

コンシューマ・システム論文

慣性情報と生体情報に基づく車いす利用者の乗り心地推定

伊勢崎 隆司^{1,a)} 宮田 章裕^{1,†1} 新島 有信¹ 渡部 智樹¹ 水野 理²

受付日 2016年2月28日, 採録日 2016年7月7日

概要: 近年, 段差の有無などの物理的な路面状態をバリア情報としてクラウドソーシングで収集する取り組みがさかんに行われている. しかしながら車いす利用者が対面する移動時の障壁は, 通行可否や激しい段差といった物理的障壁だけでなく心理的障壁も含めて考慮されることが望ましい. たとえば, “車通りの多い道” は物理的には移動可能であるが, 恐怖感を感じる場合はユーザへの障壁が高い場所と考えられる. 我々は車いす利用者が移動時に感じる心理的障壁に関するバリア情報として “乗り心地” の指標に着目した. しかしながら, “乗り心地” を取得するためにはユーザからの回答が必要であり, 実世界での利用は困難である. 本研究ではユーザに対して心理的に影響を与える状況は, ユーザの操作特性や心拍に影響を及ぼすという仮説に基づき, 慣性情報と生体情報を用いて “乗り心地” を推定するアプローチを採る. 本論文では, 乗り心地を変えた走行環境を模擬した実験を行い, 提案手法とベースライン 1 (慣性情報のみ) とベースライン 2 (生体情報のみ) の比較による有効性評価を行った. その結果, 提案手法はベースラインと比較して多くの路面状態に対して乗り心地の推定が可能であることが示された.

キーワード: 車いす, HRV, 乗り心地, 機械学習

Wheelchair Users' Psychological Barrier Estimation Based on Inertial and Vital Data

TAKASHI ISEZAKI^{1,a)} AKIHIRO MIYATA^{1,†1} ARINOBU NIJIMA¹ TOMOKI WATANABE¹ OSAMU MIZUNO²

Received: February 28, 2016, Accepted: July 7, 2016

Abstract: Wheelchair users face many “barriers” that interrupt their movement outside. In order to support wheelchair users' comfortable movement, many studies use crowd-sourcing to understand the “barriers”. However, barriers can be classified into physical barriers and psychological barriers, and many studies focused on only physical barriers. Psychological barriers disrupt the wheelchair users by increasing the level of stress. For example, too much traffic or inadequate visibility make the users anxious or stressed. It is important to understand psychological barriers to support wheelchair users' safe/comfort movement. We focus on the psychological barriers and propose a method for estimating the impact of such barriers. As the metric, we use “ride comfort”. This paper gathers and processes inertial and vital data to propose a ride comfort estimation method.

Keywords: wheel chair, HRV, ride comfort, machine learning

1. はじめに

近年, 着座位状態での移動が可能な WHILL 社の WHILL や HONDA 社の UNI-CAB といった複数車輪で構成されるパーソナルモビリティのプロダクト化が進んでいる. このようなパーソナルモビリティは, ショッピングセンタや観光地において長時間の歩行が負担であるユーザに対してレンタルとして提供するサービスが提案されている. 車い

¹ 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所
NTT Service Evolution Laboratories, NTT Corporation,
Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

² 日本電信電話株式会社 NTT 知的財産センタ
NTT Intellectual Property Center, NTT Corporation,
Musashino, Tokyo 180-8585, Japan

^{†1} 現在, 日本大学
Presently with Nihon University

^{a)} isezaki.takashi@lab.ntt.co.jp

すなければ少しの移動も困難であるようなユーザだけでなく、多少の移動では問題ないが長時間の歩行では負担となるユーザも対象に含まれるため、対象ユーザ数が拡大している。このような背景をふまえると、車いすのようなモビリティを利用するシーンは今後増えてくると想定される。車いすなどのモビリティ利用は、健常者にとっては問題のない段差や坂も、移動時の障壁となりうる。このような移動時の障壁をバリア情報としてユーザに提示することで、ユーザの移動を支援することが可能である。たとえば、国土交通省の歩行空間ネットワークを用いると、歩道の段差有無、坂の傾斜などの情報を知ることができる [1]。このバリア情報は駅や公園といった施設の施設責任者が主に収集している。しかしながら、すべての施設でバリア情報の収集が行われているわけではないため、多くの場所で情報収集が不十分、あるいは最新の情報でないという問題がある。多くのユーザの移動を支援するためには屋外のような場所のバリア情報が収集されることが望ましい。

このような背景を受け、段差や坂などの物理的な路面状態をバリア情報としてクラウドソーシングにより収集する取り組みがさかに行われている。たとえば、特定非営利活動法人 PADM のみんなで作るバリアフリーマッププロジェクトは、Google インパクトチャレンジのグランプリをとるなど社会的に注目が大きい [2]。しかしながら、内閣府の障がい者基本計画で定義されているように、“バリア”は移動可否や段差といった物理的な障壁だけでなく、圧迫感や恐怖感といった心理的な障壁も含まれる [3]。たとえば、“車通りの多い道”や“走行幅の狭い道”では車いす利用者に恐怖感や緊張感を与える。“歩道と車道の間の段差”や“砂利道の振動”では車いす利用者に嫌悪感や恐怖感を与える。このような場所はユーザへの心理的障壁が高い場所と考えられ、バリア情報として扱うべきである。現在取り組まれている技術では物理的な路面状況が収集対象であるため、ユーザの心理的障壁は考慮されないことが懸念される。

心理的障壁に関わる指標として、“乗り心地”が一般的に用いられる [4], [5]。なかでも澤田らは医療・福祉機関との共同研究により、車いす利用者の乗り心地は“安心性”、“安全性”、“快適性”、“安定性”によって表せることを明らかにしている [4]。本研究は澤田らの知見に則り、車いす利用者が移動時において“安心性”、“安全性”、“快適性”、“安定性”を感じる度合いを“乗り心地”と定義する。

