

# ワイヤレスヘルスマニタリング

Wireless Health Monitoring

大槻知明

## Abstract

日本は、高齢化社会として世界的に知られている。高齢化に伴い、高齢者の一人暮らしも増えている。また、高齢者が犯罪の被害に遭う割合も増加している。高齢化社会の進展と同時に、人々の健康意識も高まっている。知的環境は、人々の健康をサポートし、高齢者も安心して暮らせる安全・安心な社会実現のための基盤として期待されている。本稿では、まず、プライバシーを保護しつつ、高齢者等を見守る技術として、人や物の行動・状態を検出・識別可能な電波センサを紹介する。また、人々の健康をサポートする技術として、ドップラーレーダを用いて人の呼吸や心拍の情報を非接触で取得する非接触センシングを紹介する。

キーワード：電波センサ，ドップラーレーダ，アレーセンサ，非接触センシング

### 1. はじめに

日本は、高齢化社会として世界的に知られている。高齢化に伴い、高齢者の一人暮らしも増えている。厚生労働省「人口動態調査」によると、家庭内事故で毎年約2万人の高齢者が命を落としている。また、高齢者が犯罪の被害に遭う割合も増加している。高齢化社会の進展と同時に、人々の健康意識も高まっている。知的環境は、人々の健康をサポートし、高齢者も安心して暮らせる安全・安心な社会実現のための基盤として期待されている。本稿では、まず、プライバシーを保護しつつ、高齢者等を見守る技術として、人や物の行動・状態を検出・識別可能な電波センサを紹介する。また、人々の健康をサポートする技術として、ドップラーレーダ<sup>(用語)</sup>を用いて人の呼吸や心拍の情報を非接触で取得する非接触センシングを紹介する。

### 2. 電波センサ

上記したように、近年、防犯対策や高齢者・乳幼児等

の安全対策など、より安全・安心な環境に対する要求が高まっている。防犯対策の一つである侵入検知では、赤外線センサや磁気センサ、カメラなどが多く用いられている。これらには長所も多数あるが、幾つかの問題点もある。例えば、赤外線センサや磁気センサは、一般に誤検知が多く、検知範囲も局所的である。また、カメラはプライバシーの侵害につながり、家の中への導入は困難である。

これらの問題を解決するセンサとして、電波センサが提案されている<sup>(1),(2)</sup>。電波は物陰や部屋の隅まで届くため、広い範囲を検知できる。また、カメラのように、映像によるプライバシー侵害の心配がない。従来の電波センサの多くは、電波の受信信号強度(RSSI)の変化に基づき、侵入等を検出する。しかし、RSSIは、何も起きていないときにも変動するため、誤検知が頻繁に発生する恐れがある。

これに対し、筆者らは、アレー信号処理に基づく電波センサ(アレーセンサ)を提案・開発している<sup>(3),(4)</sup>。図1にアレーセンサの概念図を示す。アレーセンサは、受信機にアレーアンテナ<sup>(用語)</sup>を用い、アレー信号処理により受信信号を信号強度成分と信号到来方向成分の二つの電波特徴量に分解する。送信機と受信機が固定されていても、対象とする環境が変化すれば、これら電波特徴量は変化する。そこで、これら電波特徴量の時間変化に基づき、人や物の行動・状態を検出・識別する。また、

大槻知明 正員：シニア会員 慶應義塾大学理工学部情報工学科  
E-mail ohtsuki@ics.keio.ac.jp  
Tomoaki OHTSUKI, Senior Member (Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.97 No.8 pp.702-706 2014年8月  
©電子情報通信学会 2014

