

車輪付き手動移動体の走行負荷に基づく歩道の評価方法

隅田 康明^{1,a)} 松永 勝也^{2,b)} 合志 和晃^{3,c)} 志堂寺 和則^{4,d)}

受付日 2015年9月7日, 採録日 2016年3月4日

概要: 高齢化社会に適した環境整備において, 高齢者や障害者にとっても移動しやすい歩道の整備は必須であり, そのためには歩道のバリアフリー度について定量的に評価できる指標が必要である. 本研究では, 歩道の移動における物理的な困難さを定量的に評価できる指標を提案する. 歩道における移動の困難さを, 基準とする路面の縦断傾斜角度によって表現する指標を考案した. これによって, 縦断勾配・横断勾配・路面の凹凸・材質などの路面上の障害物を個々に測定することなく, 歩道移動時の物理的負担度を定量的に評価することができる. 本論文で考案した指標の測定精度を, 電動車いすをベースとした測定装置によって手動車いす移動時の仕事量を推定することによって検証した. 検証実験の結果, 手動車いすの仕事量の推定値と実測値の誤差は傾斜の大きい横断勾配路面や走行抵抗の大きな路面であっても平均 15.1%以下であり, 推定値と実測値には強い相関関係が認められた ($r > 0.93$, $p < 0.01$). 人の身体的負担度と心理的負担度についての対応については課題を残すが, 本研究の提案する指標は歩道移動における物理的な負担度を定量的に評価できる指標として有用なものであると考えられる.

キーワード: 歩道評価, 車輪付き手動移動体, 手動車いす, 電動車いす, 仕事量推定

Method of Side Walk Evaluation Based on Physical Workload of Movement about Manual Moving Body with Wheel

YASUAKI SUMIDA^{1,a)} KATSUYA MATSUNAGA^{2,b)} KAZUAKI GOSHI^{3,c)} KAZUNORI SHIDOJI^{4,d)}

Received: September 7, 2015, Accepted: March 4, 2016

Abstract: Index of quantitative evaluation of degree of barrier-free on side walk is required in order to make progressively barrier-free. In this paper, we suggested an index of quantitative evaluation that can evaluate the physical workload of movement on side walk about manual moving body with wheel. We devised a method to evaluate the difficulty of movement on side walk by angle of basic road. It is possible to evaluate the difficulty of movement on side walk without measuring angle of vertical and cross slope, surface roughness on side walk, and material of the side walk, etc. We examined which index of quantitative evaluation is useful by verification experiment. We measured the difficulty of movement by electric wheelchair's consumed current, and estimated physical workload of manual wheelchair users based on index of moving difficulty. As a result, it was possible to estimate the physical workload of manual wheelchair movement (relative error = 15.1%, $r > 0.93$, $p < 0.01$). It appears that the proposed index of difficulty of movement is useful to evaluate degree of barrier-free on side walk.

Keywords: side walk evaluation, manual moving body with wheel, manual wheelchair, electric wheelchair, estimating physical workload

¹ 九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

² 九州大学
Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

³ 九州産業大学大学院情報科学研究科
Faculty of Information Science, Kyushu Sangyo University, Fukuoka 813-8503, Japan

⁴ 九州大学大学院システム情報科学研究院
Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

a) y.sumida@kyudai.jp

b) k.matsunaga@kyudai.jp

c) goshi@is.kyusan-u.ac.jp

d) shidoji@inf.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

1.1 背景

近年、わが国では少子高齢化が深刻な問題となっており、高齢者を標準とした都市環境の整備が求められている。QOLの向上のためには、ほかの人の援助がなくても円滑な移動を行えることが重要であり、高齢者や歩行が困難な肢体障害者の移動の質を改善することは現代社会における課題である。こうした問題を背景に、高齢者や障害者の移動の質に関する研究が多く行われている。たとえば、杉山らは移動の質について移動容易性、空間快適性、情報提供性、介助性の4つの評価軸による総合評価を行っており、健常者、高齢者、障害者によって評価軸の重みを調査し、利用者の違いによって差異がある場合の改善案を示している [1]。また、土井らは社会の高齢化にともなって、安全・安心して移動できる交通環境整備への要望が強くなるとしている [2]。今後の高齢化社会に適した環境整備において高齢者や障害者にとっても移動しやすい歩道の整備は必須であり、バリアフリー新法（高齢者、障害者などの移動などの円滑化の促進に関する法律）をはじめとし、高齢者や障害者でも独力で移動できる都市環境の整備が進められている。しかしながら、現在において歩道を含む都市環境のバリアフリー化は十分ではなく、歩道の整備を進めるうえでもバリアフリー化がなされているかについての定量的な評価を行うことが重要である。

1.2 関連研究

歩道上において、車いすなどの歩行補助用途の車輪付き手動移動体によって移動する際に障害となるものとしては、路面の勾配（縦断・横断）、段差、凹凸、移動時の抵抗の大きい材質の路面などが考えられる。このような移動にかかわる路面の障害の定量的な測定、評価を行っている先行研究としては、歩道の凹凸や段差を測定するもの、摩擦係数を測定するものなどがある。牧らや岡村らは手動車いすに取り付けた加速度計によって、Ishidaらは路面の縦断プロファイルによって、金野らは台車に設置した測域センサによって路面凹凸の測定・評価を試みている [3], [4], [5], [6]。また、路面の摩擦係数については歩道上の摩擦係数を測定する機器が市販されており、路面の勾配については、水平器や車いすにスマートフォンや角度センサを設置して測定するものなどがある [7], [8]。

こうした先行研究や測定機器は路面の勾配や段差、凹凸、摩擦といったものを個々に測定し評価するものであり、歩道の評価を行うためには、これらを組み合わせた測定・評価を行う必要がある。しかしながら、車輪付き手動移動体での移動における種々の歩道上の障害物をすべて測定したうえで移動の困難さを定量的に評価することは困難であり、路面の勾配や凹凸などの要素に限定しない総合的な評

価については、歩道利用者の主観評価によるものが主である [1], [9]。また、市販されている機器を除いては専用の測定装置または試作機による測定、評価方法によるものであり、または、車いすの加速度などを用いるものでは使用する車いすによる測定値の差については考察されていない。我々も以前の研究で電動車いすの消費電力によって手動車いす移動時の仕事量を推定する方法を提案したが、これについても測定のために開発した装置を搭載した測定用電動車いすでは測定が可能であるが、共通して利用できる指標とはいえなかった [10]。

1.3 研究目的

本研究では歩道上を移動する際の歩道における移動の物理的な困難さを定量的に評価する指標について提案する。なお、本研究では、車いす・ベビーカー・手押し車などの歩行補助用途の車輪付き手動移動体を対象とするが、本論文においては先行研究でも対象としているものが多い手動車いすを主に取り扱い、手動車いす移動時の物理的負担度の測定結果についての検証を行った。以降、説明のために車輪付き移動体が歩道上を移動する際の物理的な負担度を移動難度と呼ぶ。なお、本研究は、車輪付き移動体が歩道上を移動する際の物理的な負担度に着目したものであり、車輪付き移動体を移動させる人の身体的負担度や心理的負担度を含んだ評価については今後の研究課題としている。

