磁気双極子場のオンオフ符号による存在検出系と その野生小動物行動記録への応用[†]

鈴木 岳 良*・金子 弥 生**・阿刀田 央 一*
丸 山 直 樹**・冨 澤 眞 樹***・神 崎 伸 夫**

Existence Detection by On-off Code of Magnetic Dipole Field and Its Use in Recording Small Wild Animal's Behavior

Takeyoshi SUZUKI*, Yayoi KANEKO**, Oichi ATODA*,
Naoki MARUYAMA**, Masaki TOMISAWA*** and Nobuo KANZAKI**

A simple but reliable method is proposed for detecting existence of an object within a circular area with about 4m radius, which is optimal for logging trace of small wild animals. A beacon equipped with a magnetic dipole whose field is turned on and off according to its specific serial code is placed somewhere on the ground. If a magnetic sensor carried by an animal detects the field and find that the serial bit-pattern matches to one of predetermined codes, existence of the animal within the area around the corresponding beacon is known. It is shown theoretically that the radius of detectable area is very stable against changes of sensor height, sensor inclination, and other electronic parameters since strength of dipole field is inversely proportional to cubed distance. A 14-bit code set including 622 individual codes are devised so as to decrease theoretical probability of spurious detection by introduction of Hamming distance and exclusion of bit-patterns with very little 1s. Chance of erroneous response to impulse and burst noise is also minimized. A trace-recording system is developed. In practical system the dipole coil is driven by AC in audio frequency band. A very low-power recording unit including a tiny sensing coil, an AGC amplifier, an analog comparator, a real-time clock, a static RAM, a micro CPU and lithium batteries is developed. The system is applied to research on a male badger. 65 beacons are deposited. During 40 days in late spring, 521 successive errorless records are acquired. Ecological analysis extracted five patterns of its nightly activities and revealed that it trips around its home range in every 3 to 4 days. Thus existence detection by coded magnetic field offers an effective instrument to animal ecologists.

Key Words: existence detection, magnetic sensing, telemetry

1. ま え が き

動物生態学の分野では、動物個体間の接触や環境との相互作用を知るため、生息分布などのマクロな情報以外に、個体の行動を詳細に追跡する要求が生じている。現在、同分野で

事実上唯一の観測手段である電波テレメトリ^{1), 2)}で空間分解能を上げるには、発信源に近接し、かつ基線長を大きくすることが必要で、研究者が指向性アンテナを持って山野を走り回らなければならない。当然時間的な観測密度は低く、詳細な行動追跡は無理である。また複数個体の同時観測は困難である。計測工学分野から、複数個体の高い空間分解能のデータを、高い時間密度で自動収集する手法が供給されれば、研究のブレークスルーが期待できる。本論文では、タヌキやアナグマなどの小動物に適する新たな観測手法を提案する。

一般に広い地域内での位置を知る場合、GPSや電波テレメトリのように、座標を直接求める方法と、位置が既知の標識を道しるべとし、その近傍に観測対象が存在することを知ら、存在検出系による方法が考えられる。物理媒体としては、波動場と双極子場が考えられる。前者はパワーが距離の逆2乗則に従う。波長によって回折の大きさが変わるので、みかけ上の性質が大きく異なる。後者の強さは、逆3乗則に従

[†] 1997年電子情報通信学会総合大会で発表(1997・3)

* 東京農工大学大学院生物システム応用科学研究所 小金井市中町2-24-26

** 東京農工大学農学部 府中市幸町3-5-8

*** 前橋工科大学工学部 前橋市上佐鳥町460-1

* Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering (BASE), Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei

** Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu

*** Faculty of Engineering, Maebashi Institute of Technology, Maebashi

(Received January 30, 1998)

(Revised October 14, 1998)

う。また地上に固定される観測起点と移動する観測対象の、どちらを場の生成側とするかによって系の構成が変わる。標識や観測対象の識別法にもいくつかの選択肢がある。また実用的な見地から、消費電力やサイズなども検討する必要がある。一口に位置を知る系といっても、これらの中から、目的にもっともよく整合する組み合わせを選択する必要がある。たとえばテキサスインスツルメンツ社のタイリス³⁾のように、固定側の場が供給する電力で信号場を発生する超小型トランスポンダの存在を、固定側が1m程度の範囲内で検出するという選択は、家畜の体内に埋め込んで狭い通路や搾乳機などで個体識別を行う目的には最適であるが、最も強い信号が一つだけ検出されるので、同時観測には適さない。

タヌキやアナグマなどの野生小動物の動物生態学的観測の場合、観測する土地の広さは0.1~1km²程度である。動物生態学の研究では、動物が、餌場、巣穴、フン場、人間環境と接触する場所などの、行動圏内⁴⁾および周辺の、100個程度の意味のある場所にきたことが重要な情報となる。観測対象個体の行動圏の範囲や餌場の候補などは事前調査されている。敷いておいた紙の足跡によって検知する方法もある。家族行動や接触による病気感染の研究では、複数個体の同時観測も必要である。動物に取り付けられる重量は体重の5%以下であり、GPSが適用できそうなのはシカ程度以上である⁵⁾。小動物では、せいぜい150gである。当然電池重量も制限され、例えば数10gの電池で3ヶ月程度動作させる。

