犬用歩数計の開発

Development of Pedometer for Domestic Dog

千田 陽 介[†], 伊 東 利 雄[†], 永 嶋 史 朗[†]

Yosuke Senta[†], Toshio Ito[†] and Fumio Nagashima[†]

あらまし ペット犬用の歩数計を開発・商品化した。犬は人間と比べ、様々な犬種があり個々の体格差が大きい。さらに四脚動物固有の多様な歩き方をする。そのため歩行によって生じる振動の周期や振幅、形状は多様なパターンがある。振動から歩数を数える歩数計アルゴリズムはこれらのパターンに対応できなくてはならない。また民生品として設定の容易さや駆動時間、コストも重要である。犬の体格を細かく設定することや、負荷の大きなアルゴリズムは採用できない。本稿はおよそ 50 頭の犬の歩行を測定し、そこからロバストで負荷の小さな四脚動物用歩数計測アルゴリズムについて述べるものである。コンピュータが得意とするメモリー操作と整数演算を主体とするアルゴリズムによって、およそ 2.3 kbyte のコードサイズ、ボタン電池で 4 ヶ月駆動できる演算量、±8% 以下の計測精度を両立した。

キーワード：ペット犬，四脚動物，加速度，製品化，歩数計

1. ま え が き

携帯電話やゲームコントローラなど様々なもので加速度センサが活用されてきている。例えば携帯電話では加速度センサを用いた歩数計が実現されている。筆者らも 2007 年より、三軸加速度センサによる携帯電話の歩数計を開発してきた。今回その技術を用いて図 1 のようなペット犬用歩数計を開発・商品化した¹⁾。

従来から、動物にセンサ類を取り付けて何かを計測する研究はなされている。野性動物では「バイオロギング」²⁾と呼ばれる分野があり、動物に加速度センサや衛星測位システムなどを装備した装置を取り付け、学術的な生態調査に活用されている。センサ情報から類推した結果と実際の行動が一致しているか評価するため、山羊や猫など観察しやすい家畜動物による基礎研究も行われている³⁾⁴⁾。実用分野でも、従来熟練者しか行うことができなかった家畜(牛)の蹄病の兆候を自動的に判定する試みが行われている。これは蹄病に伴うわずかな歩行パターンの乱れを牛の足先等に取り付けた加速度センサによって検出するものである⁵⁾⁶⁾。犬を対象としたものでは経験的累積分布関数や機械学習を用いて行動をクラス分けする研究がある⁷⁾⁸⁾。しかし愛犬がいつ何をしたかは時刻情報とクラス分けを組合せることでわかるが、歩数のような具体的数値は得られるわけでない。そのため飼い主にとって飼育上の改善効果が見えにくく、利用し続ける意欲が得にくい可能性がある。

図 1 犬用歩数計

犬用歩数計を実現する上での難しさは次の二点である。一つは歩数の定義が曖昧なことである。人の場合、ダンスやスキップなど特殊な事情でない限り、左右交互に支持脚と遊脚を繰り返す。そのため脚切替で生じる振動をそのまま歩数に換算することができる。一方犬などの四脚動物は、トロットやキャンタなど様々な足運び(歩容)がある。それぞれの歩容に対し何を持って一步と数えるか統一的な見解がない。そのため適切な歩数を定義しなければならない。もう一つは体格差が大きいことである。歩数計は歩行特有の周期振動を数えるものである。歩行周期はほぼ体格に依存する。成人の場合、仮に身長範囲が 140～190cm としても体格差は 1.4 倍もない。一方犬の場合同じ成犬でも例えばミニチュアダックスフンドとゴールデンレトリバーの体格差は 5～6 倍もある。さらに商品化する場合、設定や装着の簡便さも重要な要素となる。生態調査のようにパラメータを個体毎に細かく調整したり、蹄病判定のようにセンサを確実に固定することはできない。ロバストなアルゴリズムで大雑把な設定と簡便な取付で動作するように

2014 年 8 月、コンシューマエレクトロニクス研究会で発表¹⁾

2014 年 10 月 23 日受付, 2015 年 2 月 6 日再受付, 2015 年 3 月 1 日採録

[†]株式会社富士通研究所

(〒 243-0197 厚木市森の里若宮 10-1, TEL 046-250-8840)