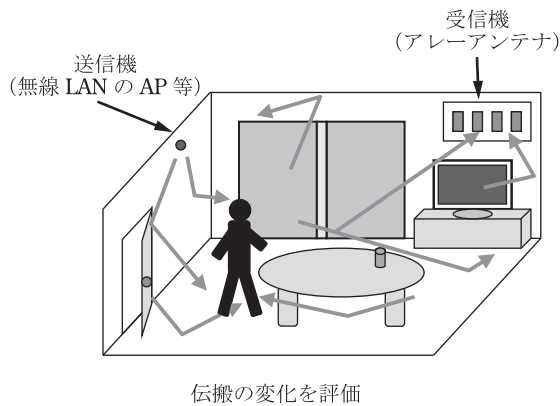


図1 アレーセンサ概念図

電波特徴量に基づく機械学習を用いることで、より複雑な行動や状態も識別できる。RSSI のみに基づく電波センサと異なり、アレー信号処理により得られる電波特徴量も用いる。そのため、高い侵入検出率を達成できるだけでなく、従来の電波センサでは実現が困難な状態・行動識別や位置推定も可能である<sup>(5),(6)</sup>。アレーセンサは、使用する電波の周波数や帯域幅などを問わず、変調波・無変調波であることも問わない。そのため、無線 LAN の信号や地上デジタル放送信号など、既存の信号を用いることができる。また、送信機のアンテナ数や送信機数が複数の場合にも適応でき、送信機数が多い場合には検出特性が改善される。更に、復調処理を必要としないので、受信機も簡易な構成で実現できる。

アレーセンサの特性例として、一般のオフィス環境において、人がドアを開けて部屋に入った後、歩行と静止を繰り返し、ドアを開けて退出した場合の評価関数の変化例を図2に示す。横軸は観測時間 (s) に対応する観測時刻、縦軸は第1固有ベクトルに基づく評価関数  $P(t)$  である。図に示されるように、ドアを開けると伝搬環境が大きく変化するため、評価関数の値が大きく変化する。侵入後、歩行中は評価関数が大きく変化し続け、停止した場合、その変化は小さくなる。また、停止した場合の評価関数の値は、侵入前の評価関数の値より小さくなる。このように、アレーセンサはカメラを用いることなく、人の侵入や、室内で動いているか静止して

## ■ 用語解説

**ドップラーレーダ** ドップラー効果による周波数変移を観測することで、観測対象の距離や移動速度を観測できるレーダ。

**アレーアンテナ** 複数個の放射素子を直線状や平面状などに配列し、その全部あるいは一部を励振し、励振電流（電圧）の振幅と位相を制御して所望の放射パターンを得るアンテナ。ただし、アレーセンサでは、単に複数個のアンテナを配列したものを指す。

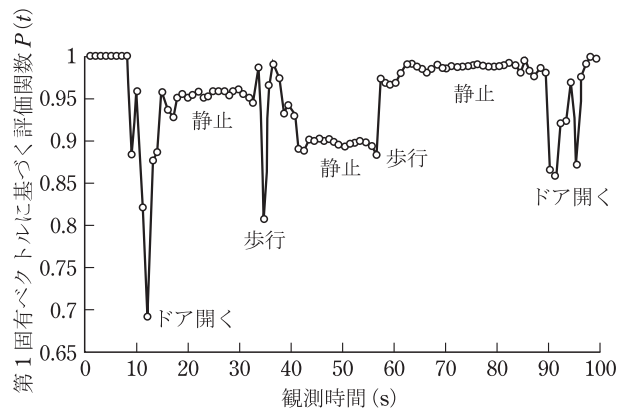


図2 人がドアを開けて侵入し、静止・歩行を繰り返した後、ドアを開けて退出した場合の評価関数の変化

いるかを検出できることが分かる。アレーセンサを使えば、カメラの死角に人が潜んでいる場合にも検出できる。

アレーセンサを見守りに用いる場合、見守り対象の人の行動を識別する必要がある。例えば、転倒して動かなくなっているのか、座って休んでいるのかなどの動きに余り差がない行動・状態を識別する必要がある。そのような識別のために、筆者らはサポートベクトルマシン (SVM: Support Vector Machine) などの機械学習を用いた状態識別法を提案している<sup>(5),(6)</sup>。

アレーセンサの、浴室での行動識別例を表1に示す<sup>(6)</sup>。表1から分かるように、アレーセンサは浴室環境で、高い精度で複数の行動を識別できる。また、アレーセンサを車に設置し、カーセキュリティとしての不審行動検出についても同様に、「車の周囲のうろつき」や「のぞき込み」といった不審行動を高い精度で検出できることを確認している。

人の位置を推定する電波センサとして、電波トモグラフィーが提案されている<sup>(7)</sup>。電波トモグラフィーでは、対象環境を多くの送受信機で囲み、各送受信機間の受信電力変動に基づき、対象環境内の人の位置を推定する。高い位置推定精度を得られるが、数多くの送受信機で対象環境を囲む必要がある。アレーセンサも、人や物の位置を推定できる<sup>(6)</sup>。事前に各位置での電波特徴量を測定してデータベースを作成する。観測時は、観測した電波特徴量とデータベースを照合し、最も一致する位置を推定位置とする。すなわち、電波特徴量に基づく位置指紋法と言える<sup>(8)</sup>。高い精度を達成できるが、位置指紋法のため、データベースの作成が必要である。

