

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# スマートフォンを用いた歩行時心拍数推定法

著:隅田麻由 水本旭洋 安本慶一

瀧田 孔明

富山県立大学 電子・情報工学科

May 28, 2021

## 背景

ウォーキングは体脂肪の減少, 筋力の増加といった健康増進・維持に効果的であるだけでなく, 特別な器具なしに誰でも手軽に実施できるという利点がある. しかし, 負担の高い無理なウォーキングを続けた場合は, 心臓や関節に大きな負担がかかり, ウォーキングに対する意欲の低下や継続性の低下につながる.

## 目的

継続性の高い効果的なウォーキングのためには, 個人の身体条件に応じた適切な負担度でウォーキングを行う必要がある.

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 提案手法

3/25

## 提案手法の内容

ウォーキングの利点である「手軽さ」と、ウォーキングに求められる「各個人に適した負担度」の2点に着目したウォーキング支援システムの実現を目指し、スマートフォン搭載機能のみを用いた歩行における心拍数の推定手法を提案する。

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 提案手法の課題

- ① スマートフォンでは心拍数を直接測定できない。
- ② 心拍数は運動強度の変化にともない変化するが、その変化は突発的である。
- ③ 心拍数の変化度合いおよび大きさは身体条件に応じた違いがある。

## 提案手法の解決策

- ① 課題 1 と 2 は、実際の心拍数データに機械学習を適用することで、心拍数予測モデルを構築する。
- ② ユーザをいくつかのカテゴリに分類の上、心拍数の変化度合いを反映するパラメータを新たに導入しカテゴリごとに最適化する。

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 負担度の指標

## 身体的負担度

身体的負担度は、測定の際に RPE(主観的運動強度) や心拍数が用いられる。

以下の表は RPE の 15 段階のボルグ・スケールというものである。

表 1 ボルグ・スケール

Table 1 Borg scale.

RPE	主観的運動強度	RPE	主観的運動強度
20		12	
19	非常にきつい	11	楽である
18		10	
17	かなりきつい	9	かなり楽である
16		8	
15	きつい	7	非常に楽である
14		6	
13	ややきつい		

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## システムの要件

- ① 普及デバイスによる負担度の測定
- ② ウォーキング中の負担度変化の推定
- ③ 年齢, 性別, 身体能力などの個人差の考慮

## 要件 1 と 2 の基本方針

- ① ニューラルネットワークなどの機械学習を使用し, 歩行速度, 勾配などのデータを入力とするモデルを構築する.
- ② 心拍数変化の性質とよく似た性質を持ち, 心拍数との関連性も高いと考えられる酸素摂取量に着目する.

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 要件3の基本方針

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

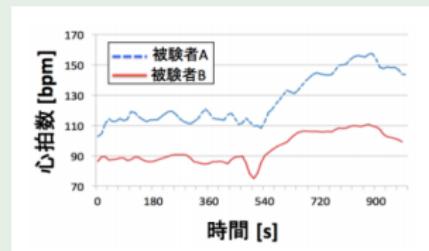


図 1: 運動習慣の異なる被験者が同ルートを同時にウォーキングした場合の心拍数変化

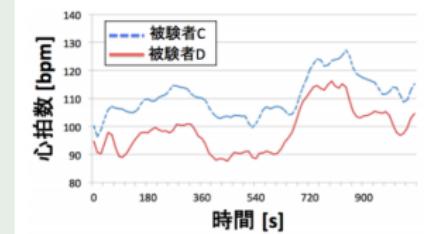


図 2: 安静時心拍数の異なる被験者が同ルートを同時にウォーキングした場合の心拍数変化

上記の図より、年齢や生活習慣などのプロファイルを基にカテゴリを作成し、心拍数モデルを構築する。

# 提案システムの設計

8/25

## 提案システムの設計

本システムは、普及デバイスであるスマートフォンのみを利用し、ウォーキングを通して運動を行いたいユーザを対象とし、3軸加速度センサおよびGPSセンサを搭載したスマートフォン用アプリケーションとしての利用を想定する。