2. 移動難度の測定方法

2.1 力学的運動モデルによる路面評価の難しさ

歩道上を車輪付き移動体で移動する際に障害となるものとして、路面の勾配（縦断・横断）、段差、凹凸、移動時の抵抗が大きい材質の路面などが考えられる。路面の勾配については、手動車いす使用者においては縦断勾配では5%、横断勾配では2%程度で負担が大きくなるとしている [11], [12]。段差については、高齢の車いす使用者では2cmより大きな段差で乗り越え困難となる人もいる [13]。また、タイル舗装や沈み込みのある敷物などの路面の材質や、コンクリートの舗装状態によっても車いす走行時の負担は変化する [14], [15], [16]。このように、手動車いすによる移動時にはわずかな勾配や段差も障害となり、路面の材質による影響も生じる。また、段差乗り越え時には段差の高さや形状によっても影響がある [17], [18]。さらに、現実の歩道上にはこのような障害物が複合的に存在している場合がほとんどである。このような歩道上に存在する障害物の情報と、手動車いすの転がり抵抗（車いすの重量、重心、前輪・後輪の転がり抵抗係数、慣性力、粘性軸受抵抗など）を不足なく計測することにより、理論的には手動車いす移動時の物理的負担度を算出することが可能である [19], [20], [21], [22]。しかしながら、路面の勾配、段差の高さや形状、路面の材質（摩擦係数）、路面の細かい凹

凸（ひび割れなど）などを精密に計測することは困難であり、手動車いすの前輪・後輪の慣性力、前輪・後輪車軸の粘性軸受抵抗、前輪・後輪の転がり抵抗などについても計測のためには専用の計測機器が必要となる。このようなことから、歩道移動における物理的負担度の測定や評価のためには、歩道上に存在する障害物を個々に計測することなく評価可能な測定・評価方法が必要と考えられる。そのため、本研究では車輪付き移動体が移動時に要する負荷によって、車輪付き移動体における歩道移動時の物理的負担度である移動難度を評価することにした。

2.2 車輪付き移動体の走行負荷に基づく路面評価

車輪付き移動体の移動時の走行負荷は、路面上の障害（勾配、段差、凹凸、材質など）と車輪付き移動体の転がり抵抗（前輪・後輪の慣性力、転がり抵抗、粘性軸受抵抗、重心位置など）によって増減する。ただし、ある車輪付き移動体が移動した際に大きな走行負荷が生じるような路面は、別の車輪付き移動体が移動した際にも大きな走行負荷が生じるものと考えられるため、測定装置とした車輪付き移動体の走行負荷の大きさによって、路面を移動する際の物理的負担度を評価できるのではないかと考えた。ただし、同じ路面を移動した場合であっても、車輪付き移動体の走行負荷は車輪付き移動体の転がり抵抗によって異なる。そのため、測定装置とする車輪付き移動体の違いを、別の指標に置き換えることで標準化することが必要と考えた。本研究では、車輪付き移動体が特定材質の縦断勾配路面を移動した際の走行負荷を、路面の縦断傾斜角度に置き換えることによって標準化することとした。

同一材質の路面であれば、車輪付き移動体が縦断勾配路面を移動するために必要とする走行負荷は縦断勾配路面の角度と車輪付き移動体の重量によって増加する正の比例関係にあるものと考えられる。この比例関係が十分に強いものであれば、路面を移動する際に必要となる走行負荷を縦断傾斜角度と車輪付き移動体の重量によって推測することや、走行負荷と車輪付き移動体の重量から路面の縦断傾斜角度を推測することも可能である。そして、ある材質の路面において、走行負荷と車輪付き移動体の重量から縦断傾斜角度を推測する近似式を作成しておき、この近似式によって材質や状態が異なる路面の縦断傾斜角度を走行負荷と車輪付き移動体の重量から求めた場合には、推定されるのは近似式の作成元となった路面の縦断傾斜角度となる。つまり、測定装置とする車輪付き移動体が移動した際の走行負荷から、特定材質の路面における縦断傾斜角度を推定する。この縦断傾斜角度の大きさによって、路面移動に必要な物理的負担度を評価できるのではないかと考えた。たとえば、鉄板上を移動する際に必要とした手動車いすの仕事量と手動車いすの重量から、鉄板の縦断傾斜角度を推測する近似式を作成しておく。この近似式によって、鉄板

よりも移動が困難なアスファルト舗装のような路面の角度を推測した場合には、実際のアスファルト舗装路面の角度よりも大きな角度として推測される。これは、縦断傾斜路の角度が同じであれば、平坦な鉄板よりもアスファルト舗装路面の方が移動時に大きな仕事量を必要とすることを意味する。平坦な路面に段差や凹凸があった場合にも、推定される値は0度より大きな値を示し、平坦な鉄板上を移動するよりも大きな走行負荷を要することを意味する。また、横断勾配のある路面においては、車いすが斜面の谷側に引っ張られる力に抵抗するように進むこととなるため、横断勾配の傾斜と車いすの重量が大きいかほど移動するために必要な力は増加する [23], [24]。そのため、横断勾配移動時の走行負荷も鉄板の縦断傾斜角度によって評価できるものと考えられる。

この考えに基づき、路面移動時に必要とした走行負荷を、特定の材質路面の縦断傾斜角度によって標準化し、これを移動難度として歩道における移動の物理的な困難さを評価する指標とすることとした。なお、移動難度は校正用路面の縦断傾斜角度を示す指標であるが、校正用路面以外の路面ではその路面の縦断傾斜角度とは異なる値を示すために、単位なしの指標として取り扱う。また、本研究では、縦断勾配路面については登り坂を対象とした。

2.3 移動難度の指標および測定方法

移動難度の測定は以下の3つの手順によって行う：
 (1) 測定装置の選定と実装、(2) 校正用データの測定、
 (3) 重回帰分析による移動難度の推定式の作成。

2.3.1 測定装置の選定と実装（手順1）

次の条件を満たす測定装置を準備する：(条件1) 路面上を車輪が転がることによって走行するものであり、容易にスリップしない程度の重量と摩擦力を持った車輪を備えたもの、(条件2) 同一条件の斜面を移動した際に、斜面の角度と測定装置の重量によって増加する関係にある値を測定できるもの、たとえば手動車いす移動における仕事量であれば、トルク計と車輪回転数によって仕事量を計測できる装置を備えたものであり、これと同様の特性を持つものであればよいものとする。以下、この測定装置を移動難度測定装置、斜面の角度と測定装置の重量によって増加する関係にあるものを指して走行負荷と呼ぶ。走行負荷については、たとえば1m進むために必要な仕事量の平均値のように距離による標準化を行っておく。

2.3.2 校正用データの測定（手順2）

移動難度測定装置によって、同一条件の路面の縦断傾斜角度を段階的に変化させながら走行し、その際の路面の縦断傾斜角度と走行負荷を測定する。たとえば、前述の車いす移動における仕事量（トルクと移動距離の積算値）と路面の縦断傾斜角度を測定し記録する。また、測定の際には測定装置全体の重量を変化させてもよいものとし、その場

合には重量についても測定記録する。

2.3.3 移動難度計算式の作成 (手順 3)