## 3. ドップラーセンサ

高齢化社会の進展や人々の健康意識の高まりに応えるように、様々なヘルスケア（健康管理）機器の開発も進

表1 アレーセンサによる浴室での行動識別例<sup>(6)</sup>

	無人 (識別結果)	歩行 (識別結果)	起立 (識別結果)	着座 (識別結果)	転倒 (識別結果)	識別精度 (%)
無人 (実際)	846	1	0	0	0	99.88
歩行 (実際)	8	1,957	56	23	26	94.54
起立 (実際)	2	60	269	20	54	66.42
着座 (実際)	0	69	201	302	25	50.59
転倒 (実際)	0	204	158	37	1,082	73.06

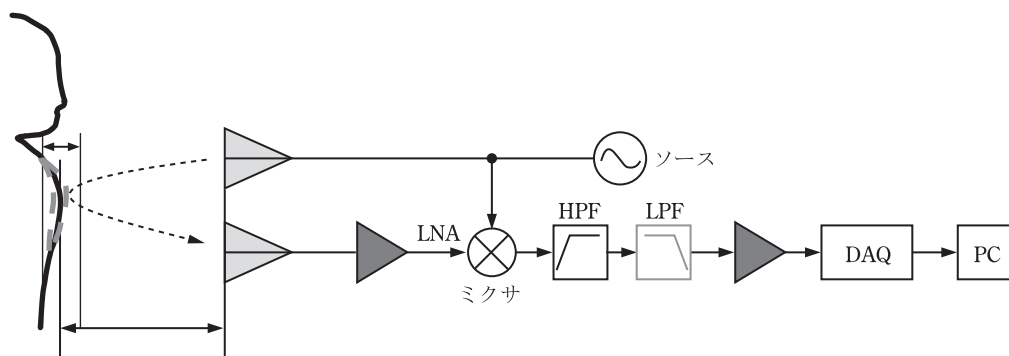


図3 ドップラーレーダを用いた非接触生体信号モニタリング

んでいる。患者・被介護者・健康な人を問わず、生体情報を非接触で収集できれば、被験者の負担が減り、より自然な状態の生体情報を取得できる。また、モニタリング時の制約が減るため、様々なアプリケーションが期待される。例えば、勉強・デスクワーク時や、運転時等の生体情報を非接触で収集できれば、それらの情報からストレス度や集中度・覚醒度などを推定でき、効率改善や事故防止に使える。非接触センシングによる生体情報の取得方法として、カメラを用いて映像から取得する手法があるが、プライバシーや心理的負担を考えると、カメラの使用は好ましくない環境が多い。これに対し、ドップラーレーダを用いて、人の呼吸や心拍の情報を非接触で取得する非接触センシング法が、複数の企業や研究機関から報告されている。ドップラーレーダは、受信信号を増幅させることで体表面の微小な動きをも捉えることができ、心肺の状態を知るのに利用できる<sup>(9)~(15)</sup>。

ドップラーレーダは、ドップラー効果による反射波の周波数変化を測定し、対象物の速度変化などを検知する。検出対象の生体信号である心拍由来の信号成分は微小であるため、高い分解能が得られる10 GHz以上の周波数が用いられることが多い。特に、移動体検知センサ用と認可されている10.525 GHz及び24.15 GHzを用いたものが多い。医療診断用の超音波検査では、一般に3~14 MHzの周波数が用いられる。これに比べ、10 GHz以上の周波数は、人体への影響が小さく、より安全な計測が可能である。図3に、ドップラーレーダを用いた非接触生体信号モニタリングのシステムモデルを示す。呼吸や心拍に伴う体表面の微小な動きを、ドップ