以上より、小動物の行動追跡の目的には、複雑な高分解の測量系を用いるよりも、必要な場所に標識を設置し、それらの半径3~4mの近傍で観測対象個体の存在を検出し、その標識の識別子、時刻とともに報告する系を提供すればよい。動物側を識別符号の送信側とする場合、周波数分割や時分割、イーサネットでの衝突検出/再試行のような、符号の分離法が何か必要である。一方、複数の受信側は相互干渉しないので、標識側で識別符号付きの場を生成し、動物個体側に場を検出するセンサ系を取り付けるべきである。通常巣穴や餌場は空間的に分離し、場の混信の危険はない。要する電力の点からも、場の生成は固定側におくのが適当である。

長波長の波動は、個体が餌場や巣穴などの特定の場所にきたことを知るだけの分解能を期待できない。光などの短波長の波動は樹木などに隠蔽され、また巣穴に入られたらまったく観測不能になる。GPSはこの点でも使用不可である。音場は観測対象に知覚される虞がある。結局、磁気双極子場の強さの距離依存性によって分解能を得るのが適当と考える。識別子の変調法は、標識を山野に多数設置するため、確実に安価な方法としたい。古典的な無線電信以来最も確実な方法はキャリア自体の断続で、送受信とも極めて安価な回路で済む。

以上により、本論文の存在検出系の構想が成立する。本論文では、この形式の存在検出系について、場と符号集合の性質の理論的検討を行う。また実用的な存在検出系、およびこれを組み込んだ野生小動物の行動記録システムを示す。とくに低電力設計は、理論的な問題ではないが、アイデアやト

レードオフ設計が実用的なシステムの成否の鍵となるので詳述する。またタヌキおよびアナグマを対象に、動物生態学の研究に使用して得た結果の例を示す。

2. 場と符号の理論的検討

存在検出、すなわちセンサが特定の標識の近傍に存在することを知る原理はきわめて簡単で、存在を知りたい場所それぞれに、固有のシリアル符号によってオンオフ変調された双極子磁場を発生する標識をおく。この磁場を磁気センサで検出し、検出した値が閾値を超えたとき論理レベルを1、そうでなければ0とする。時系列上のビットパターンが予め定められた符号集合の中の一つに一致したとき、センサ自身が符号に対応する標識の近傍に存在することが検出される。符号集合の中のどれにも一致しなければ棄却し、存在は検出されない。センサの存在が検出される領域を、検出域とよぶ。

一般的に次のような性質が、存在検出系として望ましい。

- (1) 検出域の境界がはっきりしている。標識からある一定の距離以内にセンサがあれば存在が確実に検出され、その距離以遠では存在が検出されることはない。
- (2) センサの高さ、姿勢、センサ系のパラメータ変動などによって、検出域の大きさが変動しにくい。
- (3) 他の標識の符号と誤認されることがない。

上記の方法による存在検出系がこの性質を満たすかどうかを調べるため、場の形状および符号系について検討する。

【場の性質】ここでは磁気双極子場を存在検出に利用した場合の特性、とくに各種の変動要因の影響について調べる。原点にあり、 z 軸上に軸をもつ双極子による場は、古典電磁気学にて周知のごとく、 z 軸に対して円対称で、各点における z 軸に平行な成分、半径方向の成分の大きさは、

$$(r^2 - 2z^2)/(r^2 + z^2)^{5/2}, \quad 3rz/(r^2 + z^2)^{5/2}$$

大きさの絶対値は

$$(r^2 + 4z^2)^{1/2}/(r^2 + z^2)^2$$

に比例する。ただし $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ とする。これらはすべて原点からの距離の -3 乗に比例する。 $z = 0$ なら、磁場の強さはただちに r^{-3} に比例する。実際のコイルによる磁場は上式に非常によく合致し、磁気式モーションキャプチャ装置⁶⁾のように座標計測にも利用可能である。

検出域を地表面上の円形領域としたいので、磁気双極子の z 軸をほぼ鉛直にしてこの検出域の中央におき、円対称性を確保する。すなわち上式中 r は地表面への射影半径、 z は標識の中心とセンサの高さの差となる。実際の z の大きさは、高々検出域半径の10分の1である。この磁場が閾値を超えたことを、軸をほぼ鉛直にした磁気センサで検出する。

Fig. 1(a)には、 $(r^2 - 2z^2)/(r^2 + z^2)^{5/2} = r_0^{-3}$ となる r/r_0 の値を、 z/r_0 に対して示す。これはセンサを鉛直に保ったまま高さを変えたときの検出域の半径の相対的な変化を表す。これによると、半径の10%および20%の高さのところ

Fig. 1 (a) r/r_0 vs. z/r_0 such that $(r^2 - 2z^2)/(r^2 + z^2)^{5/2} = r_0^{-3}$ showing change of the radius of detectable area when sensor is lifted by z . (b) r/r_0 vs. Ψ such that $r^{-3} \cos \Psi = r_0^{-3}$ showing the fluctuation of the radius of detectable area caused by angular swing of the sensor.

