の電波を電源として利用するレクテナ技術をベースとしている。これは、図1に示すように周囲環境ノイズを微小電流・電圧の交流電源とみなし、交流から高圧直流への変換を行う回路により直流電圧出力を得ること、図2に示すように人が近接するとアンテナに入力されるノイズのレベルが変動し、出力電圧も変動するだろうというアイデアを基にしている。整流昇圧回路により数V程度まで電圧レベルを引き上げ、その出力電圧を外部のマイコンやシステム等に入力して閾値判定を行うことで、近接したかどうかを識別する。

本研究において、整流昇圧回路には図3に示すコッククロフト・ウォルトン回路を使用する。これは初期の粒子加速器を動作させるためにkVレベルの高圧直流をダイオードとコンデンサだけで発生させる回路だが、本研究においては微小電圧・高周波でも動作するショットキーバリアダイオードとセラミックコンデンサを使用して、微小電圧の交流入力でも動作する整流昇圧回路として構成する。これにより、表2に示すように従来のセンサにおける問題点をカバーし、より省電力で動作するセンサとすることを考える。

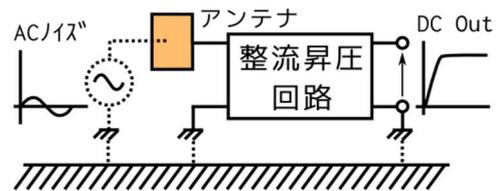


図1 周囲環境ノイズを入力とする整流昇圧動作

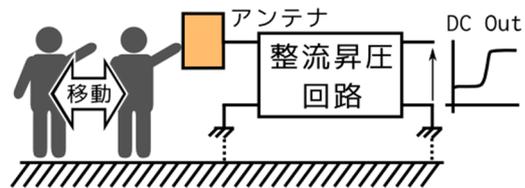


図2 人の近接状態により入力ノイズレベルが変動

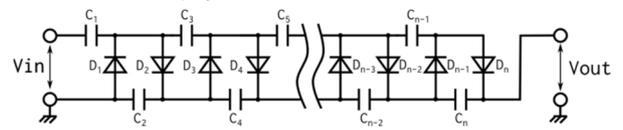


図3 n倍昇圧コッククロフトウォルトン整流回路

表 2 提案する人感センサの特徴

センサ	人検出	静止検出	距離	指向性 検出範囲
提案 センサ	可	可	可	アンテナ近傍 ~数十 cm

3.2 回路素子のパラメータ

図 4 と図 5 にコッククロフトウォルトン回路およびアンテナの実装例を示す。コッククロフトウォルトン回路のコンデンサ容量は、後述する測定実験以前の段階で 15pF~1 μF の範囲で、ダイオードに東芝製 1SS154 を用いた 4 倍昇圧および 8 倍昇圧回路としていくつか試作を行っている。その中で出力電圧が数 V 単位で得られ、かつ出力電圧変化の応答速度も数秒以内の範囲で動作するものとして、100pF から 0.01 μF、段数は 8 倍昇圧で 3.3V および 5V 系マイコンの閾値電圧 2.5V を超えることを定性的に確認している。使用するアンテナは金属であれば導線等のもので動作するが、今回は人体と容量的に結合して電圧レベルの変化が得やすいであろう面状の銅箔板を使用している。

今回漏洩ノイズの出力がどれだけ得られるかをパラメータごとに観測するため、ダイオードに東芝製 1SS154 を、コンデンサに 100pF と 0.01 μF を用いた 2 つ基板と、ダイオードに Skyworks Solutions 製 SMS-7630 および Avago Technologies 製 HSMS-286C-BLKG、コンデンサに 100pF を使用した 1 つの基板の合計 3 基板を製作し、縦 15cm、横 20cm の銅板アンテナを接続してその特性を見る。

SMS-7630 および HSMS-286C-BLKG を使用したのは 1SS154 に比べ順方向電圧が低く、整流昇圧効率の向上が見られる可能性を考慮したためである。