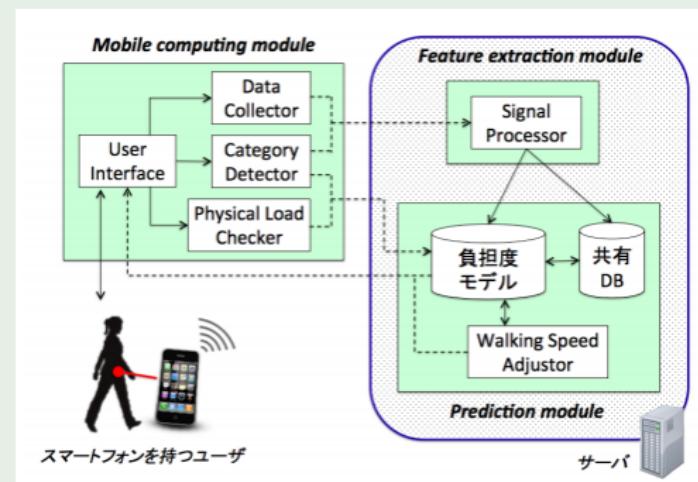


図 3: 提案システムのアーキテクチャ

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 心拍数モデルの入力パラメータ (特徴量)

本研究では、歩行データと心拍数の関連付けのために、ニューラルネットワークを用いて心拍数を予測する心拍数モデルを構築する。心拍数の予測では、4種類の加速度の振幅 (X軸, Y軸, Z軸, 3軸合成)、歩行速度、勾配、酸素摂取量を用いる。

## 特徴量の取得方法

スマートフォンに搭載されている加速度センサおよびGPSデバイスを用いて、歩行中の加速度および位置情報を収集する。

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 特徴量の抽出 (1)

10/25

## 加速度の振幅

3 軸加速度センサにより得られた各軸のデータおよび3軸合成のデータを使用し,4種類の振幅を抽出する.

## 歩行速度

$$S_k = Dist_k/W$$

$$Dist_k = ST_k \cdot SL \cdot \cos(\arctan(G_k/100))$$

$$SL = Dist_{total}/ST_{total}$$

$S_k$ : ウィンドウサイズが  $W[s]$  である  $k$  番目のウィンドウにおける歩行速度の水平成分

$Dist_k$ : 水平方向の移動距離

$ST_k$ : 歩数

$SL$ : 歩行ルートの総距離 ( $Dist_{total}$ ) および歩数の総数 ( $ST_{total}$ ) から算出する歩数

$G_k$ : 勾配

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 特徴量の抽出 (2)

## 勾配

勾配は以下の式で算出できる。

$$G_k = (AD_k / Dist_k) \times 100$$

$G_k$ :k 番目のウィンドウにおける勾配

$AD_k$ :標高差

$Dist_k$ :移動距離

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 特徴量の抽出 (3)

12/25

## 酸素摂取量の増加時と減少時

$$\Delta U = K e^{-\frac{\tau_u}{t}}$$
$$\Delta D = K(1 - e^{-\frac{\tau_d}{t}})$$

$\Delta U$ :酸素摂取量の増加量

$K$ :運動に必要なエネルギーを生み出すために必要な酸素量

$\tau_u$ :酸素需要量に収束するまでの時間を表すパラメータ (増加時)

$\Delta D$ :酸素摂取量の減少量

$\tau_d$ :酸素需要量に収束するまでの時間を表すパラメータ (減少時)

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 特徴量の抽出 (4)

## 酸素需要量 K の算出

$$K = R + H + V$$

$$R_{Oxygen} = 3.5$$

$$H_{Oxygen} = 0.1 \times speed$$

$$V_{Oxygen} = 1.8 \times speed \times grade$$

$R_{Oxygen}$ : 安静時の酸素摂取量

$H_{Oxygen}$ : 歩行速度の水平方向成分のみを考慮して算出した酸素摂取量

$V_{Oxygen}$ : 勾配の増加にともない必要となる、歩行速度の垂直方向成分のみを考慮して算出した酸素摂取量

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 酸素摂取量推定処理

## 酸素摂取量推定処理の基本的な流れ

ステップ 1:酸素需要量の計算

ステップ 2:変化傾向の決定

ステップ 3:酸素摂取量の変化量の計算

- $K_i > K_{i-1}$  (増加) の場合

$$\Delta U_i = K_i e^{-\frac{\tau_i}{P}}$$

$$V_i = V_{i-1} + \Delta U_i$$

- $K_i < K_{i-1}$  (減少) の場合

$$\Delta D_i = K_i (1 - e^{-\frac{\tau_i}{P}})$$

$$V_i = V_{i-1} - \Delta D_i$$

- $K_i = K_{i-1}$  (変化なし) の場合

- $P$  秒前の変化傾向が「増加」の場合

$$\Delta U_i = K_i (e^{-\frac{\tau_i}{2P}} - e^{-\frac{\tau_i}{P}})$$

$$V_i = V_{i-1} + \Delta U_i$$

- $P$  秒前の変化傾向が「減少」の場合

$$\Delta D_i = K_i \{ (1 - e^{-\frac{\tau_i}{2P}}) - (1 - e^{-\frac{\tau_i}{P}}) \}$$