以上より我々は、物理的障壁を対象として収集している現状に鑑み、車いす利用者が移動時に感じる「安心」や「快適」などの心理的状態の度合いを心理的障壁として収集することを目標とする。本論文では、12 人の被験者と 4 種類の走行環境を用い、我々が提案する慣性情報と生体情報に基づく“乗り心地”推定手法の評価について述べる。本研究の取り組みにより、物理的な障壁だけでなく心理的な障

壁を考慮することが可能となり、通行可否だけでなくユーザにとって乗り心地の良い移動を実現するための情報収集が可能になると考える。

2. 従来研究

ユーザへの物理的影響や心理的影響を評価する指標として“乗り心地”に着目する研究が多数報告されている。劉らは、自動車走行における乗り心地の要因分析を行っている [5]。乗り心地は、空間の広さや騒音などの車内環境要因、振動強度や周波数成分などの振動刺激要因、体調や覚醒度などの生理的要因、気分や安定感などの心理的要因によって評価可能であるとし、これらの寄与率を検討した結果、振動刺激要因、生理的要因、心理的要因の 3 つが、乗り心地に大きく影響を与えていることを明らかにした。澤田らは医療・福祉機関との共同研究により、車いす走行時における乗り心地評価に関する検討を行っている [4], [6]。“安定性”、“安心性”、“快適性”、“安全性”が車いす乗車者の乗り心地の良さに係る要素であることを明らかにしている。

乗り心地に影響を及ぼすと考えられる路面状態の評価に関する研究も多数報告されている。車いすに装着した加速度センサやユーザアンケートに基づいて路面状態を評価する試みが古くから行われている [7], [8], [9]。この手法を応用し、加速度・角速度センサを装着した車いすで市街地を移動することで、移動障壁がある場所を発見しようとする試みがある [2], [10], [11], [12]。岩澤らは SVM を用いて加速度データから段差・傾斜の有無を推定している [10]。隅田らは加速度変化から車いすの角度を計算し、これに基づいて段差・傾斜の有無と大きさを推定している [11]。Kuwabara らは加速度データを k 近傍法で分析して平坦・傾斜などの路面状態を 85% の精度で推定している [12]。文献 [2] はアルゴリズムの詳細を明らかにしていないが、加速度変化から路面の凹凸を検出するアプリケーションの開発を目指すとしている。

乗り心地に影響を及ぼすと考えられるユーザの心理的負荷を推定する手法に関する研究も報告されている。これまでに生体情報を用いてユーザの心理的負荷を推定する試みがあり、生体情報を用いた心理的負荷の推定が一定精度で可能である。横山らは自動車運転時の疲労感を心拍の RRI から抽出する特徴量を用いて推定している [13]。今井らは自動車運転時の眠気の高さを心拍変動・呼吸変動・瞬開閉度・シートからの荷重変動の 4 つの異なるセンサを用いる手法を提案し、82.4% の精度で推定している [14]。一方で、上記技術を車いす利用者に適用した例は少ない。車いす利用者は移動形態の特性に起因して、視界が低くなること、周囲の物体（通行人や壁）との物理的距離が近いこと、段差や凸凹道による影響が大きいなど、自動車の運転手と比べて状況が大きく異なる。したがって、上記技術の適用

可能性は不明瞭である。また、慣性情報と組み合わせて心理的負荷を推定する試みも少ない。

3. 慣性・生体情報に基づく乗り心地推定手法

本研究は、車いす利用者が移動時に感じる心理的状態の度合いを心理的障壁と定義し、心理的障壁の収集を目指す。心理的障壁の指標として澤田らの“乗り心地”があるが、安定性、安心性、快適性、安全性に関するユーザへのアンケートを通じて取得するものである。アンケートによる取得は、ユーザの主観的な評価を得るためには適しているが、実世界でユーザ負担少なく“乗り心地”を収集するのは困難である。本研究では、乗り心地をセンサデータから自動的に推定する手法を提案する。心理的に負荷の高い領域では車いす利用者は操作を慎重に行ったり、緊張や恐怖感を抱いたりすると考えられる。操作が慎重になるといった操作特性の変化は、車いすの加速度や角速度の情報に表出されると考えられる。また、緊張や恐怖感といった心理的な変化は、車いす利用者の心拍といった生体情報に表出されると考えられる。したがって本研究では、慣性情報と生体情報に基づく乗り心地推定手法を提案する。提案手法のコンセプトを図 1 に示す。

乗り心地推定手法は学習フェーズと推定フェーズで構成される。学習フェーズにおいては、乗り心地の度合い s と一定サンプリングレートで計測される時系列の 3 軸加速度 acc 、角速度 $gyro$ 、RRI データ rri が含まれるセンサデータベクトル $d = (s, acc, gyro, rri)$ を用いる。 $acc = (ax, ay, az)$ であり、時系列の x 軸、y 軸、z 軸の加速度データをそれぞれ ax 、 ay 、 az とする。 $gyro = (gx, gy, gz)$ であり、時系列の x 軸、y 軸、z 軸の角速度データをそれぞれ gx 、 gy 、 gz とする。心電情報は心臓の拍動にともなってパルスの形で波形に表出され、1 拍の内に P 波、Q 波、R 波、S 波、T 波が存在する。心電情報に対してピーク検出を行って R 波のタイミングを算出し、この R 波の時間間隔を時系列的に算出した RRI を得る。 acc に対しては走行にともなう加速度成分を取得するために、初期静止状態の加速度を重力加速度として保持し、走行中は重力加速度成分を減算する。

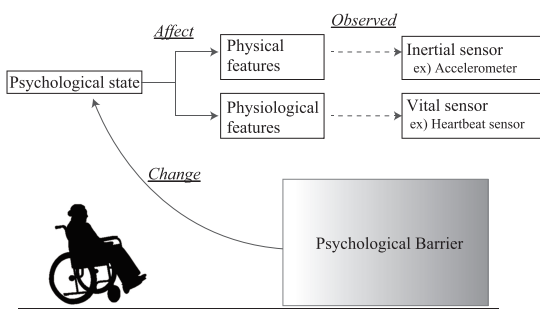


図 1 提案手法のコンセプト

Fig. 1 Concept of the proposed method.