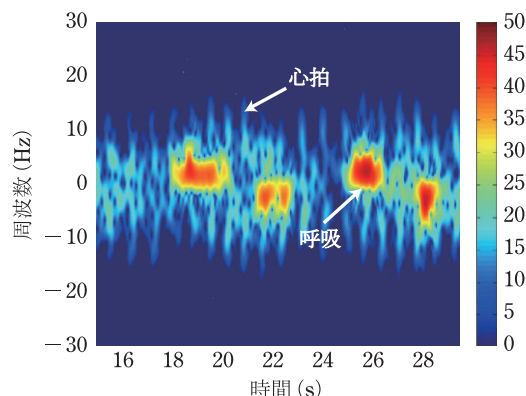


図4 呼吸及び心拍のドップラースペクトル

ラーレーダによって検出する。心拍データからは、心臓の自律神経緊張の指標となる自律神経活動値が得られる<sup>(13)</sup>。この自律神経活動値は、ストレスや緊張の客観的指標として活用されている。ドップラーレーダにより得た呼吸及び心拍のドップラースペクトルを図4に示す。なお、呼吸や心拍情報は、アレーセンサを用いても得られる。

前記したように、心拍由来の信号成分は微少であり、そのため体動の影響を受けやすい。体動の影響を低減する手法の一つに、高解像カメラと深度カメラをドップラーレーダに加えて併用した手法がある<sup>(9),(10)</sup>。高解像カメラと深度カメラを用いて人体胸部の位置を正確に特定し、ドップラーレーダを照射する。心臓の位置に正確に照射することで、心拍成分の信号強度が高まり、体動

の影響を相対的に低減できる。また、複数のドップラレーダを対向させて用いた手法も提案されている<sup>(11)</sup>。当該手法はトレッドミル使用中の被験者で実証され、体動の許容範囲は10 cmに制限されるものの、体動の影響を除去できることが報告されている。これらの手法は体動の影響を低減できるが、カメラ設置によるプライバシー侵害の問題や、体動の許容範囲など、使用条件が非常に限定的といった問題がある。文献(12)では、呼吸や体動の成分はフィルタによって除去可能としているが、実際には呼吸や体動は複雑な動きを示す<sup>(11)</sup>ため、単純なフィルタリングによる特定周波数の除去では、体動の影響を十分に除去できない。

受信信号を時系列で詳細に解析するためのツールとして、短時間フーリエ変換がよく用いられる。短時間フーリエ変換は、解析対象信号を局所で定常信号とみなして、各周波数強度を算出する。心拍に由来する信号は、一見すると定常信号に見えるが、実際は自律神経の影響により心拍の間隔は1拍ごとに変化し、ストレスの影響で変化する<sup>(13)</sup>。したがって、解析対象信号を定常信号とみなす短時間フーリエ変換では、時系列での信号変化を十分に捉えられない場合がある。非定常信号の解析に適した手法に、ウェーブレット変換がある。ウェーブレット変換は、低周波数成分に対して長い時間窓を、高周波数成分に対して短い時間窓を適用するため、非定常信号の解析に適している。ウェーブレット変換により、体動による大きな信号変動中に、僅かに現れる心拍由来の成分を検出できる。ウェーブレット変換を心拍信号解析に適用した例に、例えば文献(14)、(15)がある。ウェーブレット変換では、源信号との比較にマザーウェーブレットと呼ばれる波形が用いられ、そのマザーウェーブレットの拡大率に相当するスケールファクターから、ウェーブレット周波数(擬似周波数)が算出される。ウェーブレット周波数スペクトルを観測すると、呼吸と心拍に由来するピークが現れるため、0.2 Hz 前後の成分を呼吸、1 Hz 前後の成分を心拍と決定することで、呼吸と心拍の頻度が分かる。ただし、文献(14)、(15)の実験は、被験者の状態は着座静止に限定された状態であり、体動による信号のひずみは十分考慮されていない。体動を伴う場合、ウェーブレット周波数スペクトル上の呼吸と心拍のピークを検出できなくなってしまう。

受信信号中の呼吸成分が、心拍成分に対してなだらかな変化を示すことに着目して、非心拍成分を多項式近似によって再現し、源信号からそれを差し引くことで、心拍成分を抽出する手法が提案されている<sup>(11)</sup>。しかし、当該手法で用いられる多項式の次数は経験則に基づくものであり、呼吸以外の体動が含まれる場合は、適切な多項式の次数が変化する可能性が高く、やはり着座静止状態に限って有効な手法と考えられる。