測定・記録した校正用路面の縦断傾斜角度を説明変数、走行負荷を目的変数とした回帰分析を行う。ただし、手順 2 において測定装置の重量を変化させながら走行負荷を測定した場合には、重回帰分析における多重共線性を回避するために縦断傾斜角度と測定装置の重量の 2 つを説明変数、走行負荷を目的変数とした重回帰分析を行ったうえで、走行負荷と重量から校正用路面の縦断傾斜角度を求める式に変形する。このとき、回帰モデルのあてはまりの良さを示す自由度調整済み決定係数は十分に大きく (本論文では、0.9 以上とした)、2 つの説明変数 (角度と重量) の回帰モデルに対する影響を示す偏回帰係数は危険率 5% 水準で有意なものであることを条件とし、これに該当しない場合は測定装置の走行負荷は移動難度の測定には適さないものとする。この条件を満たす場合には、校正用路面の縦断傾斜角度と重量によって走行負荷を高い精度で予測できるものと考えられる。ここで得られた校正用路面の縦断傾斜角度とを求める式を、説明のために移動難度計算式と呼ぶ。

2.3.4 移動難度測定の考え方

以上の手順によって、走行負荷と重量から移動難度 (校正用路面の縦断傾斜角度) を推定する式 (移動難度計算式) が得られる。移動難度は手順 2 で走行負荷を測定した路面の角度であり、異なる材質や異なる状態の路面の走行負荷を測定した場合であっても移動難度計算式から得られる値は手順 2 で測定を行った材質・状態の路面の角度相当の値である。すなわち、どのような材質・状態の路面を走行したとしても、移動難度計算式によって予測した角度は手順 2 で走行負荷を測定した路面の角度相当の値として変換された値として算出される。つまり、手順 2 で走行負荷を測定した路面の角度相当の値によって、ほかの異なる材質・状態の路面での移動の困難さを評価することができる。

3. 移動難度による路面評価の検証

2 章で述べた移動難度による路面評価によって、路面移動の困難さが評価可能であるかを検証した。しかしながら、本研究で提案する移動難度は、校正用データを測定した路面の縦断傾斜角度によって、路面移動時の抵抗となる路面の勾配、凹凸、材質などの様々な要因による移動の困難さを表している。そのため、校正用データを測定した路面以外を測定した場合には実際の傾斜角度とは異なる値となる。また、路面の材質が異なる場合や、ひび割れがあるなど路面の状態によってもそれぞれ異なる。このように、実際に移動難度を測定したとしても、実際の路面の角度とは異なるものとなるため、測定した移動難度が正しいものであるかについてもそのまま評価を行うことはできない。そこで、測定・算出した移動難度から移動難度測定装置とは異なる車輪付き移動体の物理的負担を推定し、実測値と

比較することによって移動難度による路面の評価が適切であるかを検証した。具体的には、移動難度測定装置を電動車いすを用いて実装、移動難度を測定し、測定した移動難度をもとに手動車いす移動時の仕事量を推定した。そして、実測した手動車いすで移動したときの仕事量との比較から移動難度による路面評価の妥当性を検証した。

3.1 移動難度測定装置の実装

移動難度測定装置は、自操用ハンドル形電動車いす (モンパル ML-100 : HONDA) に実装した (図 1)。電動車いすのモータとコントローラ間に小抵抗 (0.077 Ω) を取り付け、抵抗の両端の電圧を OP アンプによって 2.5 倍に増幅したうえでマイクロコントローラ (AVR ATMEGA644P-20PU : AVR 社) によって、200 ms の標本化間隔で計測した。また、電圧値は 5 回分の移動平均を行うことでノイズの影響を軽減した。電動車いすの後輪裏側に白黒交互パターンを貼り付け、フォトインタラプタによって白色の回数を計測する車輪回転数測定装置を取り付けた。電圧値およびフォトインタラプタからの車輪回転数は、マイクロコントローラによって計測し、ラップトップ PC によって記録した。また、測定した移動難度の検証のために、GPS センサ (GR-5013u : 株式会社東京通商) によって位置情報を、6 軸慣性センサ (MPU6050 : InvenSense 社) によって角速度と加速度から算出した傾斜角度を、電圧値・車輪回転数とともに記録した。また、記録したデータ記録位置確認のために前方の画像を USB カメラ (HD WEBCAM C270 : Logicool 社) によって撮影した。

実装したセンサやカメラなどのうち、移動難度の測定に必要なものは、モータと駆動用蓄電池間の電流を測定するための OP アンプとマイクロコントローラ、移動距離測定のための車輪回転数測定装置、データ記録用のラップトップ PC であり、ほかのセンサやカメラなどは測定データの確認や検証のために実装した。この電動車いすを移動難度

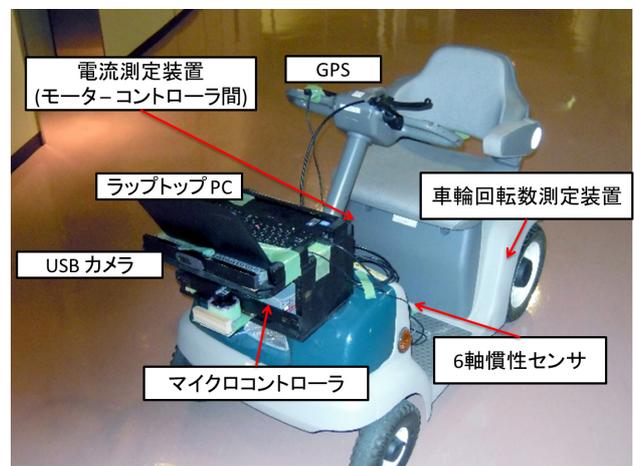


図 1 移動難度測定装置実装写真

Fig. 1 Photograph of moving difficulty measurement device.

測定装置として用い、電動車いすのモータとコントローラ間に流れる電流を抵抗器の両端の電圧から算出し、これを走行負荷値とした。

3.2 移動難度計算式の作成

移動難度計算式を作成するためには、移動難度測定装置を同一条件の路面で走行させ、その際の走行負荷（今回の場合は、電流値と車輪回転数）を測定する必要がある。理想的な測定環境としては、角度を上げて測定装置の車輪が滑らない程度の適度な摩擦係数を持った十分な長さ（10m以上）の板上を1度単位の角度で可変可能な機構を持つものと考えられる（以下、このような機構を持つ装置を校正用路面装置と呼ぶ）。しかしながら、今回はそのような環境を準備できなかったため、平坦で凹凸の少ないそれぞれ縦断傾斜角度が異なるアスファルト舗装路面4カ所を選び、その4カ所を走行した際の走行負荷を測定した。測定環境としたアスファルト舗装路面は、距離約15mの傾斜角約0度、距離約15mの傾斜角約2.1度、距離約12.5mの傾斜角約4.6度、距離約14.7mの傾斜角約5.8度の4カ所とした。また、電動車いすに測定者が搭乗して測定を行う測定装置であるために、測定者に重りを持たせることで体重を65kgから85kgまで5kg間隔ごとに増加させながら走行負荷を測定した。電動車いすの走行時消費電流（走行負荷）の測定結果を図2に示す。図3の縦軸は電動車いすが走行時に消費した電流を走行区間で積算し、それを走行距離で除算したものであり、電動車いすが1m進むために必要とする平均的な電流を表している。横軸は傾斜角度と測定者の体重を表している。縦断傾斜角度と重量によって増加する傾向がおおむねみとれる。このデータをもとに、走行時消費電流を目的変数、縦断傾斜角度と体重を説明変数とした重回帰分析を行った（統計ソフトR Ver. 2.51.2）。重回帰分析の結果、重回帰モデルの自由度調整済み決定係数(R²)の値は0.98 ($p < 0.01$)であり、縦断傾斜角度と体重の偏回帰係数はともに危険率5%水準で有意であった。