慣性情報である x 軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度それぞれに対して、表 1 に記載する特徴量を慣性特徴量として抽出する。統計的な特徴量である（最低値、最高値、振幅、メディアン、平均、標準偏差、分散）に加え、澤田らの知見に基づき平坦面移動時の主周波数強度である 0 から 15 Hz の周波数成分に対して、1 Hz 間隔の周波数強度を得る [15]。

生体情報の特徴量に関しては、 rri から Bauer らの研究報告に基づいて表 2 に記載する HRV 特徴量を取得する [16]。RRI に対して周波数解析したデータのうち、低周波数成分 (LF, 0.04-0.15 Hz) には交感神経の活動が反映され、高周波数成分 (HF, 0.15-0.4 Hz) には交感神経の活動が反映されている。

mRR , $SDNN$, $RMSSD$, $SDSD$, $pNN50$, LF Norm, HF Norm, $LFHF$ Ratio については下式より求める。

$$mRR = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N RRI_i \quad (1)$$

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (RRI_i - mRR)^2} \quad (2)$$

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} (RRI_{i+1} - RRI_i)^2} \quad (3)$$

$$mA = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} (RRI_{i+1} - RRI_i) \quad (4)$$

表 1 慣性特徴量

Table 1 Inertial features.

特徴量	説明
min	最低値
max	最大値
ptp	振幅
median	メディアン
ave	平均値
std	標準偏差
amp0-1	0-1 [Hz] の周波数強度
amp1-2	1-2 [Hz] の周波数強度
amp2-3	2-3 [Hz] の周波数強度
amp3-4	3-4 [Hz] の周波数強度
amp4-5	4-5 [Hz] の周波数強度
amp5-6	5-6 [Hz] の周波数強度
amp6-7	6-7 [Hz] の周波数強度
amp7-8	7-8 [Hz] の周波数強度
amp8-9	8-9 [Hz] の周波数強度
amp9-10	9-10 [Hz] の周波数強度
amp10-11	10-11 [Hz] の周波数強度
amp11-12	11-12 [Hz] の周波数強度
amp12-13	12-13 [Hz] の周波数強度
amp13-14	13-14 [Hz] の周波数強度
amp14-15	14-15 [Hz] の周波数強度

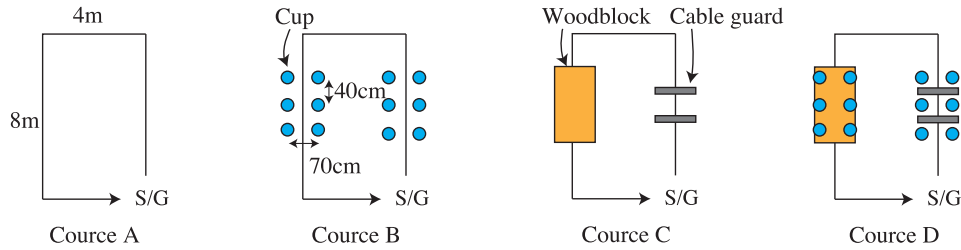


図 2 実験環境

Fig. 2 Experimental environment.

表 2 HRV 特徴量
Table 2 HRV features.

特徴量	説明
mRR	RRI の平均値
SDNN	RRI の標準偏差
RMSSD	隣接 RRI の差の二乗平均平方根
SDSD	隣接 RRI の差の標準偏差
pNN50	隣接 RRI の差が 50 ms 以上となる割合
TotalPower	0.4 Hz 以下の周波数強度
LF	0.04-0.15 Hz の周波数強度
LF Norm	0.4 Hz 以下の周波数強度における LF の割合
HF	0.15-0.4 Hz の周波数強度
HF Norm	0.4 Hz 以下の周波数強度における HF の割合
LFHF Ratio	LF と HF の比
VLF	0.04 以下の周波数強度

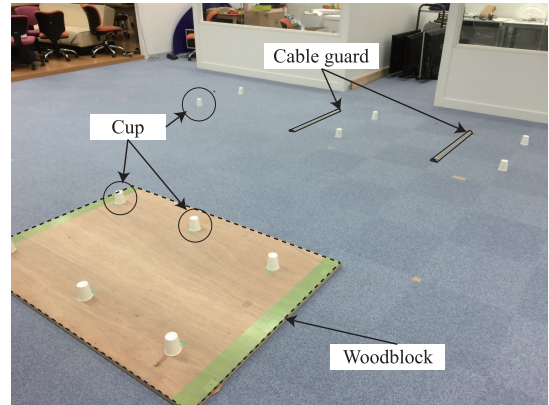


図 3 実験風景

Fig. 3 Experimental landscape.

$$SDSD = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} \{(RRI_{i+1} - RRI_i) - m_A\}^2 \quad (5)$$

$$pNN50 = \frac{\text{num}(RRI > 50)}{\text{num}(RRI)} \quad (6)$$

$$LFNorm = \frac{LF}{TotalPower} \quad (7)$$

$$HFNorm = \frac{HF}{TotalPower} \quad (8)$$

$$LFHFRatio = \frac{LF}{HF} \quad (9)$$

各データ d から上記 144 次元の特徴量 f を抽出し、各特徴量に対して平均 0、分散 1 の正規化処理を行う。乗り心地スコア s を目的変数、 f を説明変数とする機械学習を通じて推定モデル M を生成する。

