健康志向歩行ナビゲーションのための加速度センサによる身体的負担度推定法

隅田麻由[†1]　今津眞也[†1]
水本旭洋[†1]　安本慶一[†1]

個人の身体能力に応じた歩行ルートを選択することで，効果的かつ継続性の高いウォーキングが期待できる．しかし，歩行時に感じる身体的負担度には個人差がある．また心拍数や RPE（主観的運動強度）を用いる身体的負担度の推定は，手間がかかる．本研究では，個人に応じた歩行ルートを推薦するナビゲーションシステムの実現を目指し，加速度センサのみを用いた身体的負担度の推定法を提案する．提案手法では，年齢や性別などによるユーザのカテゴリ分類を行い，各カテゴリの被験者に対し，予め，加速度センサと心拍計により歩行時の基礎データを収集する．そして，加速度と心拍数を関連付けた基礎データと，多数のユーザから集めた様々なルート歩行時の加速度データを用いることで，様々な歩行ルートに対する身体的負担度の推定を行い，ユーザにとって最も負担度の少ない歩行ルートを算出する．

Estimation of Perceived Exertion using Acceleration Sensor for Health-Conscious Walking Navigation

Mayu Sumida,[†1] Shinya Imazu,[†1]
Teruhiro Mizumoto[†1] and Keiichi Yasumoto[†1]

For health-care purpose, selecting a walking route suitable for individual physical ability will contribute to effective and continuous walking. However, there is a difference in perceived exertion during walking among individuals. In addition, it is costly to estimate the perceived exertion by heart rate or RPE (Rating of Perceived Exertion). In this paper, we propose a method to estimate the perceived exertion by walking of each person with an acceleration sensor, aiming to realize the health-conscious navigation system that recommends the walking route suitable for individuals. For this purpose, we classify users into some categories by their gender, age and habitual factors, then collect acceleration and heart rate data for a testee of each category with the corresponding sensors. Using the collected data, we investigate an impact of the acceleration on the heart rate, and propose a method to suggest each user the walking route with the least perceived exertion from the basic data and acceleration data collected for various walking routes in participatory sensing manner.

1. はじめに

ウォーキングは健康維持・増進に効果的な運動の 1 つである．また個人の希望する運動量に応じた歩行ルートを選択することで，効果的かつ継続的なウォーキングが期待できる．しかし選択する歩行ルートによっては，身体的負担度が高すぎることでウォーキングに対する意欲が低下し，ウォーキングの継続が困難になる可能性がある．また，高齢者や特定の持病保持者については，身体的負担度が高い状態が続くことが危険な場合もある．そこで本研究では，個人に応じた歩行ルートを推薦するナビゲーションシステムの実現を目指し，様々な歩行ルートに対する身体的負担度の推定手法を提案する．

身体的負担度の推定においては，(i) 身体的負担度には個人差がある，(ii) 心拍計や主観的評価のアンケートを用いた測定方法は，手間がかかり煩わしい，(iii) 様々な歩行ルートに対する身体的負担度の測定は困難である，という問題が考えられる．

そこで，(i) および (ii) の解決のため，例えば「20 代男性，運動習慣有り」，「30 代女性，運動習慣無し」というように，年齢や性別などの属性によりユーザをいくつかのカテゴリに分類し，各カテゴリの被験者に対して，予め，加速度センサと心拍センサを装着した状態で基礎データの測定を行う．そして，加速度データと心拍数データを関連付けることで，加速度データのみから心拍数を，更には身体的負担度を推定できるようにする．加えて，(iii) の解決のため，ユーザからルート歩行時の加速度データを収集および共有しておき，歩行ルート検索時に加速度データから身体的負担度を推定できるようにする．

また，本研究で提案するナビゲーションシステムでは，ユーザの希望する運動時間および消費カロリーを満たし，かつユーザにとって最も身体的負担度の低い歩行ルートを推薦する．消費カロリーは，歩行ルートの勾配および距離，歩行速度から算出する．そして，システム内のデータベースに蓄積されたユーザの属するカテゴリの歩行データから，心拍数および身体的負担度を推定し，最も身体的負担度が低いものを歩行ルートとして推薦する．更

