

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

隅田 康明^{1,a)} 林 政喜² 合志 和晃² 松永 勝也³

受付日 2012年4月7日, 採録日 2012年10月10日

概要: 歩行者 ITS に求められるサービスの1つとして、手動車いす使用者向けの経路探索システムの開発が試みられている。手動車いす使用者向けの経路探索システムや案内システムには、様々な路面情報が必要であり、その1つとして、手動車いすで経路を移動する際に必要な力量があげられる。本論文では、これを定量的に測定し、経路探索に応用することを目的に、電動車いすが移動時に必要としたモータ駆動電力から手動車いすの移動に必要な力量を推定する方法について報告する。異なる傾斜角度の路面で、手動車いすのハンドリム駆動力の測定値と電動車いすのモータ駆動電力との関係を明らかにするための実験を行った。その結果、電動車いすのモータ駆動電力と測定者の体重から、同等のモータ駆動電力を必要とする基準となるスロープの傾斜角度を推定し、これと手動車いす使用者の体重からハンドリムの駆動力を推定する方法を考案した。推定結果を検証する実験を行ったところ、許容できる範囲の誤差でモータ駆動電力からハンドリム駆動力を推定できることを示した。

キーワード: 車いすナビゲーション, 経路探索, 歩行者 ITS, 車いす

Method to Measure the Force Necessary to Move a Manual Wheelchair to Construct the Data Base for the Manual Wheelchair Navigation

YASUAKI SUMIDA^{1,a)} MASAKI HAYASHI² KAZUAKI GOSHI² KATSUYA MATSUNAGA³

Received: April 7, 2012, Accepted: October 10, 2012

Abstract: We have developed a navigation system for manual wheelchair users: a pedestrian ITS (Intelligent Transport Systems). To construct a barrier-free database for the manual wheelchair users, it is necessary to calculate the cumulative force necessary to move the manual wheelchair. This report describes a method to measure the force to move a manual wheelchair efficiently. We developed a method to estimate the force necessary to move a manual wheelchair by the motor driving power of the electric wheelchair. The inclination angle of the standard slope was estimated using values obtained from experiments for the mass and motor driving force. Moreover, we estimated the torque loaded to the hand rim from the weight and the standard slope inclination angle. With satisfactory accuracy, this method can estimate the torque which must be applied to the hand rim of a manual wheelchair from the motor driving force for electric wheelchairs.

Keywords: wheelchair navigation, route finding, pedestrian ITS, wheelchair

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

² 九州産業大学
Kyushu Sangyo University, Fukuoka 813-0004, Japan

³ 九州大学
Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

a) sumidayasuaki@gmail.com

1. はじめに

近年、日本では少子高齢化が深刻な問題となっており、2013年には総人口に対する高齢者人口の割合は25.2%となると推計されている[1]。社会の高齢化にともない、バリアフリー新法（正式名：高齢者、障害者等の移動等の円滑

化の促進に関する法律 [2]) の施行にみられるように、移動におけるハンディキャップを負う人々が独力で移動できる都市環境の整備が求められている。しかしながら、平成 23 年 3 月末時点において、市町村バリアフリー基本構想を作成済み、または作成予定とした市区町村は全体の約 21% である [3]。また、バリアフリー化されている道路や通路であっても、実際には通行が困難な場合もあるとの指摘もあり、都市のバリアフリー化は十分とはいえない。歩道や通路の整備が不十分な状況下では、車いす使用者を含む肢体不自由者の単独での移動は大きく制限され、このことが外出を躊躇する要因となっていると報告されている [4]。不十分なバリアフリー環境の中でも、確実に目的地に到達可能な経路がある場合には、その経路を示すことにより、この問題は解決可能であると考えられる。

高齢者や障害者を含む歩行者、車いす使用者、自転車利用者などに、安全・安心・円滑な移動環境を提供することを目的に、歩行者 ITS (Intelligent Transport Systems) の開発が進められている。歩行者 ITS に求められるサービスの 1 つとして、歩行者ナビゲーションがあり、これについては近年の移動体通信技術の発展によって、サービスの提供が開始されている。しかしながら、健常歩行者用のナビゲーションサービス (経路探索) では、手動車いす使用者を含むハンディキャップ者に対する案内を行うことは難しい。このようなことから、手動車いす使用者向けに特化した経路探索システム、ナビゲーションシステムの開発が行われている。Kasemsuppakorn らは歩道上の地点だけでなく、車いす使用者の移動に必要な建物やバス停などをノードとして手動で歩道ネットワークを構築し、それをもとにした経路探索を行っている [5], [6]。また、岡本らは市販の GIS ソフトに利用可能店舗を入力することで、車いす使用者を含むハンディキャップ者への経路情報を提供する研究を行っている [7]。これらの研究では経路探索を行うにあたり、必要な情報の登録を手動で行っている。これは、手動車いす使用者向けの経路探索や経路案内に適した情報を持ったデータベース (以下、車いすバリアフリーデータベース) が現在存在しないためであると考えられる。手動車いす使用者向け経路探索システム用の車いすバリアフリーデータベースの構築には、広い範囲の路面情報を収集し、データベースに登録する作業が必要であり、これを手動で行うことは多大な時間と労力を必要とする。この問題について、山本らは複数のユーザによる投稿情報を共有することで、人海戦術での広範囲の情報収集を行い、それを基にした経路探索を行うシステムについての研究を行っている [8]。しかしながら、手動車いす駆動に必要な力や空間の大きさを計測する装置なしでの情報収集では、情報を収集するユーザの主観による評価となる可能性が高くなる。このようなことから、本研究では車いすバリアフリーデータベースに必要な情報を定量的かつ効率的に測定し、デー

タベースに蓄積するに適した形式に変換する方法について研究を行った。

2. 車いすバリアフリーデータベースに必要な情報

手動車いすでの走行が困難な道路や通路としては、路面の勾配 (縦断勾配, 横断勾配) が大きい道路、舗装が不十分な道路、移動抵抗の大きい敷物が敷いてあるなどで走行に大きな力を要する道路や通路、歩行者や他の車いすとすれ違うあるいは方向転換するための十分な通路幅がない道路や通路などがあげられる。