推定フェーズでは、(acc , $gyro$, rri) から上記 144 次元の特徴量 f を抽出し、下式のように乗り心地の度合い s を推定する。

$$s = M(f) \quad (10)$$

4. 検証実験

4.1 実験の目的・手法

本実験の目的は 3 章で提案した慣性情報と生体情報に基づく乗り心地スコア推定精度を検証することである。提案手法と 2 つのベースライン (ベースライン 1: 慣性情報

のみを説明変数としたもの、ベースライン 2: 生体情報のみを説明変数としたもの) の乗り心地スコア推定精度を比較した。本実験では、パーソナルモビリティの利用スタイルに合わせ、常時車いすを利用しない男性 12 名 (平均年齢: 28.3) に対して実験を行った。

被験者が感じる乗り心地スコアに変化が生じるように図 2 に示す 4 つのコースを設定した。この 4 つのコース設定にあたり、ユーザに対して心理的影響を与える走行環境を研究者間で議論した。その結果、慎重に操作すれば通れるが走行幅が極端に狭い道と、不快感や嫌悪感を与える段差などの路面状態が選出された。これは実世界では、空間が狭く慎重な操作を要するエレベータや砂利道などが例としてあげられ、物理的障壁としては検知されないものである。被験者の安全性を担保しながら走行幅を狭くする手法として、紙コップを用いた走行幅制限を行った。コース B・D では被験者は紙コップを踏まないように走行した。不快感を与える段差として、木の板 (高さ 4 cm) とケーブルガード (高さ 3 cm) を設定した (コース C・D)。コース B は環境による慣性情報の変動が小さく生体情報の変動が大きいコース、コース C は環境による慣性情報の変動が大きく生体情報の変動が小さいコース、コース D は環境による慣性情報と生体情報の変動が大きいコースとして考えられ、コースごとの比較を通じて提案手法の有効性検証が可能である。コース D の実験風景を図 3 に示す。コース B・C・D が被験者に与える心理的影響を観察するために

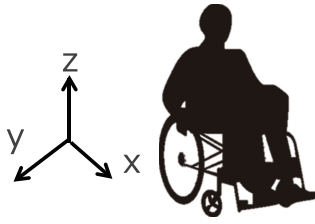


図 4 慣性情報の軸設定

Fig. 4 Axis configuration of inertial data.

平坦な走行環境（コース A）を設定し，計 4 コースの走行環境で実験を行った．

本実験では移動時の身体の動きにともなう心拍変動が発生しないように電動車いすを用いることとし，WHILL (WHILL Corp.; 最高速度：6 km/h; 段差乗り越え高さ：7.5 cm; 長さ：89 cm; 幅：60 cm) を用いた．加速度と角速度のセンサデータ計測においては Xperia A (Sony; Android OS：4.2) に組み込みのセンサを用い，加速度・角速度を 30 [Hz] で計測した．スマートフォンを電動車いす後部に図 4 の軸設定となるように配置した．RRI データ計測においては，myBeat (UNION TOOL Corp.) を用いた．myBeat では 128 Hz で心電波形を計測し，被験者ごとに経験的にしきい値を定め，ピーク検出を行い RRI データを取得した．

本研究では澤田らの知見に基づき [4] “安心性”，“安全性”，“快適性”，“安定性”に関する回答を指標とする．また，本研究の推定対象に必要な心理的障壁の情報を収集するために，ユーザの主観評価が最重要であると考えするため，本研究ではそれぞれの定義を下記とする．

安心性 車いす利用者が心理的負荷を感じることなく走行できることを主観的に感じる度合い

安全性 車いす利用者が身体的危険を意識することなく走行できる主観的に感じる度合い

快適性 車いす利用者が気持ち悪さを感じることなく走行できる主観的に感じる度合い

安定性 車いす利用者が操作の困難さを意識することなく走行できることを主観的に感じる度合い

抽象的な質問では被験者間の解釈の違いが回答結果に影響を与える可能性がある．本研究では，上記 4 分類それぞれに関して個人差が生じないように具体的な質問項目を用いて回答を得る方式を採った．質問項目の生成については，研究者で上記 4 分類に基いて議論を行い，質問項目を抽出し，過不足のないように選別を行った．たとえば，“安心性”の質問を具体化して Q1 の「緊張せずに走行できましたか？」と Q2 の「恐怖を感じずに走行できましたか？」という質問項目を導出した．同様に“安全性”から Q3 と Q4，“快適性”から Q5 と Q6，“安定性”から Q7 と Q8 を導出した．本実験で用いた質問項目を表 3 に示す．

各被験者は各コースに対して 3 回ずつ走行し，走行終

表 3 乗り心地スコア算出用質問表

Table 3 Questionnaires.

Number	Questionnaire
Q1	緊張せずに走行できましたか？
Q2	恐怖を感じずに走行できましたか？
Q3	危険を感じずに走行できましたか？
Q4	慎重に操作をしなくても走行できましたか？
Q5	本コースは気持ちよく走れましたか？
Q6	不快な揺れを感じずに走行できましたか？
Q7	コースを簡単・滑らかに走行できましたか？
Q8	コースを遵守できましたか？