しなければならない．本稿は歩行中の加速度を基礎とした犬の歩数の数え方を提案し，ロバストにそれを数えるアルゴリズムについて述べるものである．

2. 犬の歩行

2.1 歩行の種類と歩数

人間と異なり犬の歩行には様々な種類（歩容）がある．図 2 に代表的な犬の歩容を示す．犬の歩数計を作るにあたって歩数の定義を行う必要がある．すなわち各歩容 1 サイクルにつき何歩と数えるかである．一番わかり易い数え方は，前足二脚に着目し人間と同様に数えることであろう．この場合歩容にかかわらず 1 サイクル 2 歩となる．しかしこの数え方は実現性が乏しい．一般的な歩数計のしくみは歩行に伴う鉛直方向の振動を数えるものであるが，図 3 のように歩容によって揺れ方が異なるためである．この問題は，例えば両前脚に適切なセンサを取り付けることで解決できるが装着性という別の課題が発生する．ここで本装置は犬の一日が想像できるような数値を出すことが目的である．また犬の歩容は大部分をウォークかトロットである．そこで本装置では次のような歩数の定義をしても実用上問題ない判断した．

- 歩行（ウォーク，トロット）は 2 歩/サイクル
- 走行時（ギャロップ）は 1 歩/サイクル
- 歩行と走行の中間（キャンタ）は 1.5 歩/サイクル

この定義は図 3 の大きな加速度の山の半分の数であるため簡単に実装できる．

2.2 歩行周期と体格

加速度センサの出力から図 3 のような振動を取出すには，歩行周期成分のみをフィルタリングしなくてはならない．フィルタを設計するにあたってターゲットとなる歩行周期を決定する必要がある．歩行周期は足の長さとは相関を持つ

図 2 四脚動物の代表的な歩容

図 3 各歩容 1 サイクルの鉛直方向の加速度

図 4 脚長と歩行周期の関係

と思われる．そこで後述するチューニング用に取得した歩行データから前足の長さ（中足骨から上腕骨）と一歩にかかる時間の相関を確認した．一歩にかかる時間は 10 ～ 20 歩程続けてウォークもしくはトロットで歩いていると判断した動画の再生時間とその間の歩数から求めた．結果を図 4 に示す．重複している部分が確認できるように若干上下左右に揺らぎを持たせてプロットしている．図より足が長ければ長い程，歩行周期も長くなる傾向が確認される．しかし足の長さが等しくても歩行周期にバラツキがあることも見て取れる．これは犬の機嫌や年齢などの他，犬種によって胴の長さと足の長さの比が異なることも原因ではないかと推測している．民生品として飼主（ユーザ）に足の長さや犬種を細かく指定してもらうことは好ましくないことから，小型犬（足長：～20cm），中型犬（20～36cm），大型犬（36cm～）といった大雑把な指定に留め，各区分内でのバラつきはアルゴリズムのロバスト性で吸収することとした．

2.3 カーミングシグナル

本装置の最終目的は犬の健康管理であり，歩数以外にも健康管理にまつわる情報を得ることは望ましい．例えば，留守中に犬がどのような環境で過ごしていたかという情報である．そのため本装置には温度センサも取り付けられている．さらなる情報を得るためにはさらなるセンサを取り付ければよいがコストがかかる．図 5 は胴震いと呼ばれる

図 5 カーミングシグナル (胴震い)

体を小刻みに震わせる動作である。体が濡れた時の脱水行動としてよく観察されるが、要因が明らかでないこともある。犬の行動心理学では、このような要因が不明確な胴震いは犬がストレス状態を示している合図 (カーミングシグナル) だと考えられている。この動作は既存の加速度センサでも計測できるため追加のコストはかからない。そこで本装置では胴震いも検出し回数を数えている。

3. 実装

3.1 実装方針

犬の歩数計を商品化するにあたってコストは重要な観点である。そのため装置の記憶容量やマイコンの性能などに制限が生じる。その制限の下で長時間の記録を実現するためには、センサ情報そのままではなくデータ量の小さな歩数に変換して記録しなくてはならない。それには装置内のマイコンでも演算できるようなシンプルな歩数計測アルゴリズムを必要とする。これは、デジタルコンピュータが得意とする整数演算とメモリー操作を主とした実装にすればよい。例えば一番簡単な有限インパルス応答のローパスフィルタの式は以下ようになる。

$$y[n+1] = \frac{u[n] + u[n-1] + \dots + u[n-N]}{N+1} \quad (1)$$

ここで添え字はサンプリングサイクルである。この式のブロック図を図 6 (a) に示す。 z^{-1} は遅れ要素である。この図は一見複雑な処理に見えるが、同図 (b) のように過去 N

(a) ブロック図

```
int index,buf[N+1],sum;
int lpf(int x){
    sum += x;
    sum -= buf[index];

    buf[index]=x;
    if (++index > N)
        index=0;
    return sum/(N+1);
}
```