手動車いす使用者向けの経路探索に必要な経路情報を測定、収集する装置については、手動車いすベースの測定装置が提案されている [9], [10]。しかしながら、必要となる経路情報を、手動車いすを用いて測定し、情報収集するのは効率的ではなく、また、人間が手動車いすを動かすのに必要な体力を測定する方法については示されていない。このようなことから、我々は電動車いすを利用して走行するだけで自動的に情報を収集する経路情報測定用電動車いすの開発を行ってきた [11]。

車いすバリアフリーデータベースに必要な経路情報として、手動車いすの移動に必要な力量、車いすが転回可能かどうかを評価するための周辺空間距離、測定地点の位置情報、測定地点間の距離、路面の勾配、移動の困難さを視覚的に判断するための画像などが考えられる。経路情報測定用電動車いすでは、走行するだけで表 1 に示す経路情報を一定時間 (本研究では 1 秒) ごとに測定、収集する (図 1)。このうち、手動車いすの移動に必要な力量の測定は、手動車いす使用者向けの経路探索を行ううえで最も重要な情報であると考えられる。なぜならば、手動車いす使用者の体力の違いにより、移動可能な経路も異なると考えられるためである。実際の路面を手動車いす使用者が走行する際に必要な体力は、路面の勾配、路面の材質、路面の凹凸、手動車いす使用者の体重などの要因によって異なる。このような走行の際に抵抗となりうる要因をすべて測定し、手動車いす使用者の走行時に生じる負担を予測す

表 1 経路情報測定用電動車いすによる測定・記録データ
Table 1 Measured data by the electric wheelchair.

経路情報	測定方法
測定地点の位置情報	GPS (屋外), QR コード (屋内)
測定日時	測定および記録用 PC, GPS
手動車いすの移動に必要な力量	モータ駆動電力測定装置
通路幅	距離センサ
前方空間距離	距離センサ
移動距離	車輪回転数測定装置
縦断勾配	傾斜角度測定センサ
横断勾配	傾斜角度測定センサ
前方画像	前方映像取得用カメラ

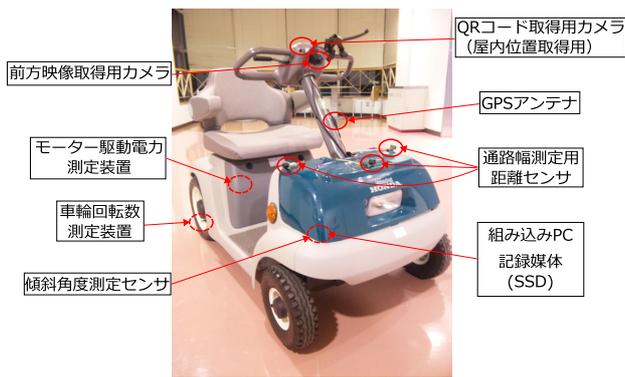


図 1 経路情報測定用電動車いす

Fig. 1 Photograph of the wheelchair for measurement.

ることは困難である。そこで、本研究では電動車いすが走行する際に必要とするモータの駆動電力と手動車いすの移動時に必要とする力量を測定し、電動車いすのモータ駆動電力から手動車いす使用者が移動時に必要とする力量の推定を試みた。

3. 手動車いすのハンドリム駆動力の測定

3.1 手動車いすの移動に必要な力量の測定方法

経路情報測定用電動車いすにおいては、バッテリーとモータの間に抵抗器を取り付け、その抵抗器の両端の電圧をマイクロコントローラの AD コンバータによって測定し、走行時のモータの駆動電力を算出している。モータの駆動電力から手動車いす使用者が移動時に必要とする力量を推定するためには、手動車いす使用者が移動時に必要とする力量を測定する必要がある。これの測定方法としては、ハンドリムを操作するときの力量を測定する方法 [9]、車輪の駆動トルクを測定する方法 [12]、酸素消費量から走行効率を求める方法 [13]、筋電計を用いて筋肉の負担を測定する方法 [14]、ヒアリングによる調査を行う方法 [15] などがある。酸素消費量から走行効率を求める方法、あるいは筋電計を用いて筋肉の負担を測定する方法では、酸素消費量や筋電圧の個人差は大きいものと予想され、経路情報の測定を目的とした場合には適さないと考えられる。ヒアリングによる調査方法では、主観による評価であり、本研究の目的とする定量的測定には適さない。車輪の駆動トルクを精度の高いトルク計によって計測する方法は、トルク計のサイズと重量が大であることから、手動車いす使用者の体力を測定する場合に自然な走行を阻害する可能性が考えられた。また、今後複数の計測用手動車いすの製造を考慮した場合の価格面からも本研究では採用しないこととした。ハンドリムを操作するときの力量を測定する方法では、移動時に車いす使用者が直接に作用させる唯一の箇所であるハンドリムが車輪に与える力のみを測定できる。手動車いすの車輪はハンドリムに力を与えることで回転することから、ある経路を移動する際にハンドリムに与えられた力を測定す

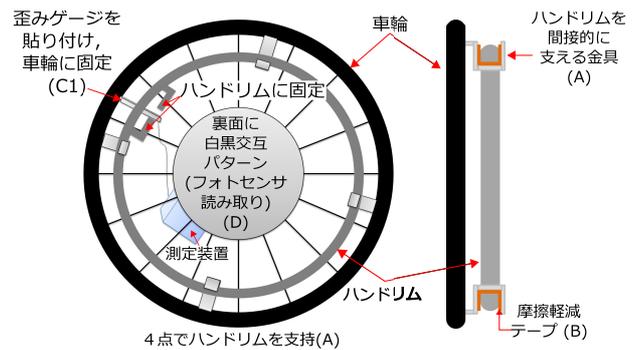


図 2 ハンドリム駆動力測定用手動車いす設計イメージ

Fig. 2 Apparatus for measuring the torque loaded to the hand rim of manual wheelchair.

