

プローブ自転車による自転車歩行者道のバリア調査法*

Investigation of Barrier on Bicycle-Pedestrian Track with Probe Bicycle*

斎藤健治**・清田 勝***

By Kenji SAITOU**・Masaru KIYOTA***

1. はじめに

現在の日本における歩行環境や自転車走行環境は、段差、劣化した舗装、狭い幅員、車優先のすりつけ勾配や必要以上の排水のための横断勾配などに見られるように、自動車走行環境に比べ貧弱であるだけでなく、危険すら感じられる。このような現状にもかかわらず、これからの高齢社会において、移動手段として徒歩（車いすを含む）、あるいは自転車を選択する高齢者が増加することは容易に想像されるところである¹⁾。さらに、環境・健康問題²⁾、コンパクトシティなどのまちづくりの観点から、歩道や自転車歩行者道の整備は、今後、車道整備以上に重要課題として捉えられるべき喫緊の課題といえる。

高齢社会を見据えて、自転車道を整備するに当たっては、高齢者がどのように自転車走行するか³⁾、あるいは高齢者の走行が段差・勾配にどのような影響を受けるか⁴⁾を調査することにより、整備のための評価や判断の基準を設定することが可能になる。一方で、自転車歩行者道を継続的に整備していくためには、必要に応じて現状を調査することが重要であり、そのためには、できるだけ人手を必要としない計測技術やIT技術を用いた総合的なシステム作りが課題となる。つまり、労力をできるだけかけず、迅速に情報を収集し、その結果や整備結果を管理するために、データベース化し、GIS（地理情報システム）により、バリアフリーマップやアクセシビリティマップなどの形で情報を公開することが必要である。

そこで本研究では、計測技術の段階であるが、自転車歩行者道の状況（バリア）を調査するプローブ自転車を開発し、実際の歩道や自転車歩行者道の調査への適用可能性を探ることが目的である。

2. プローブ自転車

市販の三輪自転車にセンサを装着してプローブ自転車とした（写真-1）。

装着したセンサは、ハンドルのふれ角を計測する単回転式のポテンショメータ（Copal 社製、JC22E）、段差や路面凹凸を通過したときに生じる振動加速度を計測する2軸の加速度センサ（Analog Devices 社製、ADXL210）、走行スピードを計測する磁気センサ（CATEYE 社製、CC-VL100）、歩道の縦断勾配と横断勾配を計測する2軸の加速度センサ（Analog Devices 社製、ADXL202）および角速度を計測する2個のジャイロセンサ（村田製作所社製、ENC-03JA）であった。

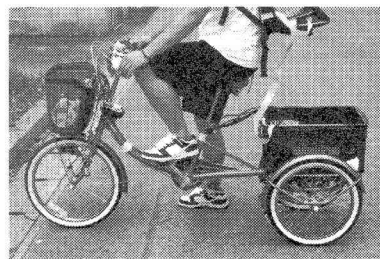


写真-1 プローブ自転車

ポテンショメータは、ハンドルステム下のフレームに装着し、ハンドルの回転にともなうステムの回転を検出した（写真-2）。段差通過時の振動加速度を計測する加速度センサは、ポテンショメータと同じ位置に、2軸の感度方向を鉛直方向と前後方向に合わせて装着した（写真-2）。

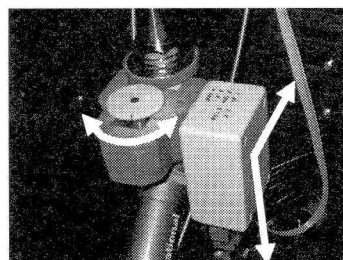


写真-2 ハンドルふれ計測用のポテンショメータと振動加速度計測用の加速度センサのボックス

* キーワーズ：地域計画，市街地整備，測量

** 正員 博士（体育科学）佐賀大学理工学部都市工学科
（〒840-8502 佐賀市本庄町1, TEL: 0952-28-8573,
FAX: 0952-28-8190, E-mail: saiken@cc.saga-u.ac.jp）

*** 正員 工博 佐賀大学理工学部都市工学科
（〒840-8502 佐賀市本庄町1, TEL: 0952-28-8953,
FAX: 0952-28-8190, E-mail: kiyotam@cc.saga-u.ac.jp）

縦断と横断両方向の勾配を計測する加速度センサ、および角速度を計測するジャイロセンサは、後部荷台に装着した。加速度センサの2軸の感度方向は前後左右で、荷台が水平の時に0Gになるように装着し、ピッチ角、ロール角を計測する傾斜センサとして用いた。ジャイロセンサは後部荷台の動的な傾斜変化を検出するために、ロールとピッチの角速度を計測できるように装着した(写真-3)。

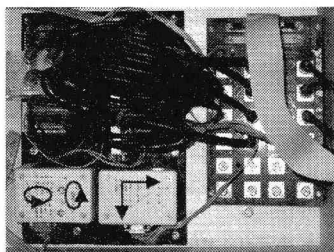


写真-3 勾配計測用の加速度センサと角速度計測用のジャイロセンサのボックス

計測した信号は、長さ15秒、精度12bit、周波数500Hzでサンプルし、運転手の背中に背負ったノートブック型パーソナルコンピュータ(東芝社製、Libretto L3)に取り込んだ。

3. 段差計測

段差通過時の加速度から段差を推定するために、走行スピード、段差高と加速度との関係を調べた。変数間の関係を線型モデルで近似し、段差通過時のスピードと加速度から段差高を推定した。