では、検出域の半径は高さ 0 の位置に比べてそれぞれ 1.5%, 7% 減少する。一方 $(r^2 + 4z^2)^{1/2}/(r^2 + z^2)^{1/2} = r_0^{-3}$ となる r/r_0 の値の z/r_0 による変化は、センサの姿勢変動を許した場合の、各高さでの検出域の最大半径を表す。この場合では、高さ 20% に対する変化は -0.14% である。一方、センサが高さ 0、原点からの距離 r の位置にあって鉛直から Ψ だけ傾いているとすれば、出力は $r^{-3} \cos \Psi$ に比例するから、これを r_0^{-3} と等置して r を求めれば、 Ψ だけ傾いているセンサによる検出域の半径を与える。この相対値、 $r/r_0 = (\cos \Psi)^{1/3}$ を Ψ に対して Fig. 1(b) に示す。

Fig. 1(a), (b) の $r/r_0 = 1$ からの偏差は、微小として加法的に扱う。たとえば $|z|$ の最大値が 0.1 r 、 $|\Psi|$ の最大値が 30° としたときの検出域の半径の変化は、最大 -6.5% である。また何らかの原因でセンサ系のゲインが相対的に ε だけ変化したとすると、検出域の相対変化は $r^{-3}(1 + \varepsilon) = r_0^{-3}$ 、すなわち $r/r_0 = (1 + \varepsilon)^{1/3} \simeq (1 + \varepsilon/3)$ である。

すなわち技術的なレベルでの誤差要因、例えば磁場発生コイルの駆動電圧の変動やセンサ感度のばらつきなどによるゲイン変動が検出域に与える相対変化は、線形近似範囲ではゲインの相対的変動の 1/3 に圧縮される。また変動が大きい場合、仮に 2 倍の変化があっても、検出域の変化は 20% にすぎない。以上のように、存在検出に磁気双極子場を利用することは、双極子場の逆 3 乗則により、センサ姿勢などの外部要因、センサ感度などの内部要因の変動ともに、検出域の変動に与える影響が小さいという利点が得られる。

【符号集合】 前述のように符号は、場のオンオフによるシリアル 2 値符号として伝達される。ノイズが存在する場合、標識からある距離 r_0 を境に急に符号の全ビットが 0 になるわ

Fig. 2 (a) Probability p of missing respective bits, p_0 for correct code detection, and p_k for missing k bits of logical 1 for $N = 7$, versus normalized distance from the beacon. $p_3 + p_4$ represents probability of spurious detection for codes with more than two 1s. (b) Change of the radius of detectable area according to N evaluated by $p_0 = 1/2$.

けではない。この検出域の境界付近で符号を得る際の確率のモデルと、符号集合がもつべき性質を論ずる必要がある。

比較器、すなわち論理レベルの 1, 0 を閾値 θ によって判定する部分への入力、磁場強度に比例する部分 s と不規則ノイズの和とする。磁場強度の距離による変化は、前述の逆 3 乗則による $s = \theta(r/r_0)^{-3}$ を検出限界 r_0 付近で線形化し、 $(r/r_0)^{-3} = ((r_0 + r - r_0)/r_0)^{-3} = (1 + (r - r_0)/r_0)^{-3} \simeq (1 - 3(r - r_0)/r_0) = (1 - 3(r/r_0 - 1))$ より、 $s = \theta(1 - 3(r/r_0 - 1))$ とする。ノイズの振幅密度分布は平均値 0、分散 n^2 のガウス分布で、 n は θ の数分の 1 以下の範囲で考える。この仮定に従えば、本来論理レベル 1 であるビットが 0 と判定される確率は p は、

$$p = \int_{-\infty}^{3\theta(r/r_0-1)/n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

のように書ける。0 が 1 と判断される確率は無視できる。

一方 N ビットの 1 をもつ符号のうち k ビットが 0 と判断される確率は、ノイズが各ビット独立であるとすれば、 (N, k) を 2 項係数として、 $p_k = (N, k)p^k(1-p)^{N-k}$ で与えられる。例えば $N = 7$ として、 p および p_k を $3\theta(r/r_0 - 1)/n$ に対してプロットすれば、Fig. 2(a) のようになる。

符号が正常に得られる確率 p_0 がある r の値を境に 1 から 0 にステップ状に近い急峻な変化をし、また符号が他の標識

のものと誤認される確率が小さいことが望ましい。Fig. 2(a)によれば、 $p_0 = (1-p)^N$ はすでに $1-p$ よりすこし急峻になっていて、そのまま利用できよう。一方後者に対しては、1) 符号を他の標識のものと誤認する可能性のある r の範囲を極力小さくし、その範囲への検出対象の滞在確率を下げること、および 2) 上記範囲内では、誤認する確率自体を小さくすること、の両面から符号集合を考える。