ることで、その経路を移動するために必要な力量を知ることができると考えられた。このような理由から、本研究では、手動車いすを移動させる際にハンドリムにかかる力を測定するハンドリム駆動力測定用手動車いすを開発した。

3.2 ハンドリム駆動力測定用手動車いすの開発

ハンドリムにかかる力の測定方法として、歪みゲージを利用してハンドリムと車輪の接続部分にかかる負荷を測定する方法を採用することとした。一般的な手動車いすのハンドリムと車輪の接続部分の歪みを歪みゲージを用いて測定すると、接続部分に対して上下方向にハンドリムを押し、搭乗者の自重、車輪にかかる力などの車輪回転方向以外の力によって接続部分が歪み、正確な測定を行うことができない。そのため、通常のものよりも一回り小さいハンドリムを車輪と固定しないように取り付け、ハンドリムの回転方向の力のみを車輪に伝えるような機構を作成した。一回り小さいハンドリムを車輪部分から外側に伸ばした金具で支え (図 2 中 A)、支え部分とハンドリムの間に摩擦係数の小さいテープなどを挟み (図 2 中 B)、ハンドリムの回転方向については 10mm から 30mm 程度自由に動くような構造とした。ハンドリムから車輪への力の伝達は、車輪に固定した金具をハンドリムで押す (引く) ことで車輪にハンドリムからの力を伝えることによって行った (図 2 中 C1, C2)。ハンドリム回転方向の力以外は金具に伝わらないので、ハンドリムで押す (引く) 力による歪みのみを検出することができる。ハンドリムから車輪への力の伝達については、ハンドリムが剛体であるならば金具を押す力はハンドリムを持つ位置によって変化しないと考えられるので、ハンドリムの力を車輪に伝える箇所は 1カ所でよいと考えられる。ハンドリムにかかる力は、この金具の歪み量を測定することで推定する。金具の歪み量は、歪みゲージブリッジを組み、ブリッジの出力電圧をアンプで増幅後にマイクロコントローラの AD コンバータを利用してデジタル値に変換し、マイクロコントローラから無線通信で PC へと送信し、PC で記録する (図 3)。また、ハンドリムを

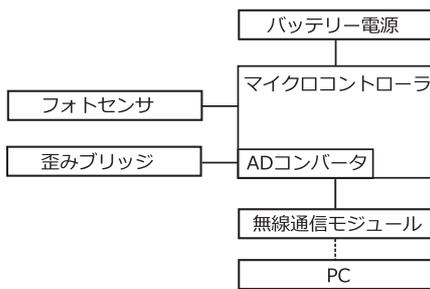


図 3 電子回路ブロック図
Fig. 3 Block diagram of the electronic circuit.



図 4 ハンドリム駆動力測定用手動車いすへの実装写真
Fig. 4 Photographs of the apparatus for measuring the torque loaded to the hand rim of manual wheelchair.

表 2 電子回路の主な構成部品 (片輪分)

Table 2 Components of the system for measuring the torque loaded to the hand rim of manual wheelchair.

部品名	品名, 型名	個数
歪みゲージ	ストレインゲージ N11-FA8-120-23 (共和電業)	2
フォトセンサ	反射型フォトセンサ RPR220	1
オペアンプ	計装アンプ INA101HP	1
電圧コンバータ	LTC1144	1
マイクロコントローラ	Arduino UNO	1
無線通信モジュール	SparkFun WRL-09358	1

回転させた際の車輪の回転角度と車いすの移動距離を測定するため、車輪の動きと連動しない車軸部分に白黒交互のパターンを貼り付けた円盤を取り付け、フォトセンサを用いて車輪の回転数を計数することによって測定した (図 2 中 D)。車輪回転数も歪みゲージブリッジの出力電圧測定結果とともに PC へと送信した。

図 2 および図 3 の設計に基づき実装したハンドリム駆動力測定用手動車いすの実装写真を図 4 に、電子回路の実装に使用した主な構成部品を表 2 に示す。ハンドリム駆動力測定用手動車いすの開発目的は、経路移動にあたっての経路情報測定用電動車いすのモータ駆動電力と手動車いすのハンドリム駆動力の校正を行うことにある。この校正を行うために、車いすを直進走行させた際のモータ駆動電

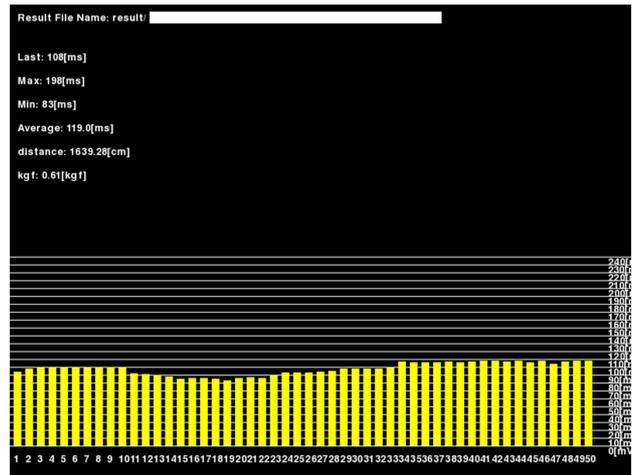


図 5 測定処理プログラム画面例
Fig. 5 Screen image of the measuring program.

力とハンドリム駆動力をそれぞれ計測し、計測データをもとに校正を行う方法を考えた。直進走行での計測では、片側車輪の計測を行えばよいと考えられるので、本研究では手動車いすの右側車輪にのみにハンドリム駆動力の測定装置を実装した。本研究では、手動車いすは市販の 22 インチタイヤの車いす、ハンドリムは 20 インチのステンレス製のものを使用した。ハンドリムは L 字型と J 字型の金属板を組み合わせてタイヤリムの 1.50 cm 外側に取り付けた。歪みゲージは L 字型金属板の表と裏に 1 枚ずつ貼り付ける 2 アクティブゲージ法 [16] とした。歪みを測定する金属板としては、厚さ 2.00 mm のステンレス板を使用した。歪みブリッジの出力電圧は約 334 倍に増幅した後にマイクロコントローラ (Arduino UNO : Arduino 社) の AD コンバータによってデジタル値に変換した。車輪回転数計測は反射型フォトセンサを使用し、5 度の円弧を 72 個白黒交互に円形に並べた紙 (車輪回転数計測用白黒パターン) をアルミ板に貼り付け、反射型フォトセンサで白黒パターンの個数を計測することとした。本研究で使用した手動車いすの車輪外周は 178.4 cm であったので、パターン 1 個分での移動距離は 2.48 cm となる。白黒パターンを貼り付けたアルミ板は車軸に固定し、車輪回転数計測器を車輪側に取り付けて回転させ、白黒パターンを読み取った。歪みブリッジの出力電圧増幅結果と車輪回転数データは、マイクロコントローラ (Arduino UNO) を介して、1 秒間に 40 回の頻度で PC へ無線送信した。PC への無線シリアル送信は Bluetooth モジュール (WRL-09358 : SparkFun 社) により行った。PC を除くすべての測定機器の電源は 1.2 V の単 3 充電電池 (6 本直列) から供給することとした。受信側 PC の測定処理プログラムは Bluetooth で送信されてきたデータを受信し、歪みゲージの出力電圧増幅値をグラフで、累積移動距離を文字列で表示するとともに、測定データと GPS 受信データを合わせてファイルに記録する機能を実装した (図 5)。