※ 初期化処理省略

(b) C 言語によるコード例

図 6 有限インパルス応答のローパスフィルタ

図 7 鉛直加速度成分抽出ブロック図

図 8 センサ出力の振動・重力成分の分離と鉛直加速度の関係

回分の情報とその和をメモリーに記憶することで低い負荷で実装できる。

3.2 計測アルゴリズム

先述したように歩数計は鉛直方向の加速度の山の数を数えれば実現できる。この加速度 v は首輪や胴輪 (ハーネス) に取り付けられた装置内の三軸加速度センサの出力 $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)^T$ を変換すれば得られる。しかし装置がどのような向きで取り付けられているか不明なため、鉛直方向を推定し、その成分を取り出さなければならない。

図 7 は鉛直方向成分を取り出すブロック図である。加速度センサそれぞれの成分にローパスフィルタ (LPF) とハイパスフィルタ (HPF) を通したのち内積を求めている。ローパスフィルタを通すことは重力成分 $\mathbf{G}$ を得ていることを意味する。逆にハイパスフィルタを通すことは重力成分を除去し、歩行による振動成分 $\mathbf{S}$ を取り出していることを意味する。 $\mathbf{A}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{S}$ と鉛直方向の振動 v との関係を図 8 に示す。図より $\mathbf{G}$ と $\mathbf{S}$ の成す角を θ とすると

$$v = |\mathbf{S}| \cos \theta = \frac{\mathbf{S} \cdot \mathbf{G}}{|\mathbf{G}|} \quad (2)$$

が成り立つ。この分母は重力加速度のためほぼ一定値であることから v は $\mathbf{S}$ と $\mathbf{G}$ の内積に比例する。各フィルタの定数 (遅れ要素の数) は大中小に区分した犬の体格に応じ、それぞれの歩行周期成分を抽出できるように調整した値を使っている。実際はこうしたフィルタを数段重ねた実装にしているが、原理上大差がないことから具体的な説明は割愛する。

一山分の鉛直加速度 v を図 9 に示す。図中 $v(i)$ は Δt 毎に計算された v の値である。ここで i は v の符号が同じ間は $1, 2, 3 \dots n$ と Δt 毎に増加するインデックス番号である。歩数以外の振動を除去するため、符号が反転した時

図9 一山分の鉛直加速度

点で山の大きさ

$$P = \left| \sum_{i=1}^n v(i) \right| \quad (3)$$

を計算し、 P が犬の体格に応じて設定された範囲内にあるか確認する．範囲内にあれば歩行によって生じた山とみなし，累計歩数に 0.5 歩を加算する．

一方胴震いは，図 10 のような短い周期でセンサの検出範囲を超える激しい振動を一定時間繰り返す運動である．そのため図 11 に示すように適切なバンドパスフィルタ (BPF) を通した後ノルムの二乗を取り，ある程度の期間大きい値が持続されるかどうかで判定できるように思える．しかし犬が走りながら跳梁する場合でも図 12 のように同様の激しい振動が発生し判別が難しい．ここで走行中は図 2 (c)-7, 8, (d)-4, 8 のように空中に浮いている期間がある．その間首や肩，胸が動かないのであれば加速度センサは自由落下する．図 12 内にもそれが確認される．これはセンサ信号そのものに対してノルムの二乗を求め，その値が小さいかどうかで検出できる．自由落下が検出されるとそこから数秒間は激しい振動が行われていても胴震いとみなさないようにして誤検出を防止した．

3.3 チューニングと結果

屋内ドッグラン (13.5×7.5m) で 19 種 57 頭の犬に対し行動中の動画と首輪もしくは胴輪に取り付けた加速度センサ情報の組を採取した．採取にあたって犬は引き綱 (リード) を持った人間と並走させたが，強制や虐待などは行わなかった．そのためデータには歩く，走る以外にも遊ぶ，は

図 11 胴震い検出のブロック図

しゃぐ，反抗する，すねるなど様々な場面がある．その中で歩行や走行をしている場面では歩数を数え，そうでない場面では数えないようにフィルタ内の遅れ要素の数や段数，閾値等を含むアルゴリズム全般を大型犬，中型犬，小型犬それぞれでチューニングした．

アルゴリズムは計算コストの関係から定数倍した整数型で演算している．チューニングされたパラメータを換算してみると大型犬は 3.6Hz，中型犬は 5.8Hz，小型犬は 7.1Hz の上下振動を中心に抽出していた．これらは，図 4 における歩行周期のそれぞれ 0.28s，0.17s，0.14s に相当するものであった．また式 (3) における歩行とみなす山の大きさ P の範囲は大中小型犬それぞれで 0.10m/s，0.09m/s，0.07m/s 以上としていた．代表的な結果として，コーギ犬 (5 才: 足長 23cm) の歩行と走行の様子を図 13, 14 に示す．それぞれ (a) は加速度センサの値，(b) はアルゴリズムが算出した鉛直方向の加速度 $v(i)$ である．これらの図よりそれぞれ 7 歩，4 歩の動きであることが確認される．