まず 1) については、 k が 0 および N に近い側での広がりが大きいため、符号間のハミング距離を離す、ビット数が極めて少ない符号は使用しない、という戦略が有効である。たとえば Fig. 2(a) の例では、ハミング距離 3 の符号系を使用し、かつ 1 が 2 ビット以下の符号が存在しないとすれば、 p_1, p_2, p_5, p_6 は符号誤認確率に寄与しない。また 2) は、符号密度 ρ を下げるしかないが、これは符号間にハミング距離をおくことと両立する。Fig. 2(a) に示す $(p_3 + p_4)$ を ρ 倍したものが、符号誤認確率である。第 4 章に示した n/θ の実際的な数値は、外部ノイズと増幅器内部ノイズを合わせて 0.04 くらいである。また符号密度は、第 3 章の例では $\rho = 0.04$ 程度である。

Fig. 2(b) には、 p_0 が $1/2$ になる $3\theta(r/r_0 - 1)/n$ の値を N に対して示したものである。これによれば、実用的な N の範囲内で検出域半径は最大 $1.9n/3\theta$ くらい後退する。 n/θ として上記の数値を用いれば、この値は約 2.5% である。

上記のモデルでは、まだ次の二点が考慮されていない。

(1) 実際のシリアル符号系では必ず、符号の前後に必ずスタートビット、ストップビットがつく。この 2 ビットが 1 でなければ、符号として認めない。

(2) 実際の対象は、ほとんどの場合移動している。

スタートビット、ストップビットは時間的に両端にあり、移動の影響を最も強く受けるので、上記 (1) (2) を同時に考慮する。これらのビットも符号ビットと変わらないので、センサが静止していれば、正しく得られる確率はそれぞれ $1-p$ に等しい。移動の向きが一定とすれば、時刻の違いによる位置のずれにより、二者の受信確率は $1-p$ を横軸上にそれぞれ逆方向にずらしたのと等価で、Fig. 2(a) 中に 2 本の破線で概念的に示したようになる。結果として、正常検出確率および誤認確率は、それぞれ p_0 と $\rho(p_3 + p_4)$ に破線の 2 つの値の積を乗じたものとなる。これらの値は移動速度とビットレートの比によって定まるが、正常検出確率はあまり変わらないのに対し、誤認確率をかなり小さくする方向にはたらく。

以上より、検出域境界をセンサが通過するとき、符号の誤認は事実上ないといってよい程度まで確率を下げるができる。これと、条件変化に対して感度の小さい双極子場の性質を併せれば、安定した確実な検出域が得られる。

3. 実際の符号

筆者らは各ビット 4ms、16 ビットのシリアル符号を用いた。符号の全長は 64ms である。両端の 1 ビットをスタート、ストップビット、実質部を 14 ビットとし、調歩同期によって各ビットを捕捉する。符号のデューティ比は $1/4$ とし、256ms

に 1 回毎とした。4 回/s の符号レートは、小動物用の応用目的に対して十分高速である。

実際の磁気雑音は、ガウス性不規則雑音とは異なるものも多い。実験室環境でよく観測されるノイズは、散発的なパルスで、ときとして論理レベル 1 とみなされる。原因ははっきりしないが、器具のオンオフに伴うステップ状の電流変化が、屋内配線周囲の磁場変化として広く放射されるのではないかと。商用周波数に同期したパルス列が 0.1 秒くらい現れることもある。TV 受像器から 3m 程度以内では 1 が検出されたままになる。センサの機械的衝撃による音響振動もノイズを発生し、これも連続した 1 である。鉄道線路は、架線と線路間の電流ループによる巨大な磁気雑音源である。幹線の線路に 20m 以内に接近すると、連続する 1 に時々 0 が介在したり、電車の位置によっては似かよったビットパターンが繰り返したり、複雑であるが総じて 1 の連続が多い雑音が現れる。

以上のように、人工物からの磁気雑音は、1 が孤立したパルス性または 1 が連続したバースト性のものが多い。人間環境との接触による生態の変化や病気感染も動物生態学の研究対象なので、人工物の混在する環境も想定し、符号系にはこれらの雑音の対策も含めるべきである。

第 2 章の議論から、符号集合には次の性質が必要である。

- (1) 符号間のハミング距離が離れている。
 - (2) 1 のビット数が極めて少ないものは含まない。
 - (3) 符号密度が低い。
- また、人工物からの雑音対策のため、次のものが加わる。
- (4) 孤立パルスを誤認しにくい。
 - (5) バースト雑音を誤認しにくい。

このうち (4) は (2) と両立するが、さらに 0 のランレングスが長すぎるものは符号集合から除外した。一方 (5) は、0 が挟まることもあり、決定的な識別は難しい。しかし 1 のランレングスが極端に長い場合が多いことは確かであり、このようなものは符号集合に含めない。

実際には、距離 3 のハミング符号系の中で、1 ビットずらしたものの排他的論理和が 1 を 10 個以上含むものだけを符号集合の要素とした。これにより (2) (4) (5) を同時に満足させ、かつ正しい符号かどうかの判別も容易になる。このようにして、探索によって 622 個からなる 14 ビット符号の集合を得た。この数は、必要な標識の個数に対して十分である。符号密度は平均 $622/214 = 0.038$ である。

4. 実用回路の設計

磁場があれば 1 を検出し、0, 1 のパターンを符号として認識するものを、センサ系と呼ぶ。実際に観測を行うには、動物個体にはセンサ系、電池、メモリや管理用の CPU などを含むユニットを首輪などの形で取り付ける。以後このユニット全体を行動記録装置と呼ぶ。