4. 傾斜, 荷重が異なる状況での走行実験

4.1 実験目的および実験環境

経路情報測定用電動車いすの走行時のモータ駆動電力から手動車いすの走行時のハンドリム駆動力の算出を可能とすることを目的とし, 共通の条件下で経路情報測定用電動車いすとハンドリム駆動力測定用手動車いすを走行させて測定データを取得し, それをもとに校正を行うことを試みた. 傾斜角 3.14 度, 5.96 度, 8.84 度の 3 段階に傾斜角度を変更できる長さ 3.7 m の実験用スロープを作成して測定実験を行った. その結果, 経路情報測定用電動車いすのモータ駆動電力については安定したデータが得られたが, ハンドリム駆動力測定用手動車いすでのハンドリム駆動力の測定結果は手動車いすへの搭乗者によって大きな変動が認められた. このことは, 走行時のハンドリムのストローク回数が少なかったため, ストロークごとの力量の差によってもたらされたと考えられる. このことから, ストロークごとの力量の差が影響を与えない程度の走行距離が必要であると考へ, 校正実験は 10 m 以上の距離のアスファルト路面によって行うこととした.

経路情報測定用電動車いすとハンドリム駆動力測定用手動車いすで, 距離約 15 m の傾斜角約 0 度, 距離約 15 m の傾斜角約 2.1 度, 距離約 12.5 m の傾斜角約 4.6 度, 距離約 14.7 m の傾斜角約 5.8 度のアスファルト路面の 4 カ所を走行し, その際に必要とされる力量について調べた. 傾斜角については, デジタル傾斜計 (Digital Protractor Pro3600: SmartTool Technologies 社) を用いてスロープの 3 点の傾斜角を測定し, 相加平均によって算出した. 実験参加者は体重 59 kg, 65 kg, 78 kg の健常者 3 名とし, 走行の際に重りを持つことで 5 kg 刻みの荷重変化にともなう値を調べることとした (以降, 車いすの搭乗者の体重と重りの重量を足したものを荷重と記す). また, 電動車いすは時速 3 km に設定した状態で走行し, その際のモータ駆動電力を測定した. 電動車いすでの測定については, 走行ごとのモータ駆動電力に大きな差がないことから 1 回の測定とした. 手動車いすでの測定は 10 m 以上走行した際の走行ごとの差を見るために実験参加者や, 荷重が変わるごとに 2 回行った.

手動車いす使用者向けの経路探索を行う場合, 任意の地点間をその人の力で移動可能かどうかを判断する必要がある. したがって, 一定距離を移動する際に必要となる電動車いすのモータ駆動電力から, 一定距離を移動する際に必要となるハンドリム駆動力を推定するのが適当であると考えられる. そこで, 経路情報測定用電動車いすの測定データについては 1 m 走行あたりのモータ駆動電力の平均値 (以降, 1 m 平均モータ駆動電力と記す), ハンドリム駆動力測定用手動車いすの測定データについては 1 m 走行あたりのハンドリムに加えられた仕事量の平均値 (以降, 1 m

平均仕事量と記す) を算出し, これらの関係について調べることにした.

4.2 実験結果

経路情報測定用電動車いすの傾斜角度別の 1 m 平均モータ駆動電力を図 6 に示す. 傾斜角 4.6 度のスロープを荷重 80 kg で移動したときの方が荷重 85 kg での移動時よりも高い電力が消費されている. これは, 測定時のアスファルト路面の凹凸が場所によって違いがあり, 走行時に電動車いすがより凹凸の大きな場所を走行していたためであると考えられる. それ以外は傾斜角度と荷重に比例した 1 m 平均モータ駆動電力の上昇が見られた. 1 m 平均モータ駆動電力を目的変数, 傾斜角度と荷重を説明変数として重回帰分析を行った結果, W_{motor} を 1 m 平均モータ駆動電力, $D_{gradient}$ を傾斜角度, $M_{E-wheelchair}$ を電動車いす搭乗者の荷重とすると, 式 (1) の関係が見られた ($R^2 = 0.936$, $P < 0.01$ で有意, 2 つの説明変数には多重共線性なし).

$$W_{motor} = 7.402 \times D_{gradient} + 0.613 \times M_{E-wheelchair} - 43.607 \quad (1)$$

次に, 図 7 に傾斜角度別のハンドリム駆動力測定用手

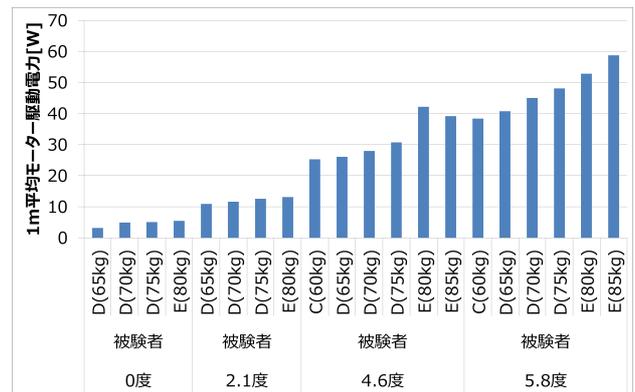


図 6 傾斜, 荷重別 1 m 平均モータ駆動電力

Fig. 6 Averages of electrical power of the motor per one meter run.