表 1 は 6 名の実験協力者が歩行の様子を写した動画を見て数えた歩数と，同期間の加速度センサの情報からアルゴリズムが算出した歩数を比較したものである．検証に用いたデータはチューニング用に採取したデータの中からドッグランの端から端まで途中で飛び跳ねたり止まったりすることなく最後まで歩き切れた部分から各犬種につき無作為に抽出した．表中には著者が判断した歩容も丸印で記している．複数の歩容に印があるものは途中で歩容が遷移したかどちらとも取れる歩き方をしたかである．なお協力者には事前に 2.1 節にて述べた犬の歩数の定義を説明している．表よりパピオンやラブラドルの歩数は評価者によって異っている．これらはキャンタで走っていると判断した

図 10 胴震い時の加速度

図 12 跳梁時の加速度

表 1 人とシステムによる歩数計測の比較

犬種と脚長 (mm)	含まれる歩容 (著者判断)				観測者が数えた歩数							アルゴリズムが 数えた歩数 (精度 %)	
	ウォーク	トロット	キャンタ	ギャロップ	1	2	3	4	5	6	平均		
キャバリエ (200)		○	○	○	30	31	32	29	30	30	30.3	28	(-7.69)
ケインテリア (180)		○			35	35	36	35	35	36	35.3	38	(+7.55)
コーギ (170)		○	○	○	29	27	28	27	28	27	27.7	28	(+1.20)
ジャックラッセル (160)		○			41	42	42	42	43	42	42.0	42	(±0.00)
シュナウザ (260)		○			26	28	28	27	27	27	27.2	23	(-15.34)
チャウチャウ (150)	○	○	○		29	30	29	30	31	29	29.7	32	(+7.87)
トイプードル (220)	○	○			25	26	25	27	27	26	26.0	25	(-3.85)
パグ (150)	○	○			39	39	39	39	39	39	39.0	39	(±0.00)
パピオン (180)			○	○	22	23	23	33	21	24	24.3	24	(-1.37)
ピンシャ (240)	○	○			30	30	31	30	30	30	30.2	30	(-0.55)
北海道犬 (500)	○	○			37	37	37	38	37	36	37.0	25	(-32.43)
ボメラニアン (190)		○			38	38	38	39	38	38	38.2	39	(+2.18)
ヨークシャテリア (120)		○			28	28	28	30	29	29	28.7	30	(+4.65)
ラブラドル (300)		○	○		16	17	16	16	17	13	15.8	13	(-17.89)

(a) 加速度センサ取得値

(b) 上下加速度成分への変換値

図 13 歩行 (ウォーク) 時の加速度

(a) 加速度センサ取得値

(b) 上下加速度成分への変換値

図 14 走行 (ギャロップ) 時の加速度

かギャロップと判断したかの違いによるものである。またシュナウザと北海道犬は人の計測に対しアルゴリズムが算出した歩数が少ない。調査の結果、これら二頭は引き綱を強く引き前足にあまり荷重がかかってない状態で歩いていたことがわかった。外見上はトロットのようでも鉛直加速度はキャンタやギャロップに近い形をしており、これが歩数の違いの原因だと考えられる。本歩数計は通常の歩行の歩数を数えるためのものであり、引き綱を強く引っ張る、身を伏せて忍び寄る、鼻先を地面に付けて匂いを嗅いで進む

といった通常でない歩き方は対象としていない。この特性は取扱説明書に明記し周知している。

一方このような事情がない通常の状態では人が数えた時との差は歩容にかかわらず $\pm 8\%$ 以内に収まっている。また胴震いに関しては採取したデータの中に目視で 131 回発生していた。このうち検出に成功したもの (真陽性) が 120 回、胴震いを検出できなかったもの (偽陽性) が 11 回、激しい動きを胴震いと間違えたもの (偽陰性) が 26 回あった。これらの結果は、犬の生活習慣を知る目的では十分な