【要求性能】 動物生態学用の目的では、精度要求や制約条件は工業計測での常識とはかなり異なる。検出域半径は 3~4m と大ざっぱで、要求精度は低い。しかも変動に対する

理論的な堅牢さは前章ですでに確保されていて、精度要求を満足するのは容易である。しかし行動記録装置全体で150g以下の重量、3ヶ月の電池寿命が要求される。

標識も、山野に設置するため電池駆動する。消費電流を抑え、電池交換の人手を省きたい。1回の観測に100個程度必要とするため、簡便で低コストが要求される。

〔周波数〕 低周波の交流磁場を用いる。いうまでもなく磁気センサが単なるコイルですみ、増幅も容易だからである。周波数が低いとセンサコイルのインダクタンス、共振容量とも大きく、重くなる。一方増幅器の回路インピーダンスを上げて電源電流を抑えると、浮遊容量などにより周波数特性が制限される。筆者らの用いた回路技術では、5~20kHzがトレードオフ範囲であった。符号レートは0.25bit/msなので、キャリア周波数として低すぎることはない。

低周波では検出域は波長に比べて極端に小さく、自由空間での磁場の形は直流と変わらない。導体があると交流磁場は渦電流を生じ、周波数が高いほど遮蔽を受ける。しかし10kHz程度では、コイルに金属板を近接させないかぎり、水道水や湿った土壌程度では影響はみられず、標識を地表に直接設置しても、観測対象が巣穴に入っても支障はない。なお高透磁率材料の影響は直流磁場と同様に受けるが、実験的には鉄筋ビル内でも検出域が若干拡大する程度であり、また山野に大量の磁性材料があることは考えにくい。

民家の付近ではTV受像器の偏向コイルの開放磁路は15.734kHzの外乱源になり得る。10kHz以上には無線航行局がある。これらを避け、筆者らは任意に8kHzとした。

〔標識〕 標識の磁場を強くしセンサ感度を下げれば、S/N比は上がるが、消費電力は抑制したい。磁場生成用コイルを共振させれば、駆動電流に対し励磁電流を非常に大きくできるが、Q値が高すぎればシリアル符号にも追いつかない。筆者らは、直径約9.5mm、長さ120mmの棒状フェライトコアに0.7ECを巻いた396 μ Hのコイルを、1 μ Fのフィルムコンデンサと並列共振させ、CMOS ICの4050を3ゲートずつ並列にして、両端逆相の8kHzの矩形波で駆動した。電源電圧は9Vとした。コイルの端子間電圧はほぼ正弦波で20Vp-p、すなわち共振電流は1.0Ap-pである。包絡線の応答は、実測で立ち上がり約350 μ s、立ち下がり約150 μ sである。励磁時の電源電流は実測で約25mA、符号ビットを全部1、送信のデューティ比を1/4と仮定すると、800時間(約1.1ヶ月)で単1型マンガン乾電池の常識的な電流容量5Ahに達する。コア先端部での磁束密度は、実測約3mTであり、安全上の問題はないと考える。たとえば黒板用マグネットは50~150mTである。

〔センサ系の構成〕 センサ系は、磁気センサの後に、初段増幅器、AGC増幅器およびアクティブフィルタ、整流平滑器、比較器、符号解読器を縦続接続して構成する。比較器から0, 1を得る。符号解読器はソフトウェアであり、行動記録装置の管理用CPUを利用して実現する。筆者らは初段増幅器から比較器までを11個のディスクリートのバイポーラ

Fig. 3 Input-output characteristics of AGC amplifier.

トランジスタで構成し、電源電圧5V、消費電流約200 μ Aで動作させている。3ヶ月で430mAhになり、2本直列にしたリチウム電池CR123Aの容量の1/3に相当する。

〔センサ〕 磁気センサ用コイルは、直径8mm、高さ10mmのドラムコアに巻かれた市販の30mHのインダクタを利用し、0.0132 μ Fのフィルムコンデンサと並列共振させた。半値帯域は、7.2~8.7kHzである。標識から距離1mにおいて出力3.67mVp-pであった。包絡線の時定数は約400 μ sである。共振点は停留点なので、素子定数の変化と利得変化は線形ではない。5%の増加、減少によりそれぞれ約11%、7%利得低下し、10%の変動に対しては約25%である。そのため共振の初期調整は必要である。温度係数はコンデンサは大きくても $5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 程度である。インダクタは不明であるが、実測では、+40 $^{\circ}\text{C}$ ~0 $^{\circ}\text{C}$ に対する利得低下は2%以下であった。これによる検出域半径の変化は0.7%である。また比較器の閾値の温度変化により、 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ に対して検出域半径は $\pm 3\%$ 変化する。