筆者らは、ウェーブレット係数の時系列変化を観測した際に、心拍以外の呼吸や体動の影響によっても変動を示すスケールファクターがある一方で、心拍の発現時のみにウェーブレット係数の値が大きくなるスケールファクターが存在することを実験により確認した<sup>(16)</sup>。このことに着目し、事前に心拍成分のみに反応を示すスケールファクターを学習することで、体動を含む作業中でも心拍を検出できるシステムを提案している<sup>(16)</sup>。提案システムのフローチャートを図5に示す。まず、心拍の検出に適したスケールファクターを、体動のない静止状態で学習することで決定する。次に、ウェーブレット周波数は用いずに、学習した一定のスケールファクターのみに関してウェーブレット係数を求め、その係数を時系列

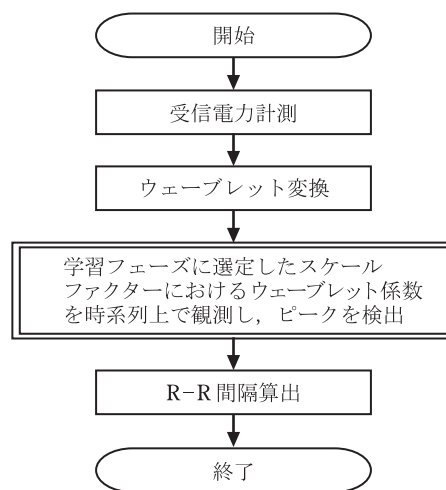


図5 提案システムの処理フロー<sup>(16)</sup>

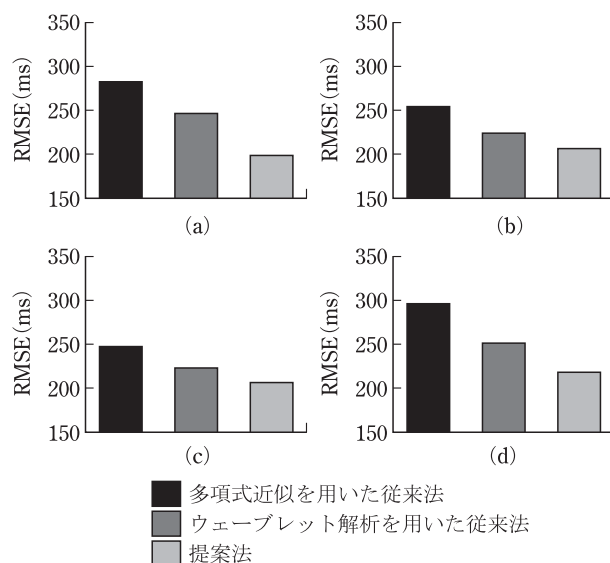


図6 提案システム<sup>(16)</sup>のR-R 間隔のRMSE 特性 (a)静止状態、(b)タイピング時、(c)書類作成時、(d)PC 閲覧時。多項式近似を用いた従来法<sup>(11)</sup>、ウェーブレット解析を用いた従来法<sup>(15)</sup>、提案法<sup>(16)</sup>。



に見た際の極大点を心拍の発現タイミングとする。これにより、体動を含む人体であっても、心拍の検出が可能となる。

文献(16)では、体動を伴う行動として、着座静止、タイピングゲーム、PC画面を見ながらメモを取る、紙面での書類作成、の4種類の評価実験結果が報告されている。評価基準にはR-R間隔と呼ばれる心電図上のピーク間隔<sup>(13)</sup>を用いた。実験結果を図6に示す。実験時の実際のR-R間隔は、700~1,100msであった。図6から、従来法に比べ、提案法のR-R間隔の二乗平均平方根誤差(RMSE)が、全行動項目において低減することが分かる。また、複数人に対する実験も行い、提案法が人に依存せず、体動を伴う行動でも、心拍成分を高精度に検出できることを確認している。

#### 4. おわりに

本稿では、高齢化社会の進展や人々の健康意識の高まりに応えるように開発が進んでいる、様々なセンサを紹介した。プライバシー侵害の心配のない電波センサとして、電波トモグラフィやアレセンサを紹介した。また、呼吸や心拍といった生体信号を非接触で取得する、ドップラーレーダに基づく非接触センシング法を紹介した。安心・安全な社会を実現するためには、これらセンサ等に基づく知的環境の構築が重要である。