了ごとに表 3 に示す質問票の各項目に対してリッカート尺度で 0 から 6（6：非常にそう思う，0：まったくそう思わない）を回答する．各走行時の乗り心地スコア s は，“安心性”，“安全性”，“快適性”，“安定性”のスコア (s_{ease} , s_{safety} , $s_{comfort}$, $s_{stability}$) の平均とし，下式により求めた．なお，Q1–Q8 は各質問項目の回答値とする．

$$s_{ease} = \frac{Q1 + Q2}{2} \quad (11)$$

$$s_{safety} = \frac{Q3 + Q4}{2} \quad (12)$$

$$s_{comfort} = \frac{Q5 + Q6}{2} \quad (13)$$

$$s_{stability} = \frac{Q7 + Q8}{2} \quad (14)$$

$$s = \frac{s_{ease} + s_{safety} + s_{comfort} + s_{stability}}{4} \quad (15)$$

各被験者から 12 個のデータ d を取得する．スタートとゴール時は車いす停止時のデータが含まれ，模擬状況とは異なるため各データを等間隔に 3 分割し，初めと最後のデータを除外した．合計 144 個のデータ $d_0, \dots, d_{143}$ を得た．各データ d から 3 章に示した特徴量 f を算出した．慣性情報のみの特徴量を $f_{inertial}$ ，生体情報のみの特徴量を f_{vital} とし，それぞれベースライン 1，ベースライン 2 に用いた．学習フェーズでは Q1 から Q8 の設問それぞれを目的変数とし，特徴量 f を説明変数とした推定モデルを生成する．推定した Q1–Q8 の値を用いて式 (11)–式 (15) で示すとおりに推定スコアを算出し，推定フェーズでテストデータのスコアと推定スコアの相関を 10-fold 交差検定で比較した．本実験では乗り心地スコア推定に寄与する特徴量の分析を行うことを考慮して，Random Forest による回帰学習を行った．実装は Python の Scikit-learn における RandomForestRegressor を利用した．

4.2 結果・考察

各コースにおける被験者の平均乗り心地スコアを図 5 に示す．コースの種類は図 2 に示すとおりであり，末尾の数値は試行回数の番号である．たとえば，“Course C:3”はコース C の 3 試行目となる．各コース 3 試行分の平均スコアは，コース A：4.55，コース B：3.15，コース C：2.92，

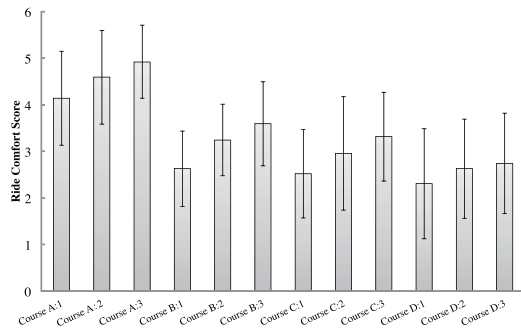


図 5 コースごとの被験者の平均乗り心地スコア

Fig. 5 Ride comfort scores of each course.

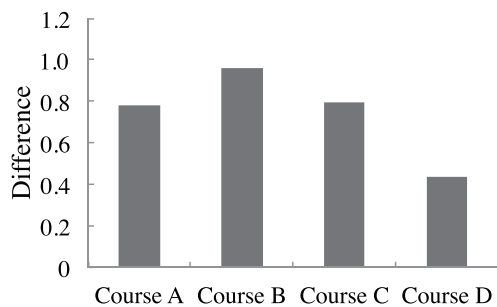


図 6 コースごとの 3 試行目と 1 試行目のスコアの差

Fig. 6 Differences between 1st and 3rd trial of each course.

コース D: 2.56 であった。各コースの試行ごとのスコアを比較すると、試行回数が増える程スコアが上昇する結果となった。各コースの 1 試行目と 3 試行目のスコアの差分は、コース A が 0.78、コース B が 0.96、コース C が 0.80、コース D が 0.43 であった。その結果を図 6 に示す。試行回数が増すほどスコアが上昇するのは「慣れ」による影響が考えられる。すなわち、本研究で取り組む“乗り心地”は、走行回数によって変動するものであることが示された。一方で、同一の状況でない場合は同じ位置においても“乗り心地”が増減することも想定されるため、走行回数は乗り心地スコアに影響する因子ではあるが、回数に従って単純に減衰していくものとは考えにくい。コース D が他のコースと比べて差分が小さくなった。この理由としては、コースの複雑さに関わっていると考えられる。コース D は他のコースに比べて走行幅制限と段差を設けているため複雑であり、「慣れ」が生じるまでに時間が必要であったと考えられる。

走行幅を制限したコース B と、不快な揺れを設定したコース C は平坦なコース A に対してスコアが低下し、走行幅を制限して不快な揺れを設定したコース D はコース B, C に対してスコアが低下した。この結果より、本実験で設定した走行環境が被験者に対して心理的变化を与えていることが分かる。

4.2.1 乗り心地スコア推定

本論文では提案手法の有効性を評価するために、テストデータのスコアと各手法の予測スコアの相関係数（ピアソ

表 4 乗り心地推定結果の相関係数

Table 4 Correlation coefficients.

提案手法	ベースライン 1	ベースライン 2
0.737	0.698	0.556

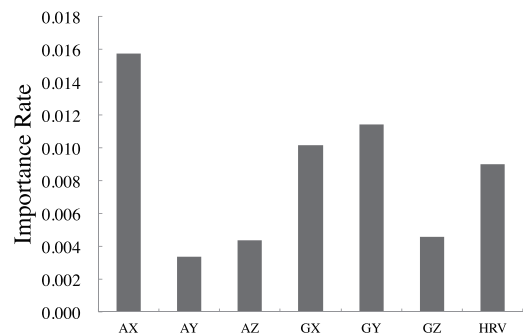


図 7 乗り心地スコア推定における各特徴量の平均重要度

Fig. 7 Average importances of each feature.