〔AGC〕 AGC、すなわち自動利得調整は、双極子磁場の逆3乗則に基づく検出域境界の堅牢さを補完する。対象が標識に接近すると、センサ出力は逆3乗則によって非常に大きくなり、先行する1の部分から0の部分に侵入した減衰波形も、検出域境界付近での1に対する出力をはるかに超える。このときでも0, 1を判別し符号受信を正常に行うには、AGCによって増幅器の利得を下げるしかない。筆者らのAGC回路は、バイポーラトランジスタを可変抵抗素子とした。Fig. 3には、初段増幅器からAGC増幅器を通り、アクティブフィルタまでの特性の実測結果を示す。比較器による0, 1判別の閾値は入力換算で58 μ Vp-pで、この約2.5倍の入力電圧から出力が増加しなくなる。入力10mV以上では増幅器のリミッタ特性が出力を制限する。

〔検出域の変動〕 この初段増幅器から比較器までを上記のセンサと組み合わせた場合、 r_0 の値は $1\text{m} \times (3.67\text{mV}/58\mu\text{V})^{1/3} \approx 4\text{m}$ である。第2章に示したセンサの高さと傾きによる検出域半径の変動を0~-6.5%、Fig. 2(b)による検出域の変化を-0.8~-2.5%、温度変化に伴う共振点および閾値のずれを+3~-5%と見積もれば、 $r_0 = 4\text{m}$ に対して検出域半径の変動範囲4.1~3.4mを得る。3~4mの要求に対してはまだ13%の余裕があり、これを

Fig. 4 Schematic diagram of an instrument which records trace of wild animal.

標識の電池電圧に振り向ければ、放電終止電圧を 6.5V とすることができる。

【不規則雑音】 センサを短絡した状態で、入力換算で約 $3\mu\text{Vr.m.s.}$ 、 $20\mu\text{Vp-p}$ 程度の定常的なノイズがみられ、内部雑音と推測される。この雑音が整流、平滑され、比較器の入力では、約 8mVr.m.s. 、ピークで約 25mV の低域通過型のガウス性と見なせる不規則雑音となる。コイルの短絡を解除すると、比較器の入力位置での雑音は 20mVr.m.s 程度になる。実験室内環境では内部雑音と同程度の定常不規則な外部雑音があるものと思われる。このとき、閾値の実測値 550mV に対して、 $n/\theta \simeq 0.036$ である。

5. 小動物の行動記録システム

本論文の存在検出系は、小動物の行動記録システム (trace recorder) に用いる。このシステムでは、定点に標識 (beacon) を設置し、観測対象の動物個体には、Fig. 4 のような、センサ系、時計 (real-time clock, RTC)、大容量 SRAM (static RAM) チップを含む行動記録装置 (recording unit, RU) を装着する。行動記録装置はマイクロ CPU によって管理されている。この CPU はセンサ系の一部である符号識別を兼ね、標識の識別子を時刻とともに大容量 SRAM に時系列記録する。観測期間終了後この行動記録装置を回収し、ケースを壊して SRAM から記録を読み出して解析する。

実際に使用した CPU, TMPZ84C011 は 4MHz 動作時約 15mA 要するが、命令によりクロックを停止し、 500nA 以下のスタンバイ状態となる。割り込み、ノンマスクابل割り込み (non-maskable interrupt, NMI) により、CPU は 214 クロック待ち発振を安定させてから実行再開する。またクロックを停止させないアイドル状態では、約 1.5mA 消費する。これらの機能を利用して CPU の電流消費を極度に抑えるアル

Fig. 5 Data types in the trace-recording instrument.

ゴリズムを考案し、ROM 内のプログラムに用いた。

比較器の出力が 0 のままのとき、CPU はスタンバイ状態にあり、ほとんど電流を消費しない。比較器の出力が 1 になると、これをスタートビットとし、CR 回路による 2ms の遅延の後、割り込みが要求される。 214 クロック待ちの後、割り込み処理プログラムの中で、符号の第 1 ビット (LSB) のほぼ中央が来るべき時刻から、ソフトウェアで調歩同期して比較器の出力時系列がポートから読み取られる。このとき 4ms の待ち時間を得るにも RTC の定周期割り込みを利用し、大部分の時間 CPU をアイドル状態において電流量を減らす。符号検出一回当たりの電流量は約 200nAh である。

動物が標識の付近に留まるとき符号検出が何度も繰り返され、その度毎に電流を消費するのを防ぐため、符号受信に成功すると、記録分解能に等しい 15 秒間、センサ系の電源をオフにして不応期に入る。この期間の全消費電流は約 $20\mu\text{A}$ である。RTC による NMI で不応期を脱する。

記録するデータは、標識の識別子と符号が検出され始めた時刻 (ARV)、検出されなくなった時刻 (DPT) である。識別子は符号のビットパターン自体ではなく、通し番号である。時刻の分解能は 15 秒とした。符号受信期間がこれより短い場合は、DPT を省略する。日付が変わったときに特定のワード (DAY) を挿入する。これらのデータは、Fig. 5 に示すように、ワード境界に一致する可変長で、時系列順に格納される。データ列の一部からでも、その中に DAY を含めば、データは確定して読みとれ、万一のポイントの破壊等によって失われない。また CPU のプログラムもスタックポイントを常時再初期化する構造とし、CPU が未知の原因で暴走しても、センサ系からの割り込みをきっかけに自己復帰する。