†1 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute Science and Technology

に，ウォーキング中には，加速度データと共にユーザの位置および歩行速度を定期的にアップロードし，加速度データから身体的負担度を推定することで,「もう少しゆっくり歩いてください」,「やや早く歩いてください」などの歩行速度に関するアドバイスを提示する．

2. 関 連 研 究

本研究では，各歩行ルートに対する歩行時の運動強度および運動強度の時間変化の推定，そしてそれに対する個人の身体的負担度の推定を行う．

運動強度を示す指標として，摂取酸素量を基に身体活動の強さを示す METs，主観的な運動強度を示す RPE（Rating of Perceived Exertion），心拍数などが挙げられる[1]．

運動強度の推定に関する研究としては，栗原ら[2] の 3 軸加速度センサによる METs の推定が挙げられる．ここでは，腰に装着した 1 つの 3 軸加速度センサを用いて，一定の速度で 50m を歩行した場合の運動強度を 0.6METs の平均誤差で推定している．しかし，METs は絶対的な運動強度であり，たとえ同じ METs であっても，心拍数などの生体反応が人によって異なる可能性がある．よって，本研究で考慮すべき身体的負担度に関する個人差は反映されないと考えられる．

これに対して，Tapia ら[3] は加速度センサと心拍計を併用し，運動種別とその運動強度の推定をリアルタイムに行っている．ここでは，心拍数を特徴量として用いることにより，推定精度がわずかに改善されている．よって，運動強度の推定には，心拍計の利用が有用であると考えられる．最近では SUUNTO 社の t6d[4] や POLAR 社の RS100[5] のような腕時計型のワイヤレス心拍計があり，手軽に運動中の心拍数を測定することができる．しかし，このような心拍計は，トランスミッターと呼ばれる小型の装置を胸部に装着する必要があるため，装着に手間がかかり，煩わしい．加えて，デバイスコストが高いという問題もある．また，この研究では，歩行速度と勾配の組合わせにより 7 種類の運動強度を設定し，運動強度の推定を行っているが，個人の身体的負担度の推定までは行われていない．

更に，個人の身体的負担度の測定には，Borg が定義した RPE[6] がよく用いられる．これは，6 から 20 までの 15 段階からなるボルグ・スケールとしてよく知られている．RPE と心拍数との間には直線的な相関関係があり，スケールの数字は心拍数の 1/10 に対応している[7]．よって，これは主観的な運動強度を数値化する際に有効であり，心拍数と身体的負担度の関連付けが可能となる．ただし，RPE を用いる測定方法は，スケール数が多いため分かりにくく，手間がかかると考えられる．

また，既存のナビゲーションシステムとして，ソニーの徒歩ナビゲーション NAV-U[8] や，NAVITIME 社の自転車用ルート検索サービス[9] が挙げられる．これらのシステムでは，楽なルートの検索が可能であるが，ルートの勾配を基準としており，個人の身体能力を考慮したルートを検索することはできない．そのため，坂道が少ないルートを選択した場合でも，人によっては負担を感じることが考えられ，これでは身体に無理な負担がかかってしまう可能性がある．

既存研究では，数分間の運動を対象として運動強度の推定を行っているため，推定期間における運動強度の変化は考慮されておらず，加速度センサを用いた個人の身体的負担度の推定についても行われていない．また，既存のナビゲーションシステムにおいても，個人の身体能力を考慮したルートを検索できるシステムは存在しない．これより，本研究では，加速度センサによる歩行時の身体的負担度推定手法と，その手法に基づき，個人の身体能力に応じた歩行ルートを推薦するナビゲーションシステムを提案する．

3. 提案システムについて

3.1 システム要件

提案システムの実現には，次に挙げる要件を満たす必要がある．(i) 年齢，性別，身体能力などの個人差を考慮した上で，身体的負担度の推定を行う，(ii) 様々な歩行ルートに対する身体的負担度を推定する，(iii) 心拍計を使用せず，加速度センサのみで測定を行う．そのために，本研究の提案手法では，ユーザのカテゴリ分類を行い，各カテゴリのユーザから歩行ルートに対する身体的負担度データを収集することで，身体的負担度に関する個人差を解消する．また，予め，各カテゴリの被験者に対して，加速度センサおよび心拍計を装着した状態で基礎データの測定を行う．そして，加速度データと心拍数の関連付けにより，加速度センサのみで，心拍数，更には身体的負担度の推定を行う．