$$V_i = V_{i-1} - \Delta D_i$$

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 機械学習に基づくモデルの構築

## モデルの構築

今回は、ニューラルネットワークを用いて機械学習を測定データに適用することで心拍数モデルを構築する。

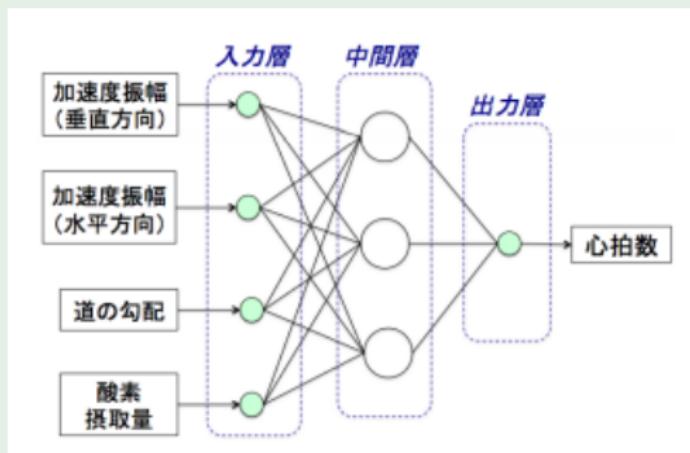


図 4: 階層型ニューラルネットワーク

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# カテゴリの作成

16/25

## カテゴリ作成方法

同一カテゴリに属するユーザはよく似た心拍数変化を示すと仮定して、ユーザの運動習慣や年齢などを基にカテゴリを作成する。

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 心拍数の正規化

## 正規化後の心拍数データ

心拍数の大きさの違いを取り除くために、学習に使用するすべての心拍数データの初期値を 0 にすることで正規化を行う。以下に正規化後心拍数データの式を記述する。

$$Ha_i = Hb_i - HR_{start}$$

$Ha_i$ :正規化後の心拍数データ

$Hb_i$ :正規化前の心拍数データ

$HR_{start}$ :開始時心拍数

## 補正前の心拍数予測値

予測後の心拍数を開始心拍数で補正することで、各ユーザの本来の心拍数の大きさに変換できる。

$$Pa_i = Pb_i + (HR_{start} - Pb_1)$$

$Pa_i$ :補正前の心拍数予測値

$Pb_i$ :補正前の心拍数予測値

$HR_{start}$ :開始時心拍数

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 評価実験の設定

## 被験者と実験内容

被験者:18人(20代, 男性15人, 女性3人)

実験内容:異なる5つの歩行ルートを歩行

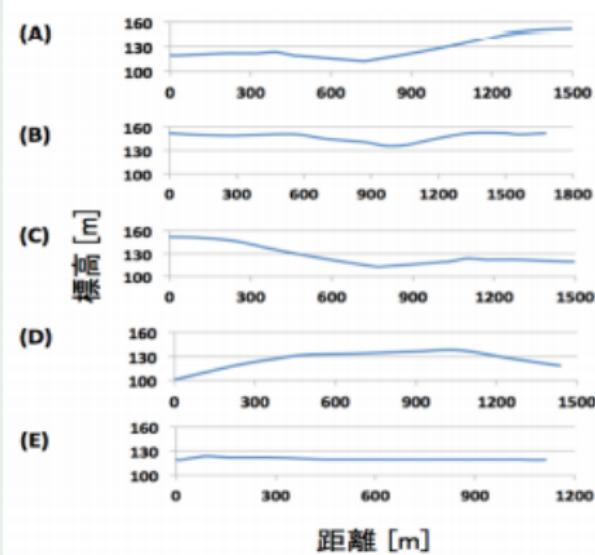


図 5: 歩行ルートの標高

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# カテゴリの作成

19/25

## カテゴリ分類

カテゴリ 1: 現在運動習慣なし & 過去運動習慣なし

カテゴリ 2: 現在運動習慣あり & その継続期間が短い, もしくは, 現在運動習慣なし & 過去の運動習慣あり

カテゴリ 3: 現在運動習慣あり & その継続期間が長い

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 実験結果

表 2 各歩行ルートにおけるカテゴリごとの心拍数

Table 2 Heart rate for every category on each walking route.