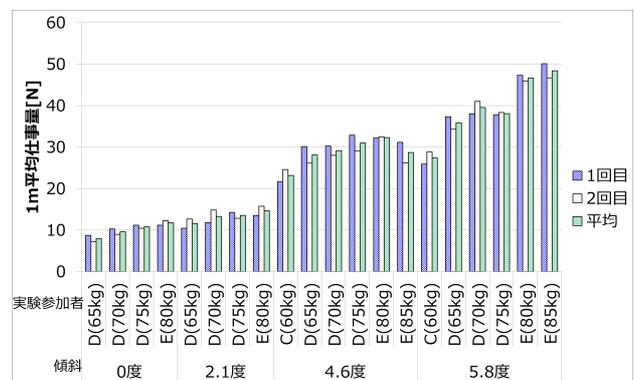


図 7 傾斜, 荷重別 1 m 平均仕事量

Fig. 7 Averages of torque loaded to the hand rim per one meter run.

動車いすについての1m平均仕事量を示す。1回目走行時と2回目走行時の1m平均仕事量の差は平均で約2.31N、最大で約4.97Nであり、有意な差は認められなかった ($t(19) = 2.09, p > 0.1$, t検定)。このことから、1m平均仕事量については1回目走行と2回目走行の測定結果については平均値を採用することとした。1m平均仕事量を目的変数、傾斜角度と荷重を説明変数として重回帰分析を行った結果、 N_{work} を1m平均仕事量、 $D_{gradient}$ を傾斜角度、 $M_{M-wheelchair}$ を手動車いす搭乗者の荷重とすると、式(2)の関係が見られた ($R^2 = 0.905, P < 0.01$ で有意、2つの説明変数には多重共線性なし)。

$$N_{Work} = 5.190 \times D_{gradient} + 0.445 \times M_{M-wheelchair} - 25.540 \quad (2)$$

4.3 モデルスロープを媒介にしたハンドリム駆動力推定

電動車いすの1m平均モータ駆動電力と手動車いすの1m平均仕事量は、傾斜角度と荷重について、それぞれ正の比例関係にあった。そこで、これらについての相関を調べた結果、高い正の相関関係 ($r = 0.926$) が見られた (図8)。しかしながら、図6、図7に見られるように1m平均モータ駆動電力と1m平均仕事量には、荷重によって増加する傾向があり、1m平均駆動電力から推定される1m平均仕事量は、経路情報測定用電動車いすと同じ体重の手動車いす使用者のみに適応可能である。経路情報測定用電動車いすの測定者と異なる体重の手動車いす使用者の必要とする1m平均仕事量を推定するためには、同じ路面を様々な体重の測定者が電動車いすで走行してモータ駆動電力を測定しておく必要があるのでは効率的ではない。そのために、経路情報測定用電動車いすで測定したモータ駆動電力を測定者の体重による影響を取り除いた形に変換したうえで蓄積することが望ましい。

経路情報測定用電動車いすの1m平均モータ駆動電力は、路面の傾斜角度と荷重によって増加する関係 (式(1))

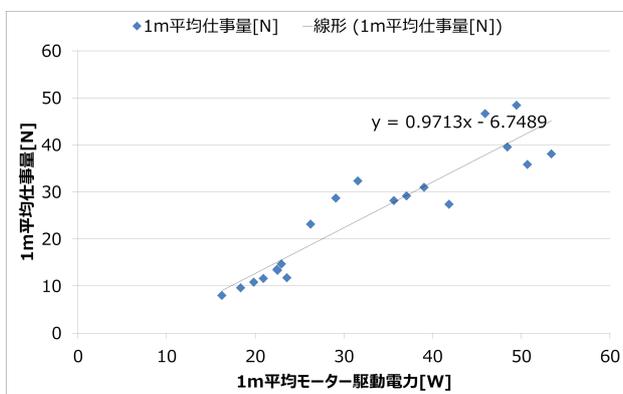


図8 1m平均モータ駆動電力と1m平均仕事量の散布図

Fig. 8 Scatter chart of electrical power of motor driving and torque loaded to the hand rim.

があった。このことから、路面の傾斜角度を荷重と1m平均モータ駆動電力から推定できると考えられる。傾斜角度を目的変数、荷重と1m平均モータ駆動電力を説明変数として重回帰分析を行った結果、 W_{motor} を1m平均モータ駆動電力、 $D_{gradient}$ を傾斜角度、 $M_{E-wheelchair}$ を電動車いす搭乗者の荷重とすると、式(3)の関係が見られた ($R^2 = 0.931, P < 0.01$ で有意、2つの説明変数には多重共線性なし)。

$$D_{gradient} = -0.077 \times M_{E-wheelchair} + 0.125 \times W_{motor} + 5.729 \quad (3)$$

式(3)によって求められる傾斜角度 ($D_{gradient}$) は、重回帰分析を行った実験データを測定したアスファルト路面の傾斜角度であり、異なる材質 (アスファルト路面以外) の路面を走行した際の1m平均モータ駆動電力から推定する傾斜角度もアスファルト路面の傾斜角度となる。このことから、様々な材質の路面を走行した際の荷重と1m平均モータ駆動電力からアスファルト路面の傾斜角度を推定することで、路面の走行のし難さをアスファルト路面の傾斜角度として表現できるのではないかと考えた。そこで、ある材質の路面 (以下、モデルスロープ) の傾斜角度を媒介に、異なる材質の路面の走行し難さを表す方法の考案を試みた (以降、モデルスロープの傾斜角度を基準傾斜角度と記す)。式(3)の $D_{gradient}$ (傾斜角度) を $D_{base-gradient}$ (基準傾斜角度) と置き換えると、基準傾斜角度 ($D_{base-gradient}$) は式(4)の回帰式によって求められる。さらに、式(2)の $D_{gradient}$ (傾斜角度) を $D_{base-gradient}$ (基準傾斜角度) に置き換えると、 N_{work} (1m平均仕事量) は式(5)によって求めることができる。

$$D_{base-gradient} = -0.077 \times M_{E-wheelchair} + 0.125 \times W_{motor} + 5.729 \quad (4)$$

$$N_{Work} = 5.190 \times D_{base-gradient} + 0.445 \times M_{M-wheelchair} - 25.540 \quad (5)$$

以上の関係をパス図で表すと図9のようになる。まず、経路情報測定用電動車いすで測定した1m平均モータ駆動電力と測定者の体重から、式(4)によって基準傾斜角度を

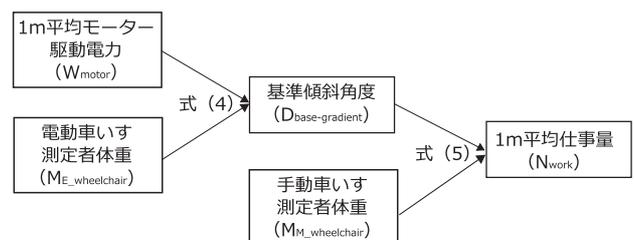


図9 1m平均仕事量推定の流れ

Fig. 9 Diagram of estimating the torque to move hand rim of manual wheelchair from the motor driving force of electric wheelchair.