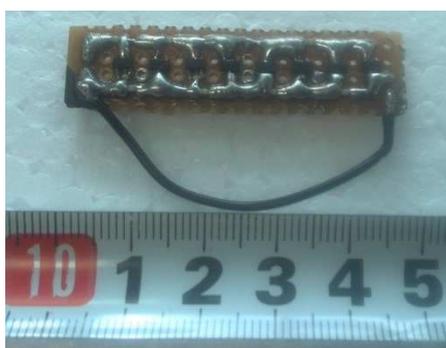


図 4 製作した整流昇圧回路基板



図 5 銅板アンテナおよび整流昇圧回路基板

4. 基礎性能測定実験

提案する人検出センサの基礎性能測定を行う実験環境を図 6 に示す。本センサはバッテリー等の電源を用いることなく動作するデバイスとして設計しているため、常に動作し続けているデバイスとなる。このため、実験環境においてデバイスに対し影響を与えると思われる電化製品は極力排除した状態で測定実験を行った。ただし測定を行うためのオシロスコープと天井の蛍光灯は例外としている。特に蛍光灯については、電源 OFF の状態と電源 ON の状態でそれぞれセンサ-人物間の出力電圧測定を行い、後に加えて照明の影響がどれほどかを判断するために、センサ-照明間の出力電圧測定も行った。

センサおよびアンテナの位置は室内壁面、床面および天井からそれぞれ 1m 以上離れた位置に固定した。センサ-人物間の距離は 200cm から 50cm までは 50cm 刻み、50cm から 0cm までは 10cm 刻みとし、センサ-人物間の角度は -90° から +90° まで 45° 刻みとしてそれぞれセンサの出力電圧測定を行った。

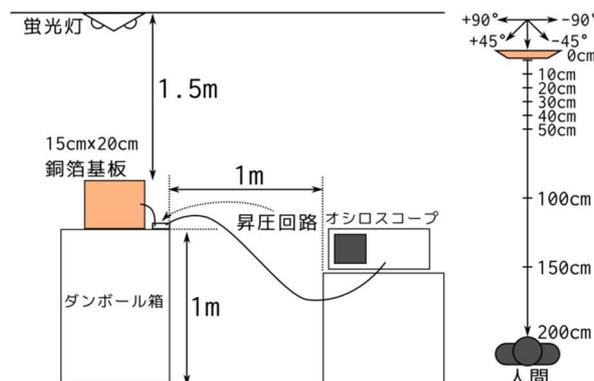


図 6 基礎性能測定の実験環境

5. 実験結果と考察

5.1 照明 OFF の時の測定結果

まず室内照明が OFF の状態での各基板のセンサ-人物間距離対出力電圧の結果を図 7 に示す。センサ-人物間角度ごとのデータを測定してはいるが、センサ-人物間角度が 90°、45°、-45°、-90° の時は 0° の時と同様の変化かつ最大電圧がやや下がる程度であったため、本稿では代表例であるセンサ-人物間角度が 0° の時の 0cm~200cm の測定データを示し、次節でも同様とする。ここでグラフにプロットした出力電圧値は、センサの出力電圧波形のうちの最大値としており、次節以降のグラフについても同様である。

環境としては人、室内に埋設されている電源ケーブルが主なノイズ伝達源となっている。それぞれの基板から得られた波形を図 8, 9, 10 に示す。ダイオードが 1SS154、コンデンサが 100pF の時は半波整流した波形に近いものとなっている。これは回路におけるコンデンサの容量が小さいために、放電時に次の充電周期が来るより早く放電しきってしまったためと考える。コッククロフトウォルトン回路

の本来の用途である安定した高圧直流電源の動作としては不十分だが、出力電圧の振れ幅と距離の関係を見るに、人検出動作としては有用とであると考える。すなわち、30cmより近い範囲においては人が近接したことをセンシングすることが可能だろうと結論付ける。0.01 μ F の時は出力電圧の振れ幅と距離は 100pF に劣るものの、比較的安定した直流波形が得られている。このため、接触するレベルの距離において安定動作を期待するなら 0.01 μ F が良いと考える。ダイオードに SMS-7630、コンデンサに 100pF を用いたものは今回の測定では 0.5V 未満の出力しか得られなかったが、逆方向電圧等の別のパラメータが要因となって正しい回路動作が行われなかった可能性があると考えている。