得られた重回帰式を式(1)に示す。式(2)によって、縦断傾斜角度と電動車いすに搭乗する測定者の体重によって、アスファルト舗装路面を走行したときの電動車いすの消費電流を推定することができる。この式を縦断傾斜角度 θ を求める式に変形すると、式(2)となる。式(2)によって電動車いす走行時の消費電流と測定者の体重からアスファルト舗装路面の縦断傾斜角度を推定することができる。この式(2)が本実験において使用する移動難度測定装置における移動難度計算式となる。ただし、式(2)は本研究において測定装置とした電動車いすにおける移動難度計算式であって、ほかの車輪付き移動体を測定装置とする場合には本節と同様の手順によってその測定装置の走行負荷から移動難度を計算する式を作成する必要がある。

$$W = 1.90\theta + 0.12M - 4.34 \quad (1)$$

ただし、 W ：消費電流（走行負荷）推定値、 θ ：縦断傾斜角度、 M ：測定者体重 [kg]、小数点3桁以下小数点4桁四捨五入。

$$\theta = (W - 0.12M + 4.34)/1.90 \quad (2)$$

実装した移動難度測定装置において、移動難度の測定のために必要な情報は、走行時の消費電流、移動距離、測定装置の重量のみであり、路面の勾配、段差の高さや形状、路面の材質、路面の細かい凹凸などの測定が難しい路面上の障害となる要因は測定する必要はない。また、測定方法も路面上を移動難度測定装置で走行するだけであり、測定に必要な時間や労力の軽減も期待できる。また、今回は電動車いすをベースとして使用したが、移動難度測定装置は、測定装置の条件を満たすものであればよく、たとえばトルク計を備えた車いす [5], [25]、あるいは、台車で車輪型の重りを引っ張ったときの力をフォースゲージで測定、そのときの力と車輪の回転を測定するような機構を持つ装置も考えられる。このような装置をベースとして用いる場合においても、同様の校正作業を行うことによって移動難度を

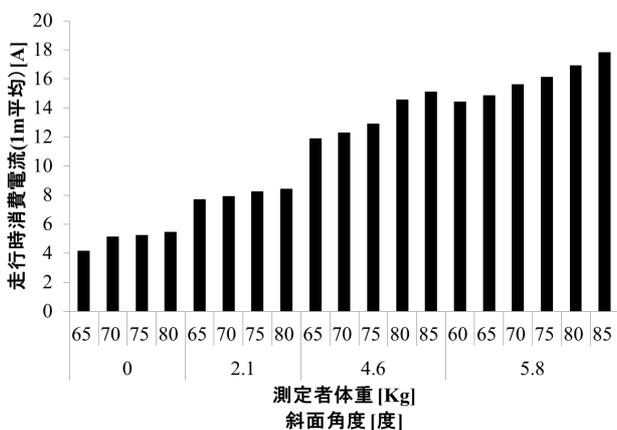


図2 走行負荷（消費電流）測定結果

Fig. 2 Measurement results of consumed current per metre.

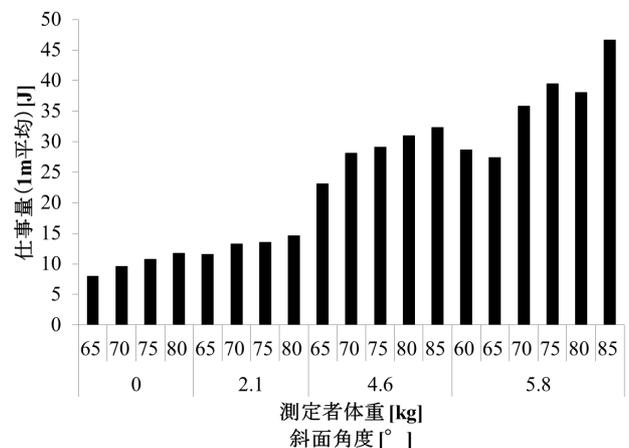


図3 手動車いす移動時の仕事量測定結果

Fig. 3 Measurement results of physical work per metre.

測定することが可能である。

3.3 手動車いす移動時の仕事量推定式の作成

検証のために、移動難度によって手動車いす移動時の仕事量を推定する式を作成した。縦断勾配路面走行時における車いす使用者の身体的負担を調べるため、車いすのハンドリム接線方向に加えられた力と車輪回転角度を 50 ms の標準化間隔で測定することのできる装置を両輪に実装した車いすを用いた [26]。本車いすは、重量 16.3 kg、車輪の半径 30.4 cm、ハンドリム（ステンレス製）は半径 25.4 cm のものであった。車輪回転角度は 5 度の分解能で測定し、車輪回転角度に車輪円周長を乗ずることで移動距離を求めた。また、ハンドリム周りの駆動トルクに回転角度ごとの移動距離を乗ずることでハンドリムの回転運動における仕事量を求めた。

手動車いす移動時に必要となる仕事量の測定は、3.2 節と同じアスファルト舗装路面で行い、健常者 11 人を対象とした。実験にあたっては、実験参加者には、測定の前に書面および口頭で実験内容について説明し同意を得た。測定の際には、無理のない自然な速度でできるだけ直進するように指示し、走行時に車いすの前輪が浮くような操作をした場合には再度測定を行った。測定は、路面ごとに 2 回ずつ行い、2 回の走行の測定値を平均化した。手動車いす走行時の仕事量の測定結果を図 3 に示す。移動難度測定装置用電動車いすの消費電流（図 2）よりはばらつきが大きいが、縦断傾斜角度と体重によって仕事量が増加する関係がみられる。また、2 回の走行における個人内の相対誤差は平均 8.0%、標準偏差は 11.4%であった。手動車いす移動時の仕事量（距離平均値）を目的変数、縦断傾斜角度と重量（車いすを含む）を説明変数としたステップワイズ法による重回帰分析を行った。その結果、縦断傾斜角度と重量の積を交互作用項として投入したモデルが最も AIC の値が小さく [27]、その自由度調整済み決定係数の値は 0.93 ($p < 0.01$) であり、縦断傾斜角度と重量の偏回帰係数は危険率 5%水準においてともに有意であった。また、仕事量の距離平均値以外にも、走行速度、1 ストロークの平均速度（走行開始から終了までのストローク回数を走行時間で除算）、仕事率を目的変数とした重回帰分析も行ったが、最も AIC 値が低いモデルの自由度調整済み決定係数の値であっても、走行速度の場合 0.25 ($p < 0.01$)、1 ストロークの平均速度の場合 0.08 ($p > 0.05$)、仕事率の場合 0.58 ($p < 0.05$) であり、十分な精度での推定は行えないものと考えられた。今回の検証の目的は、歩道において手動車いすを動かすために必要となる物理的負担度の評価であるために、移動難度によって推定し比較する指標としては、仕事量の距離平均値を用いることが適当と考えられた。仕事量の距離平均値を求める重回帰式を式 (3) に示す。式 (3) の重回帰式は移動難度計算式作成時と同じアスファルト舗