精度だと考えている。

3.4 組込, 実装

ここまで述べたアルゴリズムを図 1 の装置内に実装した。小さな犬でも負担なく装着できるようにコンパクトな形状になっている (47×27×12mm, 16g)。また犬の色覚にとって明らかに食物と違うと言われる色調を採用している。コストと低消費電力を両立するため比較的計算能力が低い 8 ビットマイコン (78K0 シリーズ, ルネサス社) を用いた。ログの管理や通信を除く歩数計測部分のコードサイズは 2.3kbyte (アセンブリで記述), 使用メモリーは 520byte 程度である。算出した歩数や胴震いの回数, および温度は 10 分単位で蓄積され, 最長 14 日分記録できる。犬が寝ているなど一定時間動きがないとスリープモードに移行するといった消費電力を抑える機能も手強い, 電池 (CR2032) 一個で 4 ヶ月以上動作する。

4. む す び

加速度センサを用いた犬用歩数計を開発した。様々な種別と体格を持った 50 頭強の実測データを採取し, 人が数えた歩数との差が 8% 以内となる歩数計測アルゴリズムを作成した。このアルゴリズムの特徴は移動平均フィルタを組合せただけの簡単な構成を取っていることである。これはデジタルコンピュータが得意とする整数演算やメモリー操作によって実装できることを意味する。装置に組込まれたコードはわずか 2.3kbyte のサイズでボタン電池で数ヶ月駆動できるものとなった。これにより簡便かつコンパクトなアルゴリズムが様々な犬種や体格に対応できることを明らかにした。

本稿にて述べた歩数計は, 「わんだんと」⁹⁾ として 2012 年 11 月に製品化された。今後は歩数や胴震い以外にも犬にまつわる情報を得る装置や, 競走馬など他の動物への適用¹⁰⁾ を行っていく予定である。

最後に本研究を進めるにあたり, 富士通株式会社 ユビキタスビジネス戦略室, 三ツ山陽子氏, 水口亮氏, 富士通関西中部ネットテック株式会社 ユビキタスシステム事業部, 野村幸裕氏, 有居淳氏には犬の歩行データ採取に協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【文 献】

- 1) 千田, 伊東, 永嶋: “犬用歩数計の開発”, 映像学技報, **38**, 2, pp.63-68 (2014)
- 2) 日本バイオロギング研究会: “バイオロギング”, 京都通信社 (2009)
- 3) M. Moreau, S. Siebert, A. Buerkert, and E. Schlecht: “Use of a tri-axial accelerometer for automated recording and classification of goats' grazing behaviour”, Applied Animal Behaviour Science **119**, pp.158-170 (2009)
- 4) S. Watanabe, M. Izawa, A. Kato, Y. Ropert-Coudert, and Y. Naito: “A new technique for monitoring the detailed behaviour of terrestrial animals: A case study with the domestic cat”, Applied Animal Behaviour Science **94**, pp.117-131 (2005)
- 5) N. Chapinal, A. M. de Passillé, M. Pastell, L. Hänninen, L. Munksgaard, and J. Rushent: “Measurement of acceleration while walking as an automated method for gait assessment in dairy cattle”, Journal of Dairy Science, **94**, 6, pp.2895-2901 (2011)
- 6) H. Tanida, Y. Koba, J. Rushen, and M. de Passillé: “Use of three-

dimensional acceleration sensing to assess dairy cow gait and the effects of hoof trimming”, Animal Science **82**, 6, pp.792-800 (2011)

- 7) C. Ladha, N. Hammerla, E. Hughes, P. Olivier, and T. Plötz: “Dog's Life: Wearable Activity Recognition for Dogs”, Proc. of Int. Conf. Ubiquitous Computing, pp.415-418 (2013)
- 8) 安藤, 唐山: “犬のライフログシステムに向けた日常動作の判別”, 第 18 回日本バーチャリアリティ学会大会, 13A-2 (2013)
- 9) <http://www.wandant.jp/>
- 10) 千田, 辰巳, 伴, 山本, 河合, 竹中: “スマートフォンを用いた軽種馬の歩行判定システムの開発”, 日本ウマ科学会第 27 回学術集会講演要旨, 17, p.30 (2014)

せんた ようすけ
千田 陽介 1994 年, 東北大学大学院精密工学専攻修士課程修了。1997 年, (株) 富士通研究所に入社。2005-8 年, (財) 九州システム情報技術研究所へ出向。2009 年, 九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了。加速度計による歩行解析システムの開発に従事。博士 (工学)

いとう としお
伊東 利雄 2001 年, 東京大学大学院数理科学研究科博士課程修了。2003 年, (株) 富士通研究所に入社。2007 年, カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。生物規範型コンピュータシステムの開発に従事。博士 (数理科学)

ながしま ふみお
永嶋 史朗 1989 年, 慶應義塾大学大学院後期博士課程修了。同年, (株) 富士通研究所へ入社。生物規範型コンピュータシステムの開発に従事。工学博士。