		A	B	C	D	E
カテゴリ 1	最小	99.0	106.9	104.7	99.2	105.5
	最大	151.6	148.6	137.4	137.3	127.3
	変動幅	52.5	41.7	32.8	38.1	21.9
	平均	125.1	125.9	119.9	123.9	117.6
カテゴリ 2	最小	87.9	96.5	92.7	96.3	100.8
	最大	134.3	131.2	124.6	133.8	122.2
	変動幅	46.4	34.7	31.9	37.6	21.4
	平均	113.0	112.8	108.3	118.4	112.3
カテゴリ 3	最小	78.2	87.6	87.2	81.4	80.8
	最大	108.7	113.5	106.3	113.0	99.8
	変動幅	30.5	25.9	19.2	31.6	19.0
	平均	95.4	96.7	96.1	96.0	88.4

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 入力パラメータの選別

個人差の影響を受けにくいものより, 酸素摂取量 (VO), 勾配 (G), X 軸 (垂直), 方向および Y 軸 (水平) 方向の加速度の振幅 (AX,AY) の 4 つを心拍数モデルの構築で使用する入力パラメータとして選択した.

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 予測誤差の算出方法

まず、心拍数の予測値と実測値より計算する平均絶対誤差を算出する。

$$Err(s, r, n) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} |phr(\frac{W}{2}i) - rhr(\frac{W}{2}i)|}{n}$$

$$n = \frac{2Q}{W}$$

phr:予測心拍数

rhr:実測心拍数

Q:ある歩行ルートに対する歩行時間

これより、以下の式で全被験者および全歩行ルートについて平均誤差を算出できる。

$$ErrM(m) = \frac{\sum_{r \in Route} \sum_{s \in Subject} Err(s, r, n)}{|Subject| \times |Route|}$$

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

# 個人のそれぞれの結果

表 3 様々な歩行ルートに対する心拍数予測結果および複数被験者に対する心拍数予測結果

Table 3 Prediction results (MAE) for all subjects/routes.

被験者 (sub)	カテゴリ	歩行ルート (route)					平均
		A	B	C	D	E	
s1	1	7.13	9.28	4.16	10.89	1.56	6.60
s2	1	15.07	5.24	4.73	16.24	3.00	8.86
s3	1	4.64	5.91	4.00	10.15	8.40	6.62
s4	1	5.41	5.35	7.64	5.05	2.39	5.17
s5	1	3.23	4.42	4.16	4.14	5.42	4.27
カテゴリ 1 平均		7.10	6.04	4.94	9.29	4.15	6.40
s6	2	5.80	2.92	3.05	9.45	3.93	5.03
s7	2	4.44	10.52	4.44	4.83	6.33	6.11
s8	2	12.00	4.84	4.11	13.86	4.56	7.87
s9	2	2.86	3.22	5.17	4.81	7.28	4.67
s10	2	5.11	4.00	8.24	5.95	3.65	5.39
s11	2	6.83	9.63	2.60	10.70	7.96	7.55
s12	2	11.32	7.12	5.66	7.85	6.91	7.77
s13	2	2.86	3.92	4.44	4.71	4.60	4.11
s14	2	3.93	3.19	4.73	18.23	1.43	6.30
s15	2	4.97	4.20	9.70	9.23	14.38	8.50
s16	2	11.46	7.81	8.11	14.32	4.05	9.15
カテゴリ 2 平均		6.51	5.58	5.48	9.45	5.92	6.60
s17	3	8.13	6.87	6.60	4.09	3.35	5.81
s18	3	4.99	9.96	4.58	3.30	1.67	4.90
カテゴリ 3 平均		6.56	8.42	5.59	3.7	2.51	5.36
平均		6.68	6.02	5.34	8.77	5.05	6.37

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## 結果や改善点

- ① ほとんどのルートでは目標予測誤差 7bpm を下回る結果を得ることができた。
- ② 勾配があるルートを今後も学習データの取り入れる必要がある。
- ③ 酸素摂取量の算出はほかのパラメータの影響を受けるため誤差が出やすい。

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ

## わかったこと

- ① 7bpm 以下の平均誤差で心拍数の推定ができること.
- ② 提案する酸素摂取量推定手法を適用することで, 10bpm 以上誤差を軽減できること.

## 今後の課題

- ① 心拍数特性が異なる被験者を加えた実験や長時間のウォーキングを対象にした実験, 歩行速度をコントロールした場合の心拍数予測について評価すること.
- ② スマートフォンで予測心拍数を算出できるよう他のより軽量な学習モデルの使用の検討

はじめに

負担度を考慮した  
ウォーキング支援  
システム

スマートフォンを  
用いた心拍数推定

個人差を考慮した  
心拍数推定

心拍数モデルによ  
る心拍数予測誤差  
の評価

まとめ