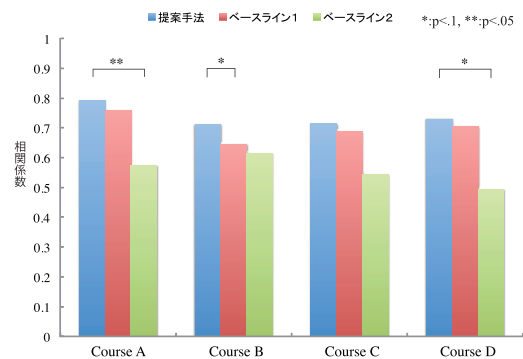


図 8 コースごとの推定精度比較

Fig. 8 Comparison of each course accuracy.

ン)を用いた。表 4 に示すように、提案手法の相関係数が 0.737、ベースライン 1 の相関係数が 0.698、ベースライン 2 の相関係数が 0.556 であった。10-fold 交差検定に当たりテストデータは 14 サンプルで 1 セットであるため、サンプル数に基づき相関係数の有位性を確認し、5%水準で有位であるという結果を得た。相関係数は順序尺度であること、そして対応のあるデータ群を用いていることから符号検定による検定を実施した。提案手法の相関係数をベースライン 1, 2 のそれぞれの相関係数に対して Bonferroni 手法に基づく多重比較を行った結果、提案手法とベースライン 2 の比較では $p = 3.21 \times 10^{-3} < .01/2$ で有意差があった。一方で、提案手法とベースライン 1 の比較では $p = 1.34 \times 10^{-1} > 0.5/2$ となり有意差は見られなかった。

すべてのコースに対する推定精度比較に加え、コースごとの推定精度の比較を行った。その結果を図 8 に示す。提案手法とベースライン 2 (生体情報のみ) についてはコース A において 5%水準 ($p = 0.0107 < 0.05$)、コース D において 10%水準 ($p = 0.0562 < 0.1$) で有意傾向が見られた。また、提案手法とベースライン 1 (慣性情報のみ) についてはコース B において 10%水準 ($p = 0.0562 < 0.1$) で有

意傾向が見られた。コース B は車幅は狭いが走行コース自体に変化はないため、慣性情報特徴量の特徴量傾向は小さいと想定される。したがって、ベースライン 1 のような従来手法を用いても推定精度が高くないと想定される。一方で、車いす利用者への心理的負荷を通じ、生体情報の特徴量傾向は表出されると想定される。よって、ベースライン 1 に対する有意差の検証を通じて、従来手法よりも本提案手法が適用可能な路面状態が多いことを確認できる。この結果からは、提案手法が生体情報のみのベースライン 2 に対しては有効であるとともに、検定において明確な差が示されなかったことから従来研究で主に採られるアプローチである慣性情報のみのベースライン 1 と同等以上の精度で推定可能であるといえる。さらに提案手法は、凸凹の路面状態における振動を通じて不快にさせるようなコース C、コース D を従来研究同様以上にとらえることができるだけでなく、従来研究ではとらえることが困難であった、物理的に直接の影響は及ぼさないが心理的に不快にさせる路面状態（コース B）もとらえることが可能であることが示唆される。今後は被験者数の追加やコースの拡張を通じて提案手法の有効性をさらに検証していく。

本実験では乗り心地スコア推定に寄与する特徴量を分析するために、全特徴量の重要度を算出し、x 軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度、HRV それぞれに属する特徴量の平均値を算出して比較した。たとえば、X 軸加速度であれば、表 1 に示す X 軸加速度特徴量の平均値を算出した。乗り心地スコア推定における重要特徴量の分析結果を図 7 に示す。“AX”，“AY”，“AZ” はそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸加速度の特徴量の重要度を表す。“GX”，“GY”，“GZ” はそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸角速度の特徴量の重要度を表す。“HRV” は HRV 特徴量の重要度を表す。x 軸加速度、y 軸角速度、x 軸角速度、HRV 特徴量の順に重要度が分布していることが分かる。詳細な特徴量としては [y 軸角速度の max]，[x 軸角速度の ptp]，[x 軸角速度の min]，[SDNN]，[x 軸加速度の var] が重要度の上位 5 つに含まれた。これら特徴量は各コース、すなわち乗り心地において、慣性情報と生体情報の特徴量に固有の傾向があり、これら特徴量では顕著に異なるという結果となった。コース A における提案手法の乗り心地推定精度がベースライン 2 との比較において 5%水準で有意差が見られたことや、コース C に比べてコース D のベースライン 2 の推定精度が低い理由としては、生体情報に基づく特徴量に分散が大きいためであることが考えられる。

コース C、D における提案手法の乗り心地推定精度がベースライン 1 との比較において有意差が見られなかった要因の 1 つとして今回の実験で用いたコースの環境が考えられる。図 2 に示すように、本実験では不快な揺れを模擬するための段差を 4 コース中 2 コースに設けた。段差を通過する際、x 軸・y 軸角速度成分に対して大きい変動を及

ぼす。乗り心地スコア推定における重要特徴量の分析結果（図 7）において、x 軸角速度と y 軸角速度特徴量の重要度が高いことを考慮すると、段差による不快な揺れが乗り心地スコアに影響を与え、その段差の推定に x 軸・y 軸角速度特徴量が大きく寄与していたからだと考えられる。

走行幅を制限したコース B・D においては、走行幅が制限されている領域（紙コップが置いてある領域）に入る際は速度を減衰させて調整し、走行幅が制限されている領域を終えた際に加速している被験者が多く観察された。このような走行幅に応じた人の車いす操作特性が、車いすの前後方向の加速度変動に対して影響を及ぼし、X 軸加速度特徴量の重要度が高かった要因の 1 つであることが示唆される。

HRV 特徴量の重要度は x 軸加速度、y・x 軸角速度特徴量に次いで高く、本研究の提案手法の妥当性を示す結果となった。HRV 特徴量に関しては、SDNN、mRR、RMSSD などの特徴量が重要度上位に含まれている。本実験の走行環境がこれらの特徴量に対して影響を及ぼした理由については、より詳細な走行環境に基づく計測と分析が必要である。