#### 文 献

- (1) 寺阪圭司, 東桂木謙治, 松波 勲, 梶原昭博, "UWB-IRによる屋内侵入者検知に関する検討," 信学論(B), vol. J90-B, no. 1, pp. 97-100, Jan. 2007.
- (2) A. Hatami and K. Pahlavan, "In-building intruder detection for WLAN access," IEEE PLANS, pp. 592-597, April 2004.
- (3) S. Ikeda, H. Tsuji, and T. Ohtsuki, "Indoor event detection with eigenvector spanning signal subspace for home or office security," IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 7, pp. 2406-2412, July 2009.
- (4) T. Ohtsuki, "(Invited Talk) Wireless security and monitoring system using array sensor," IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC2012), Maui, Hawaii, Jan. Feb. 2012.
- (5) J. Hong and T. Ohtsuki, "A state classification method based on space-time signal processing using SVM for wireless monitoring systems," IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2011), pp. 2229-2233, Toronto, Canada,

Sept. 2011.

- (6) J. Hong and T. Ohtsuki, "State classification with array sensor using support vector machine for wireless monitoring systems," IEICE Trans. Commun., vol. E95-B, no. 10, pp. 3088-3095, Oct. 2012.
- (7) J. Wilson and N. Patwari, "Radio tomographic imaging with wireless networks," IEEE Trans. Mob. Comput., vol. 9, no. 5, pp. 621-632, May 2010.
- (8) 大槻知明, "ワイヤレス位置検出技術," 計測と制御, vol. 48, no. 7, pp. 560-564, July 2009.
- (9) I.V. Mikhelson, S. Bakhtiari, T.W. Elmer II, and A.V. Sahakian, "Remote sensing of patterns of cardiac activity on an ambulatory subject using millimeter-wave interferometry and statistical methods," Med. Biol. Eng. Comput., vol. 51, no. 1-2, pp. 135-142, Oct. 2012.
- (10) I.V. Mikhelson, P. Lee, S. Bakhtiari, T.W. Elmer II, A.K. Katsagelos, and A.V. Sahakian, "Noncontact millimeter-wave real-time detection and tracking of heart rate on an ambulatory subject," IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed., vol. 16, no. 5, pp. 927-934, Sept. 2012.
- (11) F.-K. Wang, T.-S. Horng, K.-C. Peng, J.-K. Jau, J.-Y. Li, and C.-C. Chen, "Single-antenna Doppler radars using self and mutual injection locking for vital sign detection with random body movement cancellation," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 59, no. 12, pp. 3577-3587, Dec. 2011.
- (12) M.A. Othman, M. Sinnappa, H. Azman, M.Z.A.A. Aziz, M.M. Ismail, M.N. Hussein, H.A. Sulaiman, M.H. Misran, M.A. M. Said, R.A. Ramlee, S.P. Jack, and B.H. Ahmad, "5.8 GHz microwave Doppler radar for heartbeat detection," in Proc. of 23th Int. Conf. Radioelektronika, pp. 367-370, April 2013.
- (13) 林 博史, 心拍変動の臨床応用, 医学書院, 東京, 1999.
- (14) A. Tariq and H. G.-Shiraz, "Non contact heart rate monitoring using Doppler radar and continuous wavelet transform," Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 53, no. 8, pp. 1793-1797, Aug. 2011.
- (15) A. Tariq and H. G.-Shiraz, "Vital signs detection using Doppler radar and continuous wavelet transform," in Proc. of the 5th EUCAP, pp. 285-288, April 2011.
- (16) 富井翔一郎, 大槻知明, "ウェーブレット変換におけるスケールファクタの学習を用いたドップラーレーダによる心拍検出," 信学技報, RCS2013-375, pp. 419-424, March 2014.

(平成 26 年 3 月 24 日受付 平成 26 年 4 月 19 日最終受付)



おおつき ともあき  
大槻 知明 (正員: シニア会員)

1990 慶大・理工卒。1994 同大学院理工学研究科博士課程了。博士(工学)。1995 東京理科大学・理工・助手, 同大学講師, 助教授。慶大・理工・准教授を経て, 2009 から同大学・理工・教授。この間, 光通信, 無線通信, センサの研究開発に従事。井上研究奨励賞, 安藤博記念学術奨励賞, エリクソン・ヤングサイエンティスト・アワード, IEEE the 1st Asia-Pacific Young Researcher Award, 船井学術奨励賞, 第5回国際コミュニケーション基金優秀研究賞, 2011 IEEE SPCE Outstanding Services Award, 電気通信普及財団賞(テレコム技術賞), 2013 ETRI Journal's 2012 Best Reviewer Award 等各受賞。