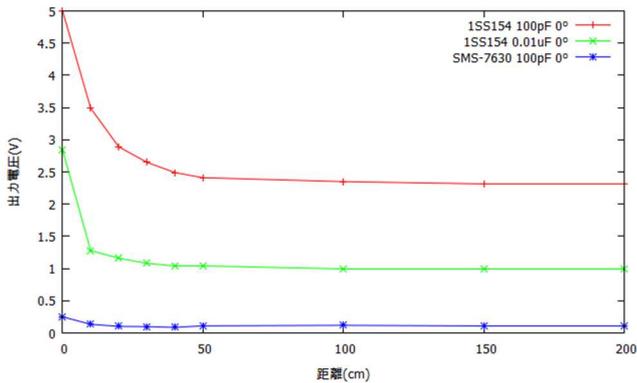


図 7 照明 OFF 時のセンサ-人物間距離対出力電圧

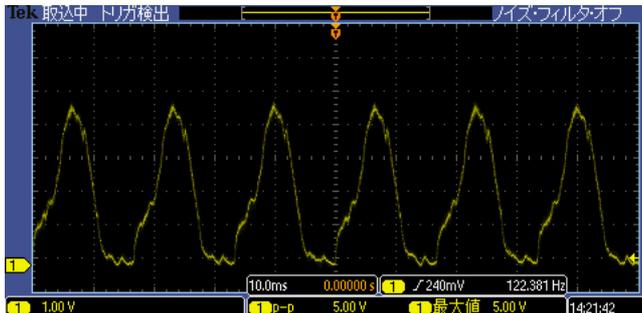


図 8 1SS154 100pF (1.0V/div), 0° 0cm の波形

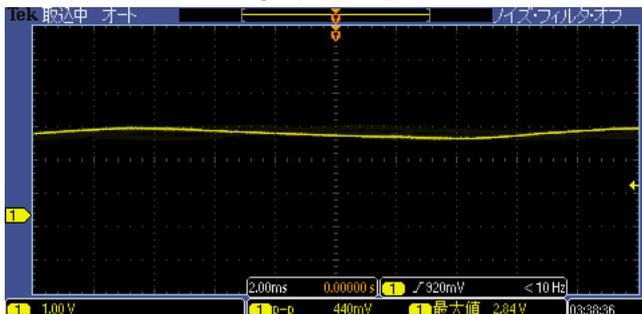


図 9 1SS154 0.01 μ F (1.0V/div), 0° 0cm の波形

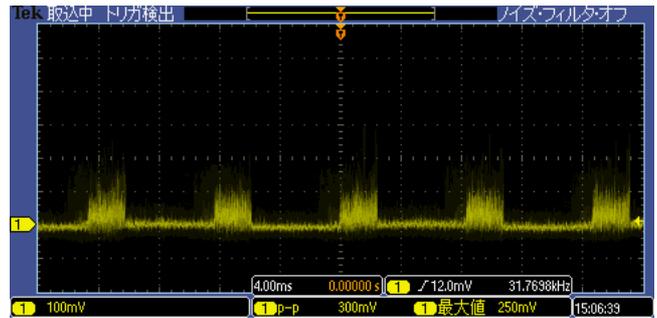


図 10 SMS7630 100pF (100mV/div), 0° 0cm の波形

5.2 照明 ON 時の測定結果

室内照明が ON の状態での各基板のセンサ-人物間距離対出力電圧の結果を図 11 に示す。環境としては人、室内に埋設されている電源ケーブル、天井の蛍光灯からのノイズが動作の主要因と思われる。図 11 において、センサ-人物間距離が 20cm から 50cm の領域において、それより遠方に人がいる場合より出力電圧が下がっている傾向が見られる。実験結果から推測して、人がセンサより遠方にいる場合は蛍光灯からのノイズを自然に受け取り電力として使用するが、人が近接することによりそのノイズの流れが人間側に寄ることによりセンサ側で受け取れる電力が小さくなったのではないかと考える。さらにセンサへ人が近接した場合、今度はセンサのアンテナと人との間で回路的に容量性の結合が大きくなり、センサ側へ蛍光灯のノイズに加え商用電源ノイズが多く流れることとなったのではないかとと思われる。