3.2 システムの概要

提案システムについて，**図 1** に示す．このシステムは運動目的であるユーザを対象とし，スマートフォンのような GPS と 3 軸加速度センサを搭載した携帯端末用アプリケーションとしての利用を想定している．

本システムは主に，クラウドに置かれている基礎データベースおよび共有データベース，携帯端末という 3 つの部分から構成される．基礎データは，予め，加速度センサおよび心拍数センサにより計測した被験者のデータを指す．これは，例えば，4.1 節で詳述するトレッドミルテストにより測定し，ユーザの年齢や性別などの属性により分類したカテゴリごとに，加速度データ，歩行速度，消費カロリー，心拍数データ，身体的負担度データを用意す

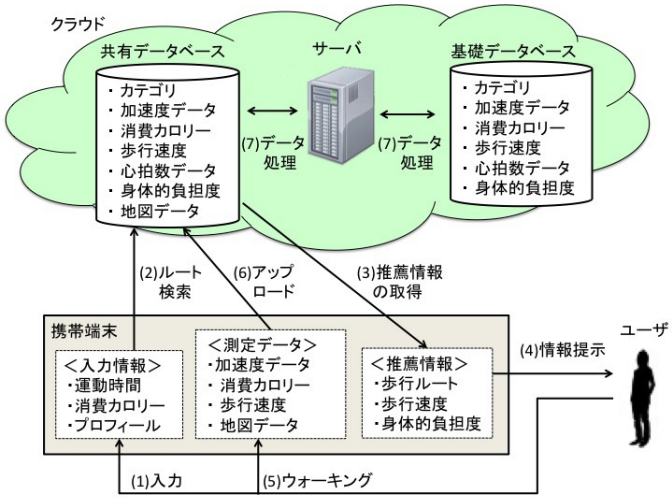

図 1　システムの概要
Fig. 1　The outline of our system.

る．ここでの身体的負担度データとは，ユーザが歩行中に感じた身体的負担度を，5 段階で評価したものである．

また共有データは，GPS および加速度センサにより測定されるユーザの歩行データを指す．ユーザのカテゴリごとに歩行データを蓄積し，様々な歩行ルートに対する歩行データを共有できるようにする．基礎データに加え，各歩行ルートにおける勾配の情報などが予め与えられており，利用できるとする．

本システムの歩行ナビゲーションは，携帯端末内のアプリケーションを介して行う．まずユーザは，希望する運動時間および消費カロリー，プロフィールの入力を行う（図 1（1））．そして 4.1 節で述べるように，入力されたプロフィールからユーザが属するカテゴリを決定し，共有データベースに蓄積されている同一カテゴリのデータを基に，歩行ルートおよび身体的負担度を携帯端末画面に表示する（図 1（2）～（4））．推薦される歩行ルートの選択方法については，5 章で述べる．

本システムにより推薦情報が提示された後，ユーザはウォーキングを開始する．このとき，加速度センサから取得される加速度データや，GPS から取得されるユーザの位置情報および歩行速度が，携帯端末からクラウドへ定期的にアップロードされる（図 1（5），(6)）．サーバ上では，アップロードされた歩行データから，基礎データとの関連付けにより心拍数の推定を行う．そして更に，推定した心拍数から，ユーザに無理な負担がないか，もしくは運動強度を高くする余裕があるかどうかを確認する（図 1（7））．もしユーザの歩行速度が適切でない場合には，ユーザに対して歩行速度のアドバイスを提示する（図 1（2）～（4））．これは,「もう少しゆっくり歩いてください」もしくは「やや早めに歩いてください」などのナビゲーションを，音声案内もしくは画面表示により行う（図 1（4））．ウォーキング終了後には，ユーザの主観的な身体的負担度もしくは心拍数データをアップロードしても良い．このデータは，ユーザの歩行データと共に，共有データベースへと蓄積される．ユーザビリティを保つという観点から，主観的負担度の評価もしくは心拍数データの提供は必須ではなく，各ユーザの意志に委ねる．