装路面を走行したデータをもとにしているため、移動難度と手動車いす搭乗者の体重によって任意の角度の縦断勾配路面を走行する際に必要となる仕事量を推定できる。ただし、式 (3) は本実験において使用した手動車いすによって、校正用路面としたアスファルト舗装路面を走行した場合の仕事量を推定するものであり、ほかの手動車いすでの移動における仕事量を推定するためには、本実験と同様の手順によって回帰式を作成する必要がある。

$$W_p = -1.81\theta + 0.09M + 0.09\theta M - 3.38 \quad (3)$$

ただし、 W_p ：手動車いす移動時仕事量 [J]、 θ ：移動難度（縦断傾斜角度）、 M ：測定者体重 [kg]、小数点 3 桁四捨五入。

3.4 検証実験

移動難度測定装置による移動難度の測定は、九州産業大学構内で行った。実験にあたっては、測定の前に書面および口頭で実験内容について説明しすべての実験参加者の同意を得た。電動車いすの消費電流は 1 秒間隔で移動距離および位置情報と関連付ける形式で記録した。

3.5 横断勾配路面での移動難度測定および仕事量推定

なるべく平坦で凹凸の少ない横断勾配のあるアスファルト舗装路面 4 か所（横断傾斜角度 1.2 度、3.9 度、5.6 度、6.1 度）を移動難度測定装置で走行し、それぞれの移動難度を測定した。横断勾配路面での移動難度測定結果を図 4 に示す。横軸が横断傾斜角度、縦軸が移動難度を示している。移動難度は校正用路面の縦断傾斜角度を示す指標であり、横断傾斜角度とは大きく異なる値を示している。この移動難度が横断勾配路面移動における物理的負担度を表せているかを確かめるため、手動車いす移動時の仕事量を移動難度から推定し、手動車いす移動時の仕事量を実測した結果と比較した。手動車いす移動時の仕事量の測定は、11 人の実験参加者（すべて健常な男性、年齢 23.2 ± 3.1 歳、

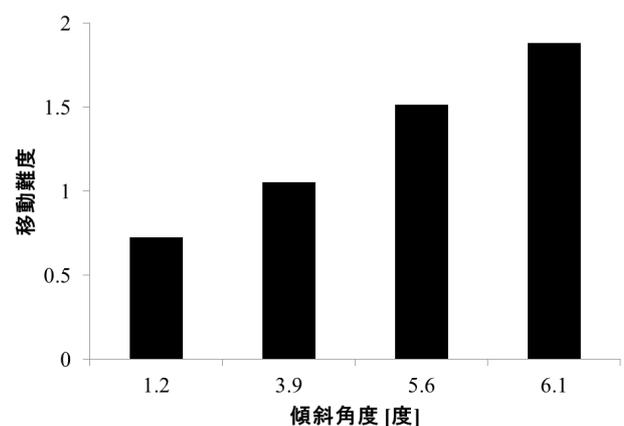


図 4 横断勾配での移動難度測定結果
Fig. 4 Measurement results of degree of difficulty of movement.

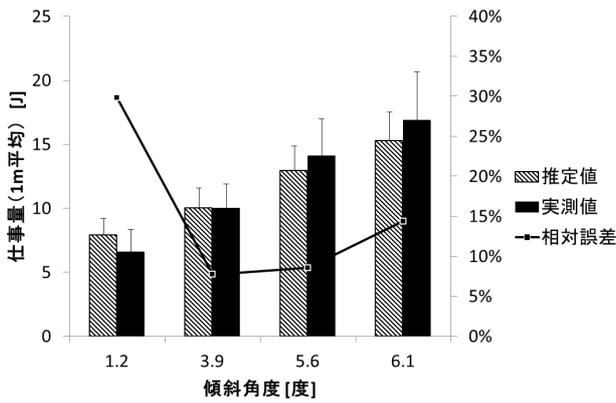


図 5 横断勾配路面における仕事量の推定値と実測値

Fig. 5 Differences between estimated values and measured values on cross slope.

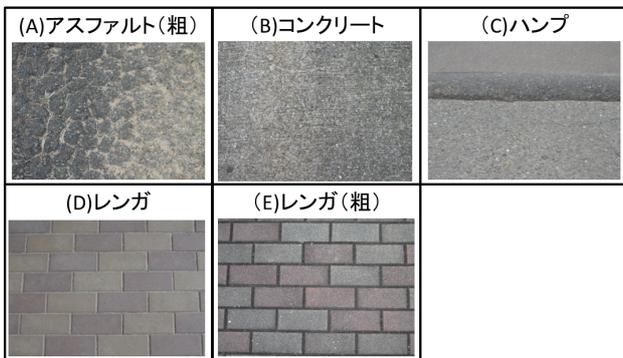


図 6 測定路面

Fig. 6 Measured various road surfaces.

体重 60.8 ± 8.5 kg) によって行った. 実験参加者は健康者を対象としたが, 本実験で用いた手動車いすで測定される仕事量は, 手動車いすが移動するために必要であった仕事量であり, 手動車いすを操作する人の身体能力が異なっても, 手動車いすに対して行われる仕事量は変わらない. そのため, 実験参加者については健康者でも問題ないと判断した. 測定した手動車いす移動時の仕事量の実測値と推定値を図 6 に示す. 図 5 の横軸は横断傾斜角度を, 縦軸は手動車いす移動時の仕事量の距離平均値 (実測値と推定値) であり, 棒グラフは実測値と推定値の平均値, 棒グラフのエラーバーは標準偏差, 線グラフは平均相対誤差をそれぞれ示す. ただし, 仕事量については校正用路面での測定結果と同じく左右の平均値としている. 傾斜角度別の平均相対誤差では, 傾斜角度 1.2 度の横断勾配路面が最も大きいものとなった. 全体的な実測値と推定値の相対誤差は最大 60.4%, 平均 15.1%, 標準偏差 13.7%であった. また, 推定値と実測値の間には強い正の相関関係 ($r = 0.93, p < 0.01$; Pearson's correlation coefficient) が認められた.

3.6 それぞれ異なる材質の勾配路面での仕事量推定

校正用路面とした凹凸の少ないアスファルト舗装路面以外の路面を移動難度測定装置で走行して移動難度を測定し,

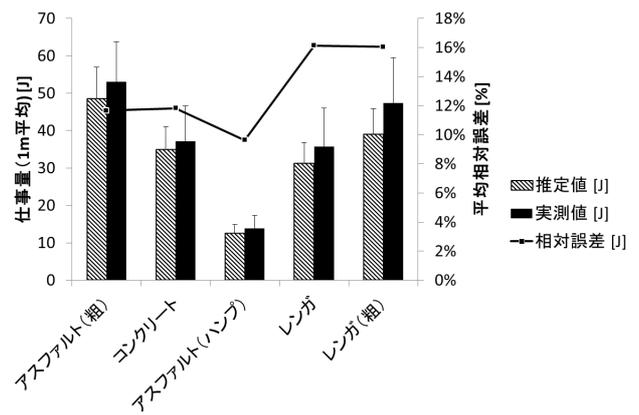


図 7 異なる材質の路面における仕事量の推定値と実測値

Fig. 7 Differences between estimated values and measured values without reference road.