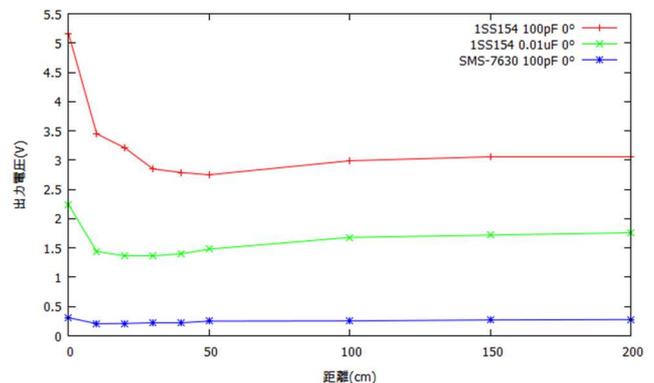


図 11 照明 ON 時のセンサ-人物間距離対出力電圧

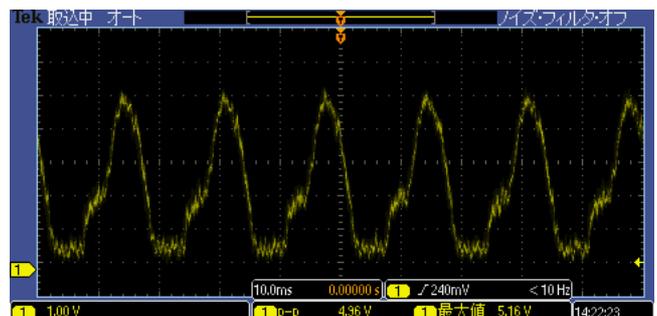


図 12 1SS154 100pF (1.0V/div), 0° 0cm の波形

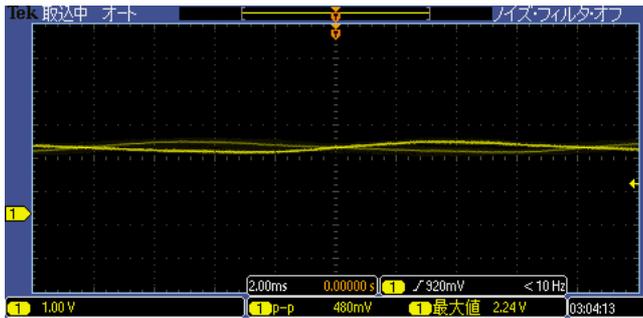


図 13 ISS154 0.01 μ F (1.0V/div), 0° 0cm の波形

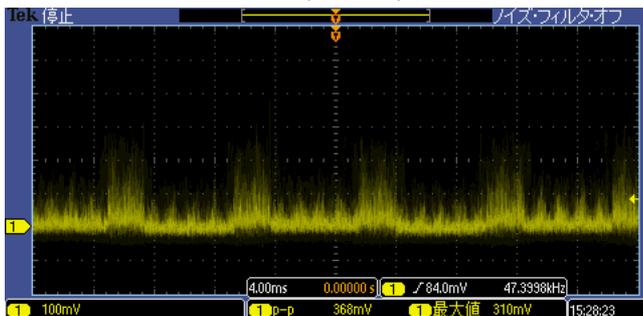


図 14 SMS7630 100pF (100mV/div), 0° 0cm の波形

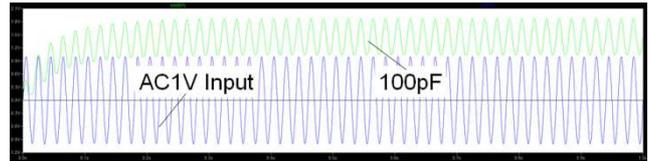


図 15 8 倍昇圧 ISS154 100pF, 交流入力(青)と出力(緑)