4. 提 案 手 法

本章では，3.1 節で述べたシステム要件を満たすための手法について述べる．

4.1　基礎データの収集

基礎データの収集は，いくつかの属性により分類した各カテゴリの被験者に対して，加速度センサおよび心拍計を装着した状態でトレッドミルテストを行う．属性の例としては，年齢，性別，体型，日頃の運動習慣，喫煙の有無などが挙げられる．そして，収集されたデータは，図 1 に示した基礎データベースへと蓄積される．

トレッドミルテストでは，各カテゴリに属する被験者に対し，様々な歩行速度および勾配における歩行データを収集する．ここでの歩行データとは，加速度データ，歩行速度，消費カロリー，心拍数データ，身体的負担度を指す．

テストは，事前に各被験者の安静心拍数を測定しておき，できるだけ安静状態に近い状態から開始する．**表 1** に示すようなステージ 1 からステージ 4 までの異なる歩行速度，勾配での歩行を 3 分間ずつ順次行いながら，心拍数および加速度の測定を行う．そして，各ス

表 1　トレッドミルテストの設定条件
Table 1　The condition of tredmil test.

ステージ	1	2	3	4
時間（分）	3	3	3	3
歩行速度（m/h）	3.2	3.2	4.8	4.8
勾配（%）	0	7	7	10
METs	2.5	4.4	6.1	7.4

表 2　身体的負担度の評価
Table 2　The evaluation of perceived exertion.

レベル	主観的評価
1	何も感じない
2	やや負担を感じる程度
3	負担は高いが，運動の継続は可能
4	休憩したい程，負担が高い
5	継続不能

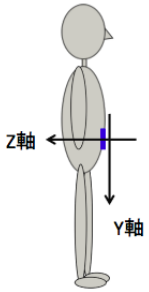

図 2　加速度センサの向き
Fig. 2　The direction of a acceleration sensor.

テージ終了時に，主観的な身体的負担度を**表 2** に示す 5 段階で記録する．これは，被験者が感じる身体的負担度と，各ステージで計測される心拍数の間の関係を確認するために使用する．また全ステージ終了後には，心拍数の回復時間を測定する．

ここで，表 1 の条件の下でテストした場合の結果を示す．テストでは，腕時計型のワイヤレス心拍計（SUUNTO，t6d）を腕に装着し，腰（前面，中央）に 1 つの 3 軸加速度センサ（TOSHIBA，REGZA Phone IS04）を装着した．加速度センサは**図 2** に示す向きに固定し，この図において手前が X 軸の正方向である．

図 3 は 2 秒ごとに計測した心拍数の時間変化であり，5 点移動平均を求めることにより，平滑化を行った．stage1〜 stage4 の記述は，各ステージを表している．また**図 4** および**図 5** は，サンプリング周波数を 50Hz として測定した各ステージにおける加速度データの波形であり，それぞれ，X 軸方向および Y 軸方向の加速度データ，Z 軸方向の加速度データである．ここでは，左上から順に stage1，stage2，stage3，stage4 となっている．そして**表 3** および**表 4** では，それぞれ，各ステージにおける加速度データの平均振幅，周波数ピークを示している．周波数ピークは，各ステージにおける加速度データのパワースペクトルから，パワースペクトル密度（PSD）が最大である周波数を指す．

図 3 から，運動強度が高まるにつれて，心拍数が徐々に増加していることが分かる．そして，表 3 および図 4，図 5 から，加速度データの振幅における増加傾向が見られる．表 3 から分かるように，X 軸方向の変化はあまり見られないが，Y 軸方向および Z 軸方向の振幅が大きく増加している．

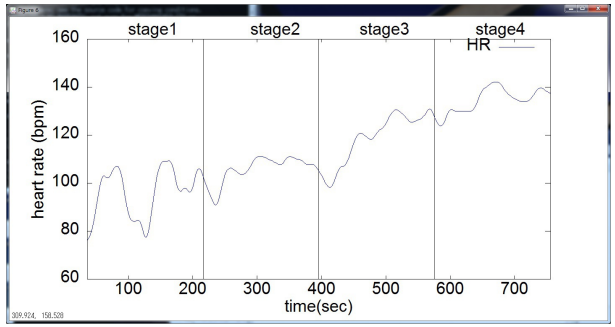

図 3　心拍数データ
Fig. 3　The heart rate data.