手動車いす移動時の仕事量を推定し, 実測値と比較した. 手動車いす移動時の仕事量の測定は, 10 人の実験参加者 (すべて健康な男性, 年齢 22.6 ± 0.8 歳, 体重 67.3 ± 11.2 kg) によって行った. 走行した路面は, コンクリート舗装の屋外スロープ (距離 17 m, 最大縦断傾斜角度 5 度, 踊り場 2 カ所含む, 図 6 中の (A)), 高さ約 5 cm のハンプのあるアスファルト路面 (距離 13 m, 最大縦断傾斜角度 1.3 度, 図 6 中の (B)), レンガ素材のインターロッキング舗装路面 (距離 18 m, 最大縦断傾斜角度 4.6 度, 踊り場 2 カ所含む, 図 6 中の (C)), 粗いレンガ素材のインターロッキング舗装路面 (距離 14 m, 最大縦断傾斜角度 6.1 度, 最大横断傾斜角度 1.3 度, 図 6 中の (D)), ひび割れのある粗いアスファルト舗装路面 (距離 14 m, 最大縦断傾斜角度 4.8 度, 最大横断傾斜角度 2.1 度, 図 6 中の (E)) の 5 カ所であった. 手動車いす移動時の仕事量の実測値と推定値を図 7 に示す. 仕事量の実測値と推定値の相対誤差は最大 37.8%, 平均 11.6%, 標準偏差 8.8%であり, 実測値と推定値の間の相関関係を調べた結果, 強い正の相関関係 ($r = 0.97, p < 0.01$) が認められた.

3.7 実際の歩道移動における仕事量推定

それぞれ異なる出発地点と到着地点からなる 10 本の経路を移動難度測定装置で走行・測定した. 次に, 手動車いすで同じ 10 本の経路を 10 人の実験参加者が 1 人 1 経路ずつ走行し, その際の仕事量を測定し, 積算することで経路全体を移動するのに必要な仕事量を求めた. ただし, 今回の実験では, 手動車いすでの走行が明らかに困難な縦断勾配, 横断勾配, 段差が存在する場所は対象外とした.

走行した 10 本の経路 (経路 (1)~経路 (10)) は, 九州産業大学構内の歩道や通路である. それぞれの経路中に存在した車輪付き移動体での移動における障害物 (校正用路面と異なる材質, 最大縦断傾斜角度, 段差の有無) は次のとおりである. 経路 (1) は九州産業大学 12 号館の南側スロープ前から出発し, 健康・スポーツ科学センターの出

入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 3.8 度、距離約 120 m）、約 2 cm の高さのアスファルト材質のハンプを含むアスファルト舗装路面（最大縦断傾斜角度 4.8 度、距離約 240 m）を含む。経路 (2) は 1 号館の南側の出入口を出発し、大学北門まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 0.8 度、距離約 400 m）、屋内通路約 220 m を含む。経路 (3) はオープンカフェ立花の出入口を出発し、図書館の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 0.8 度、距離約 250 m）を含む。経路 (4) は芸術学部棟の南側の出入口を出発し、1 号館西側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 0.6 度、距離約 180 m）を含む。経路 (5) はオープンカフェ立花の出入口を出発し、8 号館東側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 2.2 度、距離約 580 m）を含む。経路 (6) は 8 号館東側の出入口を出発し、1 号館 1 階東側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 1.4 度、距離約 520 m）を含む。経路 (7) は九州産業大学 12 号館の南側スロープ前の出入口から出発し、図書館の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 0.6 度、距離約 350 m）、校正用路面と比べて目の粗いアスファルト舗装路面（最大縦断傾斜角度 10.9 度、距離約 170 m）を含む。経路 (8) は 2 号館西側の出入口を出発し、1 号館東側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 3.8 度、距離約 240 m）、レンガ材質の凹凸の大きいインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 4.8 度、距離約 20 m）を含む。経路 (9) は芸術学部棟の南側の出入口を出発し、12 号館南側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 2.2 度、距離約 350 m）、レンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 5.2 度、距離約 30 m、建物入口スロープ）を含む。経路 (10) は大学北門を出発し、12 号館南側の出入口まで走行する経路であり、途中にレンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 2.2 度、距離約 620 m）、レンガ材質のインターロッキング舗装路面（最大縦断傾斜角度 5.2 度、距離約 30 m、建物入口スロープ）を含む。

測定した移動難度と移動難度実験参加者の体重をもとに、その経路を手動車いすで移動する際に実験参加者が必要とする仕事量を式 (3) によって推定した。測定した移動難度と手動車いす搭乗者の体重から推定した手動車いすによる移動時の合計仕事量と、実際に手動車いすで移動した際に必要であった仕事量、および移動距離を図 8 に示す。

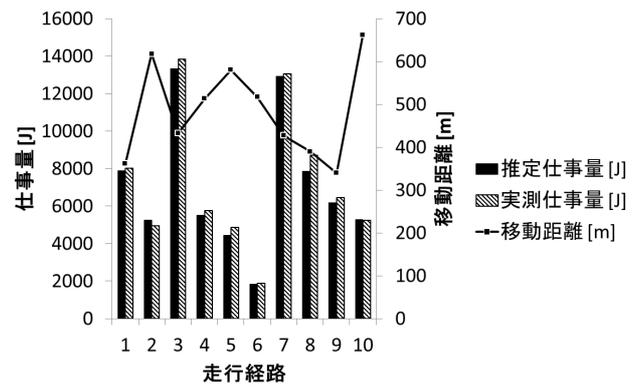


図 8 歩道移動における仕事量の推定値と実測値の差

Fig. 8 Differences between estimated values and measured values on side walk.

推定した仕事量と実測値との相対誤差は最大 10.74%，平均 4.30%，標準偏差 3.1%であった。また、推定値と実測値の間の相関係数は 0.996 ($p < 0.01$) であった。

4. 考察

4.1 移動難度の測定精度

3 章では、電動車いすの消費電流を走行負荷値とした移動難度測定装置による移動難度の測定結果について、手動車いす移動時の仕事量を移動難度から推定し、実測値と比較する検証実験について述べた。移動難度を測定し、手動車いす移動における仕事量の推定値と実測値を比較した結果、横断勾配路面においては最大 60.4%，平均 15.1%，標準偏差 13.7%の相対誤差であった。また、校正用路面とした凹凸の少ないアスファルト舗装路面とは異なる材質の路面においては、最大 37.8%，平均 11.6%，標準偏差 8.8%の相対誤差であった。横断勾配路面において最大 60.4%と大きな相対誤差も生じてはいるが、傾斜の大きい横断勾配路面を手動車いすによって直進することが難しいために、実測値自体のばらつきが大きいことが原因の 1 つと考えられる。実際の歩道移動における仕事量と実測値を比較した結果では、仕事量の推定値と実測値の相対誤差は最大 10.74%，平均 4.30%，標準偏差 3.1%であった。横断勾配路面や校正用路面とは異なる路面における検証結果よりも小さい相対誤差となったのは、大きな横断勾配や段差が存在する場所を走行しなかったことが原因の 1 つと考えられる。また、この誤差は移動難度計算式による走行負荷を移動難度に変換した際の誤差と、移動難度から手動車いす移動時の仕事量を推定した際の誤差が合わさったものであり、移動難度の測定精度は仕事量推定精度よりも高いものと考えられる。校正用路面を手動車いすによって走行した場合の仕事量の個人内誤差についても、平均 8.0%程度の相対誤差があったことから、移動難度による仕事量推定の精度は、実際に人が手動車いすを操作した際の仕事量推定としては、許容できる範囲と考えられる。さらに、推定値と実測値には