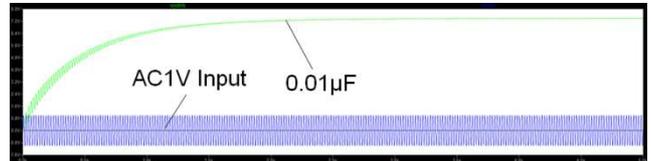


図 16 8 倍昇圧 ISS154 0.01 μ F, 交流入力(青)と出力(緑)

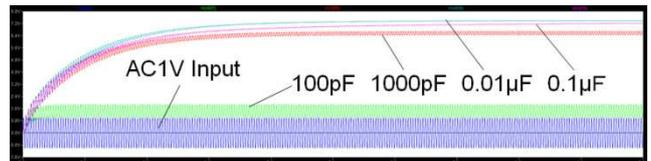


図 17 8 倍昇圧 ISS154 100pF~0.1 μ F の
 入力(青)と出力(緑)

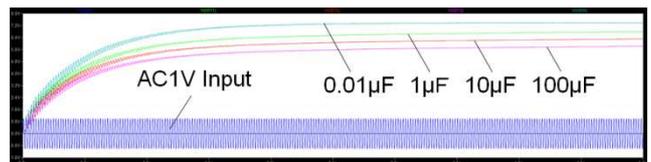


図 18 0.01 μ F と 1 μ F~100 μ F の
 入力(青)と出力(緑)

5.3 容量値を変更した回路のシミュレーション

測定実験を行ったうえで、コンデンサの値を 100pF から 0.01 μ F の間とした場合やそれ以上の値とした場合に波形や出力電圧がどう変化するかを見るため、ダイオードを ISS154, コンデンサを 100pF~100 μ F までとして LTSpice によるシミュレーションを行った。まず 100pF の時と 0.01 μ F の時とで実験時に見られた波形とシミュレーションの波形が一致するかどうかを確認する。図 15 と図 16 にそれぞれ 100pF の時と 0.01 μ F の時のシミュレーション結果を示す。交流入力については、測定実験時の環境ノイズそのものを測定することが困難で今回行っていないため、波形を完全に一致させることが難しいため、60Hz1V とした。100pF 時の出力電圧は約 2.0V, 0.01 μ F 時の出力電圧は約 7.2V となり、交流入力の供給電圧や電流等の条件が測定実験とシミュレーションとで異なっている可能性があることから測定実験と出力電圧に違いはあるが定常状態の波形はおおむね同様の波形であることがわかる。図 17 に 100pF から 0.1 μ F までの場合のシミュレーション結果を、図 18 に 0.01 μ F および 1 μ F から 100 μ F までのシミュレーション結果を示す。これらから、シミュレーションにおいては 0.01 μ F の時が最大電圧に至るまで最も早く最大電圧が大きいうという結果を得た。すなわち、人がアンテナに充分接触してノイズを供給した場合においては、0.01 μ F の時が最大電圧を外部に出力できると考える。

5.4 照明の影響についての測定実験

センサに対して天井の照明が発生させているノイズの影響がどれほどかの測定を行った。図 19 に示すように、センサ-照明間角度は 0° のみで、距離は 0cm から 200cm まで 10cm 間隔でセンサ-照明間の距離と出力電圧の測定を行った。図 20 にその測定結果を示す。結果から、0cm~100cm 程度の距離で出力電圧が 5V にもなり、照明の ON/OFF の切り替わりが発生する屋内環境下においては識別が困難になる可能性が高いと判断する。120cm 以降から概ね一定の出力電圧が得られていることから、人検出を行うためには最低 120cm 以上センサと照明の距離を取ることで識別能力に支障が出にくくなることと考える。