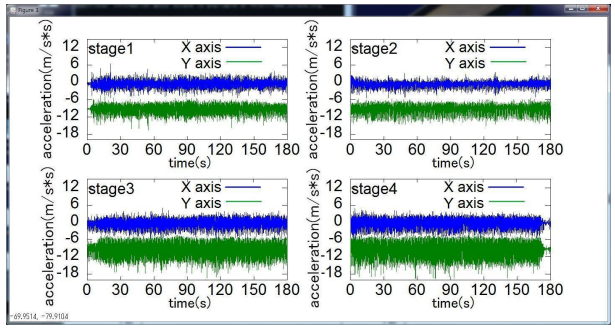

図 4　X 軸および Y 軸方向の加速度データ
Fig. 4　The acceleration data of X axis and Y axis.

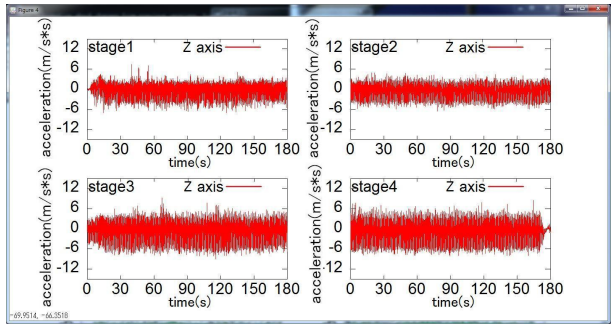

図 5　Z 軸方向の加速度データ
Fig. 5　The acceleration data of Z axis.

表 3　加速度データの振幅
Table 3　The amplitude of acceleration data.

ステージ	1	2	3	4
X 軸	4.367	4.172	4.663	4.749
Y 軸	4.510	4.597	6.036	6.516
Z 軸	7.578	7.335	8.720	9.008

表 4　加速度データにおける周波数ピーク
Table 4　The frequency peak of acceleration data.

	ステージ	1	2	3	4
X 軸	周波数ピーク（Hz）	10.24	8.92	5.98	5.98
	PSD	210.49	78.64	593.18	901.18
Y 軸	周波数ピーク（Hz）	3.88	3.53	3.98	4.00
	PSD	1232.80	1513.90	7853.60	17366.00
Z 軸	周波数ピーク（Hz）	3.88	3.52	3.98	4.00
	PSD	1635.20	1804.20	4703.30	8762.10

更に表 4 より，Y 軸および Z 軸において，歩行速度が上がると，周波数ピークおよび PSD が増加していることが分かる．また，ステージ 3 とステージ 4 を比較した場合，周波数ピークおよび PSD が増加していることが分かる．これは，勾配の違いにより増加したと考えることができ，特に Y 軸方向の PSD が大きく増加していることから，勾配がきつくなるにつれ，身体の上下方向の動きが増えると考えられる．

この実験により，加速度データの振幅と心拍数の増加は何らかの関係を持つことが分かった．また，歩行速度および勾配の変化は，身体の前後方向および上下方向の加速度に影響すると考えられる．これは，Y 軸方向および Z 軸方向における周波数ピークがほぼ一致していることから，歩行運動における周期性がこれらの軸に表れているためであると考えられる．