推定する。そして、基準傾斜角度と手動車いす使用者の体重から、式(5)によって手動車いす使用者がその路面を走行する際に必要となる1m平均仕事量を推定する。

経路情報測定用電動車いすのモータ駆動電力は、同じ経路であっても測定者の体重によって異なる値をとる。これを基準傾斜角度に変換することで、電動車いす搭乗者の体重によらない値として路面の走行のし難さを評価することが可能となる。そして、基準傾斜角度を用いることで、任意の体重の手動車いす使用者の1m平均仕事量を推定することができる。このように、基準傾斜角度によって路面の走行し難さを表すことで、1人の測定者によって測定した1つの基準傾斜角度から、任意の体重の手動車いす使用者の1m平均仕事量を見積もることが可能となる。手動車いす使用者向けの経路探索に問題のない精度で基準傾斜角度の推定を行うことができれば、路面の勾配、路面の材質、路面の凹凸などの走行の際に抵抗となりうる要因を網羅的に測定しなくても、経路情報測定用電動車いすのモータ駆動電力と測定者の体重のみで、経路を走行する際に必要な力量を見積もることができると考えられる。

4.4 モータ駆動電力のハンドリム駆動力換算精度検証実験

測定者と異なる体重の手動車いす使用者が走行する際に必要とするハンドリム駆動力を推定できるかの検証を行う目的で、4.1節の実験とは異なる路面で経路情報測定用電動車いすとハンドリム駆動力測定用手動車いすによる測定を行った。測定は傾斜角約0度の屋内の廊下、傾斜角約2.7度と傾斜角約4.6度のアスファルト路面、傾斜角約5.2度のタイル面のスロープ（途中に1m程度の傾斜角約1.2度の踊り場2カ所を含む）の4カ所で行った。図10に1m平均仕事量の実測値と推定値（式(4)、式(5)による）を示す。実測値と推定値との誤差は平均で約2.42N（約10.63%）、最大で約4.79N（約43.45%）であった。

4.5 考察

図10に示した実験結果における最大の誤差となったの

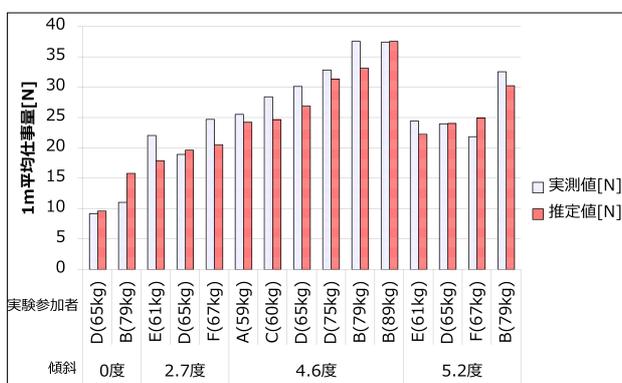


図10 基準傾斜角度を用いた1m平均仕事量推定結果

Fig. 10 Results of estimating the torque loaded to the hand rim of manual wheelchair.

は、実験参加者B(79kg)による傾斜角0度の屋内廊下走行時の結果であり、その実測値と推定値の差は約4.79N（相対では約43.45%）であった。4.1節の実験では、1m平均仕事量の1回目走行と2回目走行の1m平均仕事量の差は最大で約4.97Nであり、有意な差はなかった。このことから、絶対誤差で見た場合には最大で約4.79Nの誤差は許容できる範囲のものであると考えられる。しかし、相対誤差では最大で約43.45%の差があり、この誤差は許容できる範囲を超えていると考えられる。この原因としては、回帰式による推定を行った点にあると考えられる。本研究では実測データをもとに回帰式を作成し、それを用いて推定を行った。そのために、未知要因からの誤差が予測される。より誤差の少ない推定を行うには、十分な距離を持った（本研究では10m以上）モデルスロープを作成し、傾斜ごとに体重の異なる複数の実験参加者による測定を行い、十分なデータを揃えて換算表を作成する必要があると考えられる。

実験の結果より、体重の異なる複数の測定者によって測定されたモータ駆動電力をもとに基準傾斜角度を推定すれば、基準傾斜角度と手動車いす使用者の体重によってその人に見合った必要ハンドリム駆動力を推定できると考えられる。4.3節で述べたように、1m平均モータ駆動電力と1m平均仕事量は搭乗者の体重によって異なる値となる。これに対して、基準傾斜角度は1カ所の経路に対して1つの値となり、1つの基準傾斜角度から任意の体重の手動車いす使用者の1m平均仕事量を推定できる。このことから、基準傾斜角度を車いすバリアフリーデータベースに蓄積しておくことで、手動車いす使用者の力量にともなった経路を選択できると考えられる。また、式(5)より、基準傾斜角度が大きい場所は大きなハンドリム駆動力を必要とすることから、基準傾斜角度を蓄積した車いすバリアフリーデータベースによる経路探索を行う際には、ハンドリム駆動力を推定するのではなく、蓄積されている基準傾斜角度を利用した探索も考えられる。

5. 基準傾斜角度を利用した手動車いす使用者向け経路探索

5.1 測定データのグラフ構造への変換

任意の出発地点から目的地までの経路を求める場合、目的地までの最短距離や最短移動時間を求める最短経路探索が最も一般的な方法である。最短経路を探索するアルゴリズムとしては、Dijkstra法やA*探索などがある。手動車いす使用者向けの経路探索や経路案内システムについての関連研究においても、Dijkstra法を基本としたアルゴリズムが使われている[6]。基準傾斜角度を利用した経路探索を行う場合は、基準傾斜角度（および経路情報測定用車いすによって測定した経路情報）をコストとしてDijkstra法による実装が可能であると考えられる。Dijkstra法による最