行動記録装置は防水、耐磨ケースに電池とともに封入してしまうと、外部とのインタラクションは磁場による符号と、ケースを透ける LED の応答しかない。そのためいくつかの符号を、利用者とのインタフェース用に配分する。利用者は放獣前に記録開始指令の符号を送る。また観測期間の終了時、動物が立ち寄る可能性の高い場所の標識を動作停止指令の符号を出すものに置き換える。前者を検出した以後 CPU は SRAM への記録を開始し、後者を検出するとセンサ系の電源を切る。割り込み要因を失うため、以後 CPU は再起動し

ない。これらを検出したことは、STRワード、ENDワードとしてSRAMの記録に残る。行動記録装置の回収は再捕獲による。アナグマは再捕獲が容易であるがタヌキは学習能力が高く再捕獲ににくい。この対策として、動作停止指令を検出した際同時に動作させる、行動記録装置を自動的に離脱させる機構も試作したが、詳細は省略する。

輸送時の自動車のイグニッションノイズはあらゆる符号と誤認され得る。対策以前、動作停止指令符号と誤認された例もあった。自動車による搬送中には、特定の指令符号を出すダミーの標識をごく接近させておき、行動記録装置はこの符号を検出すると約10分間観測を休止する。また未知の雑音により符号集合に含まれないビットパターンが多く現れたとき、約1分間不応状態にして電流の浪費を抑制する。

行動記録装置は電池を含めて幅75mm、高さ40mm、厚さ25mmの直方体の上部を動物の首に合わせて円弧状に15mm切り下げた形のケース内に収納され、2本直列にしたリチウム電池CR123Aで約3ヶ月間動作する。首輪によって動物に取り付けたときセンサコイルの軸はほぼ鉛直になる。重量は外装を含めて130gである。標識は、公称75mmの塩化ビニル製水道管を利用した最大部直径約90mm、長さ約250mmの防水ケースに、単1型乾電池6本とともにコイルを長手方向に向けて封入し、地表に縦向きに設置する。平地でのコイルの高さは、センサコイルにほぼ等しくなる。

6. 存在検出系の動作試験

センサや増幅器など、センサ系各構成要素単体の動作試験については、第4章に論じたので、ここでは存在検出系としての試験結果を示す。前述のように符号の判定は行動記録装置側のCPUを利用しているので、実際に試験に用いるのは行動記録装置全体である。この組み込みプログラムを、すべての検出事象を棄却せず記憶し、かつ観測休止を行わないように変更して動作試験を行った。調歩同期によるシリアル符号の復号の性質上、全ビットパターンのうち1ビットでも1となり、かつスタートビット、ストップビットの一方でも0となれば、ストップビットなしと判断される。

Fig. 6に行動記録装置を標識からの距離を5mm/sの割合で近づけていったときの、検出域境界を通過する前後の検出記録例を時系列上に示す。測定を行った場所は、建物に近接した屋外、用いた標識の符号のビットパターンは16進表記で3DA4で、1を8個含む。最上段は正常検出、第2段は符号の誤認、第3段は符号集合に含まれないビットパターン、第4段はストップビットが見つからなかったもの、第5段は全ビット0だったものである。存在検出系では、第3段以下は存在検出なしと判断される。

正常検出は、約55mmの間に0%から100%に推移する結果を得た。Fig. 2(a)を1の数8ビットに改めたものの p_0 に、センサ系が静止しているときのスタートビット、ストップビットの検出確率を乗じたものと、得られた正常検出結果を視認比較すると、ほぼ同じ距離で同等の推移をしているのがわか

Fig. 6 Experimental result showing code discrimination near the boundary of detectable area.

る。ただし n/θ は、第4章による定常不規則雑音の直接観測値0.036を用いた。符号集合に含まれないビットパターンは10回出現したが、誤認はまったくなかった。実際の存在検出系は、ほぼ第2章のモデルどおりに動作している。

7. 使用結果

本存在検出系は、これまで電波テレメトリでは不可能であった空間分解能と時間的観測密度で、野生小動物の行動を観測する手法として提案したものであり、競合する方法がないことは、第1章に述べたとおりである。しかしこの系が案のとおり実用的であるためには、実際の動物生態学者の研究用に良好なデータを供給できることが示されなければならない。

実際の野生動物に対し、この存在検出系による行動記録システムを用いた実験を3回行った。第1回目は1996年11月16日から12月10日にわたって、東京都日の出町において標識24個を敷設し、メスのタヌキ1頭に対して実施した^{7), 8)}。標識は目標のごく近くの地表面に、立木などを利用して固定する。行動記録装置とともに、電波テレメトリ用の発信器も同じ首輪に取り付けた。両者の相互干渉はない。この実験は、装置の動作を確認し、不適切な点を抽出することを目的とした予備実験である。標識数が少なかったうえ、行動圏が放獣後少し移動してしまったことにより、観測期間中得られた記録は99個で、この間の行動全体を再現するのに十分な記録密度は得られなかった。また符号系が3章に示したものを考案する以前のものであったため、誤符号の記録が多く手作業で除去する必要があった。スタンバイ時間の設定を3分としていて長すぎたため、来てすぐ立ち去ったと思われるタメフンの滞在時間が得られなかった。しかしそれでも、農家が野積みになっているゴミ捨て場への高い依存性、タメフンによる情報交換などを示す行動記録が得られ、実際の研究に応用した場合、有用なデータを得る可能性を伺わせた。この程度の観測結果でも、電波テレメトリによって得るのは困難である。