4.2　加速度センサによる身体的負担度の推定

本研究では，加速度データと心拍数を関連付けることで，加速度データから心拍数ならびに身体的負担度の推定を行う．

4.1 節で示したように，運動強度が高くなるにつれ，加速度の振幅は増加する．そこでまず，加速度の振幅の大きさと歩行時間の積を計算する．これは，歩行中のエネルギーに相当すると考えられる．そして，エネルギーの増減と心拍数の増減についての関連性を調べることで，加速度データと心拍数の関連付けを試みる．また，その他に加速度データから得られる，平均，分散，パワースペクトル，周波数のピークなどを特徴量とすることで，加速度データと心拍数の関連付けを行う．データのより詳細な分析および具体的な関連付けの方法は，今後の課題である．

最後に，心拍数を基にして身体的負担度を決定する．これは 2 章で述べた RPE と心拍数の関係性より，定量的に決定することが出来ると仮定する．**表 5** に示す小野寺ら[10] により作成された日本語用ボルグ・スケールを参考にすると，例えば，**表 6** に示すような心拍数と身体的負担度の関連付けを行うことが出来る．

5.　歩行ルートの選択方法

本章では，歩行ナビゲーションに必要な歩行ルートの選択方法について述べる．これは，3 章で述べたように，ユーザが歩行前に入力した運動時間および消費カロリーを基に決定する．以下に，歩行ルート決定のためのアルゴリズムを示す．

手順 1：ユーザのカテゴリ決定　ユーザが入力したプロフィール情報を用いて，ユーザのカテゴリを決定する．

手順 2：候補ルートの選択　候補となる歩行ルートを全て見つけ出し，これらを候補ルート群とする．ただし，本研究では，これらは全て与えられているものとする．

手順 3：歩行速度の算出　候補ルート群に属する各歩行ルートに対し，歩行速度の算出を行う．ここでは，各歩行ルートの距離をユーザの希望する運動時間で除算することで，歩行

表 5　ボルグ・スケール
Table 5　Borg's scale.

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

表 6　心拍数と身体的負担度評価の関係
Table 6　The relation between heart rate and perceived exertion .

レベル	主観的評価	心拍数 (bpm)
1	何も感じない	60〜100
2	やや負担を感じる程度	101〜130
3	負担は高いが，運動の継続は可能	131〜150
4	休憩したい程，負担が高い	151〜170
5	継続不能	180〜200

速度を求めることが出来る．しかし，この場合は，ユーザがどんなルートも一定速度で歩行するということになってしまうため，歩行ルートの勾配を考慮し，勾配に応じて時間を傾斜配分することにより歩行速度を求める．

手順 4：消費カロリーの計算　手順 3 で計算した歩行速度および勾配を基に，各歩行ルートに対する消費カロリーを計算する．消費カロリーの計算には．ACSM により定義された下記の算出式[11] を用いる．

$$VO_2 = R + H + V$$
$$R = 3.5$$
$$H = 0.1 * speed$$
$$V = 1.8 * speed * grade$$
$$C = VO_2 * 5.01$$

ここで，VO_2[ml/Kg*min] は摂取酸素量を表し，これは安静時の摂取酸素量を表す R, 水平方向成分を表す H，垂直方向成分を表す V の和で求められる．また，H および V 中の $speed$[m/min] は，アルゴリズムの手順 3 で求めた歩行速度を表し，$grade$ は勾配を表す．ここでは，勾配は与えられているものとする．これにより，計算された VO_2 により，消費カロリー C[kcal] を求めることが出来る．

手順 5：心拍数および身体的負担度の推定　各歩行ルートに対し，それぞれの歩行時の心拍数，更に身体的負担度を推定する．ここでは，共有データベースに登録されている同一歩行ルートの加速度データを，基礎データベース内にある，該当カテゴリにおける加速度データから心拍数の推定関数に適用し，身体的負担度およびその時間変化について推定を行う．

手順 6：推薦歩行ルートの決定　候補ルート群に属する各歩行ルートの中から，下記の 2 つの条件を満たすものを推薦歩行ルートとする．

(1)　手順 4 により求めた消費カロリーが，ユーザの希望する消費カロリーを超えている
(2)　手順 5 により推定した身体的負担度について，表 2 の 4 および 5 の状態となる時間が最短である