以上より、ベースラインと比較して提案手法の有効性を示した。また、慣性情報と生体情報それぞれの特徴量が高い重要度を表していることから、提案手法が妥当であることも示唆された。

4.2.2 設問ごとの重要特徴量分析

各設問と相関のある特徴量を分析するため、設問ごとの重要特徴量分析を行った。その結果を図 9 に示す。Q8：「コースを遵守できましたか」に関しては、z 軸角速度特徴量の重要度が大きい。これはコースを遵守するためには車いすの向きや位置の調整操作が必要であり、向きや位置の調整操作が Z 軸回転の角速度情報として表していると考えられる。

Q1：「緊張しましたか?」、Q4：「慎重な操作が必要でしたか?」、Q7：「コースを簡単・滑らかに走行できましたか?」、Q8 に関しては HRV 特徴量が大きく寄与していた。Q1 に関しては緊張と HRV 特徴量には相関があるという従来研究の報告を裏付ける結果であった [16]。一方で、操作内容に関する質問項目 Q4、Q7、Q8 に対して HRV 特徴量の重要度が高くなった要因としては、「慎重な操作」や「滑らかに走行する」、「コースを遵守する」といった意識が被験者の心理状態に作用し、その結果 HRV 特徴量として表出されたものと考えられる。

Q6：「不快な揺れを感じずに走行できましたか?」に関しては、y 軸加速度・角速度特徴量の重要度が高い。この結果から、人は横方向の加速度、前後方向の傾斜を体感すると不快な揺れと感知することが示唆される。振動周波数や強度、方向を変化させた際のデータをさらに計測することで、人が不快と感じる物理特徴量を記述することができ、路面

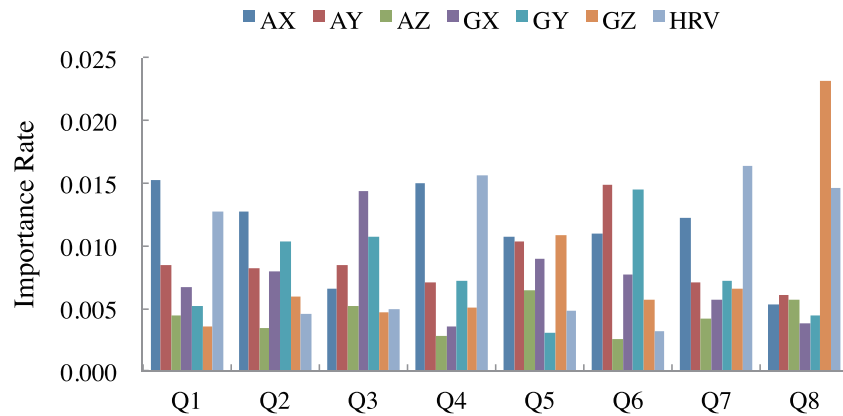


図 9 設問ごとの重要特徴量分析結果

Fig. 9 Comparison of features importance rate of each questionnaire.

状態に対して「不快さ」を評価することが可能になると考えられる。

各項目に相関する特徴量を確認した。この分析を通じて特徴量の重みを考慮することで、「危険を感じずに走行できる」ルート選択や、「不快な揺れを感じずに走行できる」ルート選択などの要求に応じることが可能になる。

5. おわりに

車いす利用者にとって有益となるバリアフリー情報のうちの心理的障壁に着目した。心理的障壁を澤田らの研究成果に則り、「安心性」、「安全性」、「快適性」、「安定性」によって評価される「乗り心地」と定義した [4]。従来では「乗り心地」の取得にはユーザからの回答が必要であり実世界において「乗り心地」を計測することが困難であったという問題をふまえ、センサデータから「乗り心地」を推定することを研究課題として設定した。この課題に対し、心理的負荷の高い領域では、車いす操作などの物理的特徴と、緊張にともなう心拍数の上昇などの生理的特徴が影響を受けて変動するという仮説を立て、慣性情報と生体情報に基づく心理的障壁を推定するアプローチを採った。屋外移動においてユーザに心理的影響を与えると想定される「走行幅の制限」と「不快感を与える段差」の状況を屋内環境に模擬して実験を行った。車いす走行時の慣性情報と生体情報、さらに 8 つの質問項目への回答から得られる乗り心地スコアを取得し、慣性情報と生体情報から乗り心地スコアを Random Forest により推定した。推定精度は相関係数が 0.737 であり、ベースライン 1 (慣性情報のみを用いた乗り心地スコア推定) とベースライン 2 (生体情報のみを用いた乗り心地スコア推定) と比較した結果、ベースライン 2 に対して有意差があった。ベースライン 1 に対して有意差が生じなかった理由として本実験で設定した走行環境に起因するものだと考えられる。コースごとの詳細解析により、コース B において提案手法がベースライン 1 と比較して 10% 水準で推定精度が有意傾向にあるという結果となっ

た。この結果より、提案手法は従来手法に比較し、より多くの路面状態に対して心理的障壁を推定することが可能であることが示唆された。

本提案手法の有効性は検証したが、いくつか課題が残っている。本実験では今後の普及が期待されるパーソナルモビリティの想定ユーザとして、日常的に車いすを利用しないユーザと仮定し日常的に車いすを用いていない被験者に対して実験を行った。本提案技術は日常的に車いすを利用しているユーザに対しても適用可能となる技術である。しかし、日常的に車いすを利用しているユーザが同様の走行環境に対して非利用者と同様の心理的影響を受けるかどうかは未知である。日常的に車いすを利用しているユーザに対して同様の評価実験を行い、推定精度の検証や車いす日常非利用者との相関関係について検討する必要がある。