第2回目の実験は、1997年4月15日から6月7日まで、東京都日の出町に観測エリアを設定し、65個の標識を敷設し、実際にアナグマの研究用データを得る目的で実施した。対象としたのはオスの3才の個体である。途中一度再捕獲され、記録を回収後、行動記録装置を交換して再度放獣した。

するため)よく訪れ、蓋のあるコンポスト容器にも来るが、柵で囲ったコンポスト容器には来ないというような、目的を絞った観測結果も抽出できる。「来ない」と言えるのは、来れば必ず記録する行動記録装置によっているからである。

以上、動物生態学の研究への使用結果から、磁気符号による存在検出系を用いた行動記録システムは、動物生態学者に正確で有効な小動物の行動記録を供給できる能力があることが示された。実際に有効な情報を得るには、動物生態学者側による観測の企画と標識配置の設定が重要である。

8. 結 言

磁気双極子による磁場のオンオフによるシリアル符号により、極めて単純でかつ理想に近い特性をもつ存在検出系を構成できることを、場の形および符号検出のモデルによって論じ、これに基づく検出系の実現例を示した。この実現例は野生小動物の行動記録に用いるものであり、そのための行動記録システムおよび行動記録装置についても論じ、実際にアナグマの生態観測に適用した結果、有用性が示された。

さらに詳しい行動記録を得るため、「横断検出系」を併用するアイデアもある。標識の双極子コイルを、例えばTVの300Ωフィードのような少し間隔のある平行線100m程度の先端を短絡して細長いワンターンコイルとしたものに置き換えることによって実現可能である。

謝 辞

快く飼育個体による装置試験の場をご提供いただいた早稲田大学人間科学部自然環境調査室大堀聰調査主任および研究室の皆様、野生個体の捕獲等試用実験に際してご尽力いただいた東京野生生物研究所神田栄次氏に感謝の意を表する。本研究の一部は、とうきゅう環境浄化財団の補助によるものである。

参 考 文 献

- 1) Mech L. D.: "Handbook of Animal Radio-Tracking", University of Minnesota Press (1993)
- 2) Cochran W. W.: "Wildlife Telemetry", Wildlife Management Techniques Manual, 4th ed.(edited. by Schemnitz S.D.), 507/520, The wildlife society, Washington D.C. (1980)
- 3) "RF-ID SYSTEM", 日製産業株式会社, 03-3504-5139 (1998)
- 4) Adams L., and S. D. Davis: "The Internal Anatomy of Home Range", J.Mamm., 48., 529/536 (1967)
- 5) Lars Edenius: "Field test of a GPS location system for moose Alces alces under Scandinavian boreal conditions", Wildlife biology, 3, 1, 39/43 (1997)
- 6) 阿刀田, 中村, 富澤, 横山, 今田: "磁気式モーションキャプチャ装置における双極子配置と座標逆算アルゴリズムの一設計法", 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, 445/453 (1998)
- 7) Y. Kaneko, T. Suzuki, N. Maruyama, O. Atoda, N. Kan-zaki, and M. Tomisawa: "A Trace Recorder and Its Use for tracking a Raccoon dog", Trans. 23rd IUGB Congress, Ryon, France, 1/6 (1997)
- 8) Y. Kaneko, T. Suzuki, N. Maruyama, O. Atoda, N. Kan-zaki, and M. Tomisawa: "A New Device for Trace Recorder and Its Use of a Home Range Survey for a Raccoon Dog",

J. Mamm.Soc Japan, submitted.

- 9) 金子, 鈴木, 丸山, 阿刀田, 神崎, 富澤: "新テレメトリーシステム「トレースレコーダー」のアナグマの環境選択調査への応用", 第3回野生生物保護学会大会要旨, 43 (1997)

[著 者 紹 介]

鈴 木 岳 良

1996年農工大・工・電子情報卒。1998年東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科博士前期課程修了。現在、横河電機(株)。

金 子 弥 生

1989年麻布大・獣医卒。1992年東京農工大学大学院農学研究科修士課程了。1998年同連合農学研究科修了。現在財団法人トヨタ財団研究員。ニホンアナグマの環境選択, 中型哺乳類に対する住民意識等研究。

阿刀田 央 一 (正会員)

1970年東大・工・計数卒。1975年同大学院博士課程了。同大・工・助手, 講師を経て, 1978年農工大・工・助教授。1990年同教授。1995年東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科教授。工博。

丸 山 直 樹

1966年農工大・農・林学卒。新潟県林業試験所技師。1968年農工大・農・助手。1987年同助教授。1997年同教授。農博。

富 澤 眞 樹

1987年東京農工大・工・数理情報卒。1992年同大学院博士課程了。1992年東京農工大・工・電子情報工学科助手。1997年前橋工科大学工学部情報工学科講師。工博。

神 崎 伸 夫

1995年筑波大・生物学類卒。1988年農工大大学院農学研究科修士課程了。1991年同連合農学研究科了。農工大・農・助手。1998年同助教授。農博。