強い相関関係 ($r > 0.93$, $p < 0.01$) が認められたこと、全体的に推定値よりも実測値が大きな値を示していたことから、実測値による推定値の補正を行うことで平均的な精度はさらに向上する可能性がある。

このようなことから、移動難度によって車いすによる移動における物理的な負担を推定可能であり、測定した移動難度は歩道における移動の困難さを表しているものと考えられる。移動難度は歩道における移動の困難さについての定量的評価を行う指標として利用可能なものと考えられる。また、3章では移動難度測定のために電動車いすを移動難度測定装置とし、移動難度の測定結果検証のために手動車いすの仕事を測定した。手動車いす移動時の仕事量推定式(式(3))を作成する手順は、移動難度計算式の作成手順と同じであり、さらに、手動車いすの走行負荷(仕事量)は2.3節に示した測定装置の条件を満たしている。そのため、手動車いすを移動難度測定装置とし、検証には電動車いすの消費電流を用いたとしても近似した結果が得られるものと考えられる。ただし、手動車いす走行時の仕事量(図3)と電動車いす走行時の消費電流(図2)を比べると、電動車いす走行時の消費電流の方が安定した測定結果となっている。たとえば、石田ら[28]が開発した車椅子走行トルク測定装置についても路面の縦断プロファイルと強い相関関係を持つ走行トルクが測定可能とされており、モータによって駆動するような装置を移動難度測定装置とすることで、高い精度での測定を行える可能性があるものと考えられる。

4.2 本研究の応用について

本論文では、電動車いすの移動における走行負荷(走行時消費電流値)を移動難度に変換し、移動難度によって手動車いす移動における仕事を推定可能なことを示した。そして、移動難度によって歩道移動における物理的負担度を評価できる可能性を示した。本研究が提案する移動難度による路面評価は、手動車いすだけでなく電動車いすやベビーカー、高齢者の歩行補助として使われることもある手押し車、自転車などの、歩行補助用途の車輪付き手動移動体全般にとって有効なものと考えられる。

また、移動難度の応用として、大きな障害なく利用できる施設を提示するバリアフリーマップの作成、移動難度を主なコストとした最も少ない力で移動できる経路を提示するナビゲーションなどが考えられる。たとえば、従来のナビゲーションでは、大きな段差などを迂回するような経路のうち、最も短い距離で移動できるものを提示するものがほとんどである[29], [30]。移動難度は路面上を移動する際に必要となる物理的な力に基づいた指標であるため、最も少ない力で移動できる経路の提示を行うことが可能であり、さらに、不必要に大きく迂回するような経路も除外される。このようなことから、手動車いす使用者やベビ-

カーなどの歩行補助用途の車輪付き手動移動体を対象としたナビゲーションへの応用についても、移動難度を指標とした、物理的に楽に移動できる経路の提示を行えるシステムを実現できると考えられる。

4.3 本研究の限界と今後の課題

本研究において考案した移動難度は、路面上を移動するために必要な力を校正用路面の角度によって表現した指標である。これは、路面を移動するために最低限必要な力を示すものであり、歩道利用者の身体的、心理的な負担度を示すものではない。たとえば、手動車いすによって横断勾配を走行する際には、斜面谷側のハンドリムのみ大きな負担がかかることになり、移動難度によって表される負担よりも身体的・心理的には大きな負担となることも考えられる。このような場所については、横断勾配の角度によって移動難度を増加させるなど、歩道利用者の身体的・心理的負担を考慮したものとするのが望ましい。また、本研究では、縦断勾配路面については登り坂を対象とした。しかしながら、登り坂と下り坂では車輪付き手動移動体を操作する人が使用する筋力は異なり、恐怖感などの心理的な負担についても異なるものと考えられる。利用者の身体的・心理的負担について検証し、路面そのものの評価だけでなく利用者が本当に楽に移動できる歩道であるかの評価を行うことについては今後の研究課題である。

移動難度を実際の路面評価の共通指標とするためには、移動難度の校正用データを測定する路面と移動難度推定式のもとである回帰モデルにおける自由度調整済み決定係数の最低値を共通化する必要がある。本論文では、校正用データの測定は斜面角度がそれぞれ異なる4カ所のアスファルト舗装路面で行い、検証実験の結果から測定精度は妥当なものと考えられた。このことから、校正用の路面の選定基準を定めれば、校正用路面装置は必ずしも必要なものではないと考えられる。ただし、移動難度は0度の縦断傾斜角度である校正用路面よりも小さい走行抵抗である路面の評価については対応できない。そのため、より正確な測定のためには車輪がスリップしない程度の摩擦力を持った、できるだけ走行抵抗の小さな路面を校正用路面とすることが望ましい。また、移動難度は、移動難度測定装置が移動した際の走行負荷をもとに算出される。そのため、測定のためには測定対象の歩道や通路などを測定装置によって走行するだけで測定可能な利点があるが、その一方で測定装置が走行できない場所の測定を行えないという欠点もある。また、走行時に測定装置の車輪が空転するような路面では、移動難度の測定精度も低下する。このようなことから、車輪付き手動移動体が走行困難、あるいは不可能な歩道においては移動難度による評価は行えない。校正用路面の選定基準を定めること、移動難度推定に必要な回帰モデルの自由度調整済み決定係数の最低値を検討す

ること、測定装置とする車輪付き移動体の選定条件を具体的にすることなども、移動難度による路面評価を実際に行うためには必要な課題である。

5. おわりに

本研究では歩道上を移動する際の歩道における移動の物理的な困難さを定量的に評価する指標について検討した。縦断傾斜角度と測定装置の重量によって増加する関係にある移動負荷値を、基準とする路面の角度に置き換えることによって、縦断勾配・横断勾配・路面の凹凸・路面の材質などを個別に測定することなく、歩道における移動の困難さを評価可能な指標（移動難度）を考案した。電動車いすをベースとした測定装置を例として、移動難度の測定精度を手動車いす移動時の仕事量推定精度によって検証した。その結果、測定した移動難度によって、妥当な精度で手動車いすでの移動に必要な仕事量を推定可能であった。このことから、移動難度は歩道における移動の困難さを定量的に評価する指標として妥当なものであると考えられる。さらに、移動難度の測定は測定装置によって走行するだけであり、校正用路面装置を必要としないことも含めて、効率的に歩道の測定を行えるものと考えられる。

今後の研究課題としては、移動難度による歩道評価を実際に行うための条件の検討、利用者の身体的・心理的負担についても考慮した評価への応用、移動難度を用いたバリアフリーマップやナビゲーションシステムの開発などを予定している。