(1) 方法

舗装された実験走行路上に木製の板を重ねた段差を設置し、その上をプローブ自転車で通過した。段差の高さは10, 20, 30, 40および50mmの5種類で、同一段差において5回の試技を行った。自転車の走行スピードは、5回の試技において8~16 km/hの範囲で5段階のスピードとなるよう主観で走り分けてもらった。タイヤ空気圧は3.5 kg/cm²とした(3.0および4.0 kg/cm²においても計測を行ったが、空気圧の明確な影響は認められなかった)。

段差通過時にハンドルシステム下で計測した振動加速度を用いて、段差高を推定するために、次のような線型モデル(重回帰モデル)をたてた。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + b \quad (1)$$

ここでyは段差高(mm)、 x_1 は(合成の)振動加速度(G)、 x_2 は走行スピード(km/h)、 a_1 、 a_2 、 b は定数である。

(2) 結果

図-1に2軸の加速度センサにより計測した、上下方向と前後方向の加速度波形の一例を示す。これは、高さ20mmの段差を14~15 km/hのスピードで通過(上り下り)したときの加速度波形である。最初の正のピークが、プローブ自転車の前輪の登段時、2つ目の負のピークが降段時である。

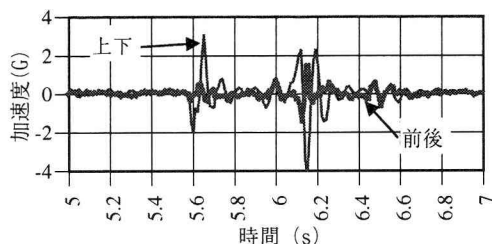


図-1 段差通過時の上下、前後方向加速度の波形例

予備実験の結果、段差通過時に生じる振動加速度は、この2軸の成分がほとんどであることが確認され、3軸目の左右方向の加速度は必要ないと判断された。

上記2軸の加速度を合成した合成加速度波形のピーク値を重回帰モデル式(1)の x_1 とした。さらに、段差通過時の走行スピードを重回帰モデルの x_2 とし、全25試技の計測結果から、

$$y = 8.547x_1 - 0.479x_2 - 2.068 \quad (2)$$

というモデルが決定された。(2)式を用いることにより、走行中に計測される振動加速度と走行スピードから、段差高が推定できた(図-2)。

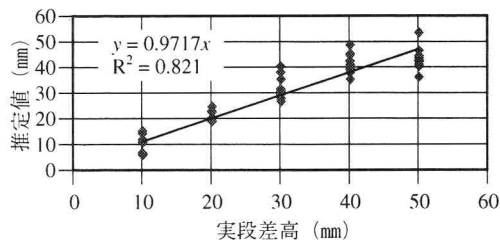


図-2 重回帰モデルによる推定結果

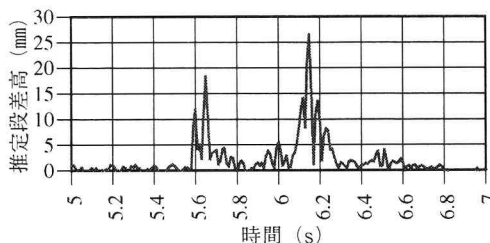


図-3 重回帰モデルによる段差推定例

図-3に、図-1に示した加速度と走行スピードから、(2)式により求めた推定段差高の時系列波形を示す。登段時については実際値に近い推定値が得られたが、降段時は6mm程度高く推定された。また、加速度波形にそのままモデルを当てはめるため、ピーク周辺にゴースト様の波形も現れているが、段差の有無は、時系列波形から明確に判断できるといえる。

4. 幅員計測

スラローム走行時のハンドルふれ角と走行スピードから走行軌跡を求め、その軌跡幅から幅員を推定した。

(1) 方法

実験走行路上に幅員を示す白線を引き、前輪がその白線に触れるようにスラローム走行を行った。幅員の条件は、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1、1.5 および 2 m の 8 種類であった。走行路の幅員を示す線の外側に、5 m 間隔でパイロンを設置し、走行の目安とした。

走行軌跡は、時間 t の関数としてのハンドルの振れ角 $\theta(t)$ と走行スピード $S(t)$ から求められる。任意の時刻 t_α における自転車の位置座標（進行方向座標，ふれ方向座標）は、

$$\left(\int_0^{t_\alpha} S(t) \cos \theta(t) dt, \int_0^{t_\alpha} S(t) \sin \theta(t) dt \right) \quad (3)$$

となる³⁾。

(2) 結果

図-4～6に、幅員 0.5 m、1 m、および 2 m の走行路をスラローム走行したときの、ハンドルふれ角と走行スピードから(3)式を用いて求めた走行軌跡を示す。ここでは軌跡の最大幅をもって幅員とした。図-4～6に示されているように、実際の幅員を再現することはできなかった。それは、ここに示していない幅員においても同様であり、最大で約 40% の誤差が生じたケースがあった。

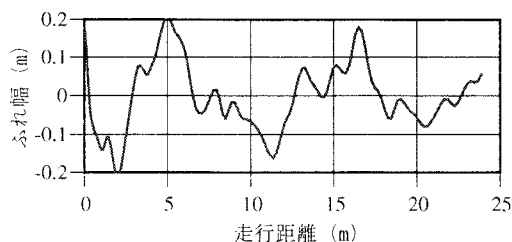


図-4 幅員 0.5 m のスラローム走行結果

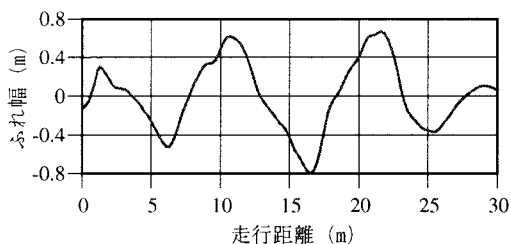


図-5 幅員 1.0 m のスラローム走行結果