短経路探索で用いられるデータ構造は、ノード集合とエッジ集合から構成されるグラフ構造である。基準傾斜角度を利用した経路探索を実現するためには、測定したデータを道路に関する情報を持つグラフ構造に変換すればよいと考えられる。経路情報測定用電動車いすでは、一定時間ごとに走行した路面上の情報を測定し記録している(2章)。これを手動車いす使用者向けの経路探索で利用するためには、データの測定地点をノード、ノードどうしの隣接関係をエッジ、基準傾斜角度をコストとした有向グラフに変換する必要がある。電動車いすを利用して一定時間ごとに記録した路面情報をグラフ構造に変換し、それをDijkstra法に適用する方法については参考文献[17]に示されている。この方法では、測定データからノード集合とエッジ集合を生成し、複数の測定データを1つのグラフへ変換することで、測定データをDijkstra法による経路探索に利用可能な形式に変換することができる。

この手法を基準傾斜角度利用のものに書き換えると、図11と図12に示すようなアルゴリズムとなる。ここで、測定データの集合(ListD)は1回の測定によって記録されたデータであり、時系列上で連続しているデータとする。また、処理はノード集合生成、エッジ集合生成の順に行い、エッジ集合生成時のノード集合は、図10の処理によって生成されたノード集合とする。ノード集合の生成では、地図上の位置が近いノードは同一のノードと見なし、一定範囲のノードをまとめることでノード数の節約を行う。ノードをまとめる範囲については、位置情報取得の精度によって変わるが、3m程度を想定している。エッジ集合の生成では、図11の処理によってまとめられたノードに対してエッジを生成する。各エッジにかかるコストは電動車いすの走行距離が3mを超えるごとに1m平均モータ駆動電力を算出し、これと測定時の電動車いすの搭乗者の体重によって基準傾斜角度を推定し、ノード間の最大の基準傾斜角度をコストとして記録すればよいと考えられる。

基準傾斜角度による経路探索の方法の1つとして、出発地点から目的地点までの複数の経路の中から、基準傾斜角度(あるいは基準傾斜角度を基に推定した1m平均仕事量)の総和が最も小さい経路を提示する方法が考えられる。ただし、基準傾斜角度の総和が小さい経路であっても、その経路の途中で走行不可能な場所があった場合には、そこを迂回する経路を選択する必要がある。走行不可能な場所が存在した場合にその経路を迂回した経路を提示するためには、手動車いす使用者が走行可能な基準傾斜角度を超える場所についてのコストを無限大(システム上の最大値)に設定すればよいと考えられる。そのためには、経路探索システムに手動車いす使用者が走行可能な基準傾斜角度の最大値(以降、走行可能基準傾斜角度と記す)を設定しておく必要がある。

```
ListN : 既存のノード集合
ListD : 測定データの集合
d : 測定データセット
n : ノード (ノード番号, 緯度, 経度, 方位)

for each d ∈ ListD
  | pos ← d の測定地点の位置情報(緯度, 経度, 方位)
  | for each n ∈ ListN
  | | if (pos と n 間の距離がXm以内 AND pos と n の方位が一致) begin
  | | | 処理なし(既存のノードと同一ノードと判断)
  | | | end
  | | else begin
  | | | ListN add pos (nを新規ノードとしてノード集合に追加)
  | | | end
  | | end
end
```

図 11 ノード集合生成アルゴリズム
Fig. 11 Algorithm of node-set creation.

```
ListN : 既存のノード集合
ListD : 測定データの集合
d : 測定データセット
n : ノード (ノード番号, 緯度, 経度, 方位)

old_node ← NULL
for each d ∈ ListD
  | pos ← d の測定地点の位置情報(緯度, 経度, 方位)
  | if (cost < 基準傾斜角度) begin
  | | cost ← 基準傾斜角度(式(4)によって算出)
  | | end
  | | n ← search_nearest(pos)
  | | if (n != old_node AND !search_edge(old_node,n) ) begin
  | | | add_edge(old_node,n)
  | | | cost ← 0
  | | | end
  | | else if (cost > old_nodeからn へのエッジのコスト)begin
  | | | old_nodeからn へのエッジのコストを更新
  | | | end
  | | old_node = node
  | end
End

search_nearest(pos) : ListN中のposと最も近いノードを求める関数.
search_edge(old_node,n) : old_nodeからn となるエッジが
                        存在するかを調べる関数.
add_edge(old_node,n) : old_node から n となるエッジを生成し,
                        ListNに加える関数.
```

図 12 エッジ集合生成アルゴリズム
Fig. 12 Algorithm of edge-set creation.

5.2 走行可能基準傾斜角度の設定

走行可能基準傾斜角度の設定については、平均的な体力を持つ手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用する方法、最も低い体力の手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用する方法、個々の手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度をあらかじめ測定し、それを適用する方法が考えられる。平均的な体力を持つ手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用する方法では、平均以下の体力の手動車いす使用者の経路探索に対応できない。最も低い体力の手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用する方法では、どの手動車いす使用者に対しても走行可能な経路の提示が可能となるが、提示可能な経路が最も低い体力の手動車いす使用者が走行可能な経路に制限される。このようなことから、我々は、個々の手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度をあらかじめ測定し、それを走行可能基準傾斜角度として適用する方法が望ましいと考えている。走行不可能な場所としては、急なスロープなどの瞬間

的に大きな力を必要とする場所、緩やかだが長いスロープなどの持続的な力を必要とする場所の2つが考えられる。この2つについて、異なる基準傾斜角度のスロープを走行させ、その人が余裕を持って走行できるスロープの基準傾斜角度を記録しておき、これを走行可能基準傾斜角度とすることを構想している。走行可能基準傾斜角度の測定を行っていない手動車いす使用者については、先に述べた平均的な体力を持つ手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用した場合と、最も低い体力の手動車いす使用者の走行可能基準傾斜角度を適用した場合、など複数の経路を提示し、経路探索を行いたい手動車いす使用者に選択させることを考えている。