図 19 照明の影響調査測定の実験環境

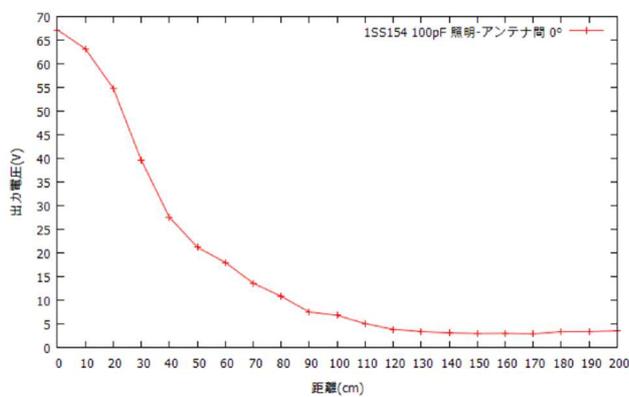


図 20 センサ-照明間の距離対出力電圧

6. まとめ

本研究では低消費電力な人検出センサを開発することを目的として、環境電波を電源とするレクテナ技術の基礎をベースとする、接触または近距離での非接触状態で人がいることを検出するセンサを提案し、デバイスとして実装した。提案したセンサは、交流入力-直流出力の整流昇圧回路として知られるコッククロフトウォルトン回路と、レクテナ技術のアプローチを組み合わせ、かつ容量性の導体である人体が回路の一部に触れるか近接することで人体自体がアンテナとなり交流ノイズを入力し電源およびセンサの入力信号として使用するものである。これにより、その環境の電波を電源兼センサの電圧出力として使用することで外部電源を持たずに動作する人検出センサとして構築した。

提案したセンサの評価実験として、まず人がいるかどうかの識別が出来るほどの出力電圧が得られるかどうかを確認するため、人、センサ、実験室内の商用電源ライン、室内照明以外の要因を極力排除した環境で、センサ-人物間の距離、角度とそれに対する出力電圧の測定を行った。実験結果として、室内照明が OFF の状態では 1SS154 と 100pF の組み合わせのセンサのアンテナ正面においてセンサ-人物間距離が 30cm から 50cm の間で 2.5V 付近の電圧出力を

得て、その地点をしきい値として人物が近接したか離れたかを識別可能であると結論付けた。室内照明がオンの状態では、センサ-人物間距離が 30cm から 50cm 付近において一度出力電圧が下がり、20cm 付近から上昇するという傾向が見られ、センサ-照明間の距離と出力電圧からその影響を調査した。これらを踏まえて、まず人検出を行うことが可能なのであることが示されたと考え、次に人検出を明瞭に行いたい際には照明との距離を考慮してセンサを設置する必要があると考察した。

今後、実際の生活行動において人検出を行い、外部システムへの通知を行うセンサデバイスとしての実装を検討する。

参考文献

- 1) 河内山和則, 川島信, 永瀬和宏, “半導体赤外線センサを用いた人間の動線トラッキングシステム構成法の研究,” 電子情報通信学会 信学技報 USN2012-48, pp113-118, 2012.
- 2) 漆畑亮, 下坂正倫, 野口博史, 佐藤知正, 森武俊, “焦電センサを用いた住居内行動分類システムにおけるセンサ配置 —センサ数節約と分類精度準最大化を目的とする配置法—,” 日本機械学会, No.10-4, 2010.
- 3) 高橋和哉, 中村勝一, 山崎克之, “超音波測距センサーによる人群観測ネットワークの開発と評価,” 電子情報通信学会 信学技報, pp45-50, 2009.
- 4) Christian Renner, Stefan Unterschütz, Volker Turau, Kay Römer, “Perpetual Data Collection with Energy-Harvesting Sensor Networks,” ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 11, No.1, Article 12, 2014.
- 5) 繁田亮, “RF エネルギーハーベスティングを用いたセンサノードの実装とキャパシタ漏れ電力を考慮した間欠動作制御手法,” 東京大学平成 25 年度修士論文, 2013.
- 6) 幸野奨, 濱田博史, 宮山貴大, 山下幸三, 吉野純一, “商用電源周波数の電界強度計測に基づいた環境発電の検討,” サレジオ工業高等専門学校研究紀要 39, pp15-18, 2012.
- 7) 井上伸一郎, 内山悠, 田代晋久, 脇若弘之, “商用周波数磁気ノイズを積極的に回収するエネルギーハーベスティング用空芯コイルの開発,” 日本 AEM 学会誌 vol.19 No.2, pp143-148, 2011,