これにより，ユーザにとって最も身体的負担度が低い，無理のない歩行ルートを推薦する．

6. 提案手法の評価

提案手法の評価では，身体的負担度の推定精度に関する評価，そして推薦された歩行ルートに対する評価を行う．

前者では，ある歩行ルートについて，心拍計および加速度センサを装着した状態でウォーキングを行う．そして，取得した加速度データから身体的負担度を推定し，その推定精度について，測定された心拍数を基にして定量的な評価を行う．これは，加速度データおよび心拍数の関連付けの精度を評価することになる．

後者では，提案システムと同様に，運動時間，消費カロリーをある値に設定し，歩行ルートの推薦を行う．そして，実際にユーザが歩行した際の主観的な身体的負担度について，アンケート評価を行う． これは，提案システムにおける歩行ルート推薦についての有用性を評価することになる．ただし，歩行速度によって身体的負担度が変化してしまうため，ユーザが一定の速度で歩行する，もしくは提案システムと同様に歩行速度のアドバイスを行う必要がある．

7. ま と め

本稿では，加速度センサによる歩行時の身体的負担度推定手法と，その手法に基づいた，個人の身体能力に応じた歩行ルートを推薦する提案システムについて述べた．

加速度センサのみを使用し，心拍数ならびに身体的負担度の推定を行うことで，心拍計の装着に伴う手間が省け，身体的負担度に表れる個人差の解消が期待できる．またユーザがウォーキング中に取得した歩行データおよび身体的負担度を共有することで，様々なカテゴリのユーザから効率良くデータを収集でき，運動前に身体的負担度の予測が可能となる．

また，本研究の提案システムでは，個人の身体能力を考慮し，身体的負担度が最小である歩行ルートを推薦することで，無理のないウォーキングが期待できる．加えて，本システムは，個人差が出にくく手軽であるという観点から，ウォーキングを想定した．しかしこれは，登山，ジョギングなどの運動，更には運動だけでなく，観光先での歩行ルート推薦にも利用可能であると考えられる．将来的には，提案システムをスマートフォン向けアプリケーションとして開発し，健康支援ツールとして提供したい．

参 考 文 献

1) Stand, A.P.: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults, *Med. Sci. Sports Exerc*, Vol.30, No.6, pp.975–991 (1998).
2) Kurihara, Y., Watanabe, K. and Yoneyama, M.: Estimation of Walking Exercise Intensity Using 3-D Acceleration Sensor, *Applications and Reviews, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, Vol.99, pp.1–6 (2011).
3) Tapia, E.M., Intille, S.S., Haskell, H.W., Larson, K., Wright, J., King, A. and

Friedman, R.: Real-Time Recognition of Physical Activities and Their Intensities Using Wireless Accelerometers and a Heart Rate Monitor, *Proc. of 11th International Symposium on Wearable Computers (ISWC2007)*, pp.37–40 (2007).
4) SUUNTO: スポーツコンピューター TRAINING t6d,（オンライン），入手先⟨http://www.suunto-japan.jp/products/contents/sportscomputer/training/t6d/SS015843000⟩（参照 2011-08-22）.
5) POLAR: ハートレイトモニター RS100,（オンライン），入手先⟨http://www.bigblue.gr.jp/polar/polar_rs/polar_rs100.html⟩（参照 2011-08-22）.
6) Borg, G.: Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion, *Scandinavian Journal of Work Environment Health*, Vol. 16 (SUPPL 1), pp.55–58 (1990).
7) Borg, G.: Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion, *Med. Sci. Sports Exerc*, Vol.5, No.2, pp.90–93 (1973).
8) SONY: ポータブルナビゲーション NAV-U,（オンライン），入手先⟨http://www.sony.jp/nav-u/contents/⟩（参照 2010-06-12）.
9) NAVITIME: 自転車ルート検索,（オンライン），入手先⟨http://www.navitime.co.jp/bicycle/⟩（参照 2011-06-12）.
10) 小野寺孝一，宮下充正：全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性：Rating of perceived exertion の観点から，体育學研究， Vol.21, No.4, pp.191–203 (1976).
11) of SportsMedicine, A.C.: *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription (7th edition)*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia (2005).