5.3 電動車いす使用者向けの経路探索への応用

式(4)では、基準傾斜角度 ($D_{base-gradient}$) を電動車いす搭乗者の荷重 ($M_{E-wheelchair}$) と1m平均モータ駆動電力 (W_{motor}) から推定した。このことから、基準傾斜角度を電動車いす搭乗者の荷重と1m平均モータ駆動電力から推定できると考えられる。1m平均モータ駆動電力 (W_{motor}) を目的変数、電動車いす搭乗者の荷重 ($M_{E-wheelchair}$) と基準傾斜角度 ($D_{base-gradient}$) を説明変数としたとき、1m平均モータ駆動電力は式(6)の回帰式によって推定できる ($R^2 = 0.936$, $P < 0.01$ で有意, 2つの説明変数には多重共線性なし)。これを利用することで、目的地まで移動するのに必要なモータ駆動電力を推定し、電動車いすのバッテリー残量がなくなる前に目的地に到達できるかを調べることで、電動車いすのバッテリー残量にかかわるナビゲーションにも応用できると考えられる。

$$W_{motor} = 7.401 \times D_{base-gradient} + 0.614 \times M_{E-wheelchair} - 43.696 \quad (6)$$

6. おわりに

手動車いす使用者向け経路探索システムにおけるバリアフリーデータベースには、手動車いすの移動に必要な力量を定量的に判断できる情報が必要である。これを効率的に測定、収集することを目的とし、電動車いすが移動時に必要としたモータ駆動電力から手動車いすの移動に必要な力量を推定する方法について研究を行った。

手動車いす使用者のハンドリム駆動力を測定するために、ハンドリム駆動力測定用手動車いすを開発し、モータ駆動電力との校正実験を行った。その結果から、電動車いすのモータ駆動電力と測定者の体重によって、同等のモータ駆動電力を必要とするモデルスロープの傾斜角度(基準傾斜角度)を推定する方法を考案した。また、基準傾斜角度を車いすバリアフリーデータベースに蓄積しておくことで、基準傾斜角度と経路探索を行いたい手動車いす使用者の体重から、ハンドリムにかかる仕事量を許容範囲内の誤

差で推定できることを示すことができた。これにより、基準傾斜角度を車いすバリアフリーデータベースに蓄積することで、経路探索を行いたい手動車いす使用者や電動車いす使用者の体重や体力に合わせた経路の提示が可能になると考えられる。

今後の課題は、(1) 実際に経路情報測定用電動車いすで測定したモータ駆動電力を基準傾斜角度に変換し、それを基に車いすバリアフリーデータベースを構築すること、(2) 手動車いす使用者の走行可能な基準傾斜角度の測定方法を開発し、測定実験を実施すること、(3) その結果をもとに、手動車いす使用者個人に合わせた経路の提示を行える経路探索システムを開発することである。

参考文献

- [1] 内閣府：平成23年版高齢社会白書 (online), 入手先 <<http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2011/zenbun/23pdf.index.html>> (参照 2012-10-16).
- [2] 国土交通省：高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律 (online), 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/barrierfree/transport-bf/shinpou/jyoubun.html>> (参照 2012-10-16).
- [3] 国土交通省：報道発表資料 市町村バリアフリー基本構想の作成状況に関する調査結果 (online), 入手先 <http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo09_hh_000033.html> (参照 2012-10-16).
- [4] 浅賀忠義, 黒澤和隆：肢体不自由者の外出行動に関する影響要因について, 北海道大学医療技術短期大学紀要, No.7, pp.1-10 (1994).
- [5] Kasemsuppakorn, P. and Karimi, A.A.: Data Requirements and a Spatial Database for Personalized Wheelchair Navigation, *Proc. 2nd International Conference on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology*, pp.31-34 (2008).
- [6] Kasemsuppakorn, P. and Karimi, A.A.: Personalised Routing for Wheelchair Navigation, *Journal of Location Based Services*, Vol.3, No.1, pp.24-54 (2009).
- [7] 岡本耕平, 奥貫圭一, 森田匡俊：ハンディキャップを考慮した経路情報提供の試み, 名古屋大学文学部研究紀要, Vol.50, pp.71-84 (2004).
- [8] 山本浩司, 安村禎明, 片上大輔ほか：ユーザの投稿情報に基づく経路ナビゲーション, *The 18th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, pp.1-4 (2004).
- [9] 株式会社インコムジャパン：車椅子利用時のバリア情報測定装置及び経路のバリア情報収集システム, 特開 2010-94223 (2008).
- [10] 株式会社朋栄：車椅子ナビゲーション用データベース構築システム, 特開 2001-101236 (2001).
- [11] Sumida, Y., Goshi, K. and Matsunaga, K.: Data Collection System for the Navigation of Wheelchair Users: A Preliminary Report, *Proc. International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA 2010)*, Part 3, pp.552-563 (2010).
- [12] 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, 13年度春期研究発表講演会講演論文集, pp.103-106 (2001).
- [13] 橋詰 努, 島村雅徳, 米田郁夫：車いす駆動トルクと酸素消費量による車いす走行効率の考察, 福祉工学シンポジウム講演論文集 2006, pp.15-16 (2006).
- [14] 市田 登, 内田公一, 稲吉 淳ほか：車いすによる斜路

移動の筋負担による評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2007 年, E-1 分冊, pp.883-884 (2007).

- [15] 谷内久美子, 猪井博登, 新田保次: 身体障害者の身体能力と移動支援施策の選択に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.29, No.4, pp.759-766 (2007).
- [16] 共和電業: 計測メモ (online), 入手先 (<http://www.kyowa-ei.co.jp/support/technical/technical.notes>) (参照 2012-10-16).
- [17] Sumida, Y., Goshi, K. and Matsunaga, K.: Development of a Route Finding System for Manual Wheelchair Users Based on Actual Measurement Data, *Proc. 9th IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC2012)*, pp.17-23 (2012).



隅田 康明 (学生会員)

2011 年九州産業大学大学院情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程修了。現在, 九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程に在学中。日本靴医学会, 日本自動車技術会各会員。



林 政喜 (正会員)

2008 年九州産業大学大学院情報科学研究科情報科学専攻博士前期課程修了。2011 年九州産業大学大学院情報科学研究科博士後期課程単位取得退学。現在, 九州産業大学情報科学部助手。日本靴医学会, 日本自動車技術会各会員。

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) にて在外研究。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。日本自動車技術会, 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。



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) 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, 電子情報通信学会, 日本交通心理学会, 日本自動車技術会, 日本心理学会各会員。2011 年度まで情報処理学会会員。