参考文献

- [1] 杉山郁夫, 土井健司, 若林 仁, 川俣智計: 移動の質の定量化にもとづく歩行空間の評価方法に関する研究, 土木学会論文集, No.800, pp.37-50 (2005).
- [2] 土井健司, 長谷川孝明, 小林成基, 杉山郁夫, 溝端光雄: 超高齢化を迎える都市に要求される移動の質に関する研究, IATSS Review, Vol.35, No.3, pp.38-49 (2011).
- [3] 牧 恒雄, 竹内 康, 松田 誠: 歩道の凹凸評価方法に関する研究, 舗装工学論文集, Vol.1, pp.151-158 (1996).
- [4] 岡村美好, 深田直紘: 車いすの振動加速度を用いた歩道路面凹凸の評価に関する研究, 舗装工学論文集, Vol.9, pp.17-23 (2004).
- [5] Ishida, T., Takemoto, H., Ishida, S., Kameyama, S., Himeno, K. and Kashima, S.: Evaluation of sidewalk unevenness based on wheelchair traveling resistance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1956, pp.68-75 (2007).
- [6] 金野僚一, 鈴木昭二: シニアカーのための測域センサを利用した路面の凹凸検出手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2010, ROMBUNNO.2A2-D14 (2010).
- [7] 井上道哉, 古山宗亮, 金房雄一, 長沢可也: iPhone を利用したバリア情報記録・公開システム, 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol.111, No.424, pp.97-101 (2012).
- [8] 隅田康明, 合志和晃, 松永勝也, 志堂寺和則: 車いす利用者向け経路探索のための路面の傾斜および段差測定システムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, 福祉情報

- 工学, Vol.114, No.357, pp.63-68 (2014).
- [9] Mori, M. and Hiroshi, T.: A new method for evaluation of level of service in pedestrian facilities, *Transportation Research Part A: General*, Vol.21, No.3, pp.223-234 (1987).
- [10] 隅田康明, 林 政喜, 合志和晃, 松永勝也: 経路探索用データ作成のための電動車いすの走行負荷にもとづく手動車いすでの移動に必要な力量の推定方法, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.146-155 (2013).
- [11] 木村一裕, 清水浩志郎, 伊藤誉志広, 呉 馨欣: 車いす走行におけるバリアフリー度の評価方法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.17, pp.973-980 (2000).
- [12] 新田保次, 猪井博登, 小山健一, 中平明憲: 坂道における高齢者・障害者の移動負担の計測, 土木計画学研究・概要集, Vol.29 (CD-ROM) (2004).
- [13] 鍋島益弘, 山田 優: 車いすを利用する高齢者のための歩道構造に関する研究, 土木学会論文集, Vol.725, pp.157-169 (2003).
- [14] 大鍋寿一, 青柳貴之, 水口文洋: 種々床面における車椅子の転がり抵抗と動特性, 日本機械学会年次大会講演論文集 2000, No.1, pp.389-390 (2000).
- [15] 岡村美好: タイル舗装の目地が走行中の車いすの振動と乗り心地に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.237-246 (2008).
- [16] Cooper, R.A., Wolf, E., Fitzgerald, S.G., Kellerher, A., Ammer, W., Boninger, M.L. and Cooper, R.: Evaluation of selected sidewalk pavement surfaces for vibration experienced by users of manual and powered wheelchairs, *The Journal of Spinal Cord Medicine*, Vol.27, No.5, pp.468-475 (2003).
- [17] 糟谷佐紀, 米田郁夫, 阪東美智子, 末田 統, 奥 英久: 段差通過時の手動車いす駆動力に関する指標化, 福祉工学シンポジウム講演論文集, Vol.2003, No.3, pp.25-28 (2003).
- [18] 糟谷佐紀, 米田郁夫, 阪東美智子, 末田 統, 奥 英久: 段差形状が車いすの操作負担に及ぼす影響, 福祉工学シンポジウム講演論文集, Vol.2002, No.2, pp.201-204 (2002).
- [19] Cooper, R.A.: A systems approach to the modeling of racing wheelchair propulsion, *J. Rehabil. Res. Dev.*, Vol.27, No.2, pp.151-62 (1990).
- [20] 垣本 映, 松田英夫, 関口行雄: 介助型パワーアシスト車いすの開発, 精密工学会誌, Vol.65, No.8, pp.1126-1130 (1999).
- [21] 柴田英介, 花房昭彦, 磯村 恒, 大津愛子, 七種健一: 車いす駆動動作のシミュレーションシステムの開発, ライフサポート, Vol.14, No.2, pp.30-38 (2002).
- [22] 今里元信, 太田 進, 平田宏一, 宮崎恵子: 旅客船内における車いすの走行シミュレーション, 駆動力推定用基本モデルの開発, 日本航海学会論文集, Vol.105, pp.35-41 (2001).
- [23] 隅田康明, 合志和晃, 松永勝也, 志堂寺和則: 横断勾配路での移動における車いす使用者の負担の定量化と評価, 九州大学システム情報科学紀要, Vol.20, No.1, pp.1-6 (2015).
- [24] Brubaker, C.E., McLaurin, C.A. and McCLAY, I.S.: Effects of side slope on wheelchair performance, *J. Rehabil. Res. Dev.*, Vol.23, No.2, pp.55-58 (1986).
- [25] 平田宏一, 今里元信, 宮崎恵子: 船舶バリアフリーのための実験用車いすの開発, 日本設計工学会平成 13 年度春期研究発表講演会講演論文集, pp.103-106 (2001).
- [26] 隅田康明, 林 政喜, 合志和晃, 松永勝也: 経路探索用データ作成のための電動車いすの走行負荷に基づく手動車いすでの移動に必要な力量の推定方法, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.146-155 (2013).
- [27] Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *Selected Papers of Hiro-*

tugu Akaike, pp.199-213 (1998).

- [28] 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).
- [29] 山本浩司, 安村禎明, 片上大輔, 新田克己, 相場 亮, 宮城政雄, 桑田 仁: ユーザの投稿情報にもとづく経路ナビゲーション, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.18, 1B3-01 (2004).
- [30] 国土交通省: バリアフリー経路探索体験サイト, 入手先 (<https://www.hokoukukan.go.jp/barrierfree.taiken.html>) (参照 2016-03-16).



隅田 康明 (正会員)

2016年九州大学大学院システム情報科学府情報学専攻博士後期課程修了。博士(情報科学)。日本靴医学会, 日本機械学会, 日本土木学会各会員。



松永 勝也

1972年九州大学大学院文学研究科博士課程(心理学専攻)中途退学, 文学博士。九州大学文学部心理学講座助手, 助教授, 教授, 1996年九州大学大学院システム情報科学研究院教授, 2005年定年退職, 九州大学名誉教授, 九州産業大学情報科学部教授, 2012年九州産業大学定年退職。日本人間工学会, 日本交通心理学会, 自動車技術会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



合志 和晃 (正会員)

1970年生。1997年九州大学大学院博士課程修了。博士(情報科学)。同年九州大学助手。1998年英国北アイルランドベルファストクイーンズ大学(The Queen's University of Belfast)で在外研究。2002年九州産業大学情報科学部助教授(准教授)。2009年同大学教授。高度交通システム(ITS)に関する研究に従事。自動車技術会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本交通心理学会, 日本靴医学会各会員。



志堂寺 和則

1992年九州大学大学院文学研究科博士後期課程(心理学)単位取得退学。1995年博士(文学)号取得。九州大学教養部助手, 長崎大学教養部講師, 九州大学大学院システム情報科学研究科助教授, 九州大学大学院システム情報科学研究院准教授を経て, 現在, 教授。交通科学, 感性科学, ユーザインタフェース/VRに関する研究に従事。自動車技術会, 日本交通心理学会, ヒューマンインタフェース学会, 電子情報通信学会各会員。