屋外で心理的障壁であると想定される領域を模擬して実験を行った。しかし、実際の屋外環境を完全に再現するのは困難であり、本実験の結果が屋外環境に適用できるとは限らない。したがって、屋外環境において慣性情報と生体情報に基づく心理的障壁推定手法の評価を行う必要がある。

今後、上記課題の解決に取り組むことで実世界に適用可能となる技術を目指す。東京駅丸の内エリアなど実フィールドにおける検証 [17] も進めており、車いすユーザが快適に移動できる世界の実現に向けて、取り組みをいっそう加速していきたい。

参考文献

- [1] 国土交通省：バリアフリー経路探索，国土交通省（オンライン），入手先 <https://www.hokoukukan.go.jp/routesearch/areaselect.html>（参照 2015-12-15）。
- [2] 特定非営利活動法人 PADM：みんなで作るバリアフリーマップ，特定非営利活動法人 PADM（オンライン），入手先 <http://enigata.com/data/minna.bmap.pdf>（参照 2015-12-15）。
- [3] 内閣府：障がい者基本計画，内閣府（オンライン），入手先 <http://www8.cao.go.jp/shougai/suishin/kihonkeikaku.pdf>（参照 2015-12-15）。
- [4] 澤田知之，小島洋一郎，近藤 崇，古崎 毅：車いす操

- 作と乗車者の乗り心地に関する感性評価への基礎的研究, 苫小牧工業高等専門学校紀要, Vol.39, pp.81-85 (2004).
- [5] 劉 建中, 久保光徳, 青木弘行, 鈴木 邁, 後藤忠俊: 自動車走行における乗り心地評価構造: 階層化ファジイ積分モデルによる定量化, デザイン研究学, Vol.41, No.1, pp.43-50 (1994).
- [6] 松尾優子, 小島洋一郎, 大橋智志, 国崎 翠, 三宅紋子, 澤田知之: 車いす走行における乗り心地と乗車者の重心移動について—平坦路・段差路走行時の重心移動, 日本感性工学論文誌, pp.1-5 (2013).
- [7] 岡村美好: 車いすの乗り心地に着目した歩行者系舗装の性能指標に関する一考察, 土木学会舗装工学論文集, Vol.14, pp.189-194 (2009).
- [8] 石田真二, 亀山修一, 岳本秀人, 姫野賢治, 鹿島 茂: 車椅子の走行負荷に基づいた歩道の路面凹凸評価方法, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.295-305 (2006).
- [9] 松田 誠, 牧 恒雄: 歩道の凹凸評価方法に関する研究, 第1回舗装工学講演会論文集, pp.151-158 (1996).
- [10] 岩澤有祐, 矢入郁子: 多次元時系列データ解析によるアクセシビリティ可視化システムの開発, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.28, pp.1-4 (2014).
- [11] 隅田康明, 松永勝也, 合志和晃, 志堂寺和則: 車いす使用者向け経路探索のための路面の傾斜及び段差測定システムの開発, 信学技報 (WIT), Vol.114, No.357, pp.63-68 (2014).
- [12] Kuwahara, N., Nishiura, M., Shiomi, Y., Morimoto, K., Iwawaki, Y. and Nishida, N.: A Study on a Ubiquitous System for Collecting Barrier-free Information of Evacuation Centers for Wheelchair Users, *Proc. 4th ACM International Workshop on Context-Awareness for Self-Managing Systems, CASEMANS '10*, pp.5:36-5:39, ACM (2010).
- [13] 横山清子, 高橋一誠: 心拍変動時系列による自動車運転時の主観的疲労感推定の基礎的検討 (高度交通システム (ITS)), 電子情報通信学会論文誌 A, 基礎・境界, Vol.96, No.11, pp.756-762 (2013), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009662009/>).
- [14] 今井章博, 小栗宏次: 覚醒低下の段階変化を考慮したドライバの眠気レベル推定 (ITS 情報処理, 一般), 電子情報通信学会技術研究報告 ITS, Vol.110, No.469, pp.47-52 (2011), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008688157/>).
- [15] 澤田知之, 近藤 崇, 小島洋一郎, 岩口純子, 中村充美: 車椅子における構造上の振動特性と操作や乗り心地に関する実験的研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.61, pp.1-4 (2004).
- [16] Malik, M., Bigger, J.T., Camm, A.J., Kleiger, R.E., Malliani, A., Moss, A.J. and Schwartz, P.J.: Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *The European Society of Cardiology*, Vol.17, No.3, pp.354-381 (1996).
- [17] NTT 報道発表: 「ダイバシティ・ナビゲーション」の実現に向けた研究開発を推進, NTT, 入手先 (<http://www.ntt.co.jp/news2015/1501/150115a.html>) (参照 2015-12-15).



伊勢崎 隆司 (正会員)

2013 年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在, NTT サービスエボリューション研究所研究員。知能機能システムの研究に従事。



宮田 章裕 (正会員)

2005 年日本電信電話株式会社入社。2008 年慶應義塾大学大学院博士課程修了。2016 年より日本大学文理学部情報科学科准教授。ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 日本データベース学会各会員。博士 (工学)。



新島 有信 (正会員)

2012 年東京大学大学院工学系研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2014 年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程に入学し, 現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会会員。



渡部 智樹 (正会員)

1992 年横浜国立大学工学部卒業。同年日本電信電話株式会社入社。主に, 家電制御技術, 生体状態計測・推定技術の研究開発に従事。現在 NTT サービスエボリューション研究所主任研究員。博士 (工学)。電子情報通信学会会員。



水野 理

1994 年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学科専攻修了。同年日本電信電話株式会社入社。現在, NTT 知的財産センタ担当部長。日本音響学会, 言語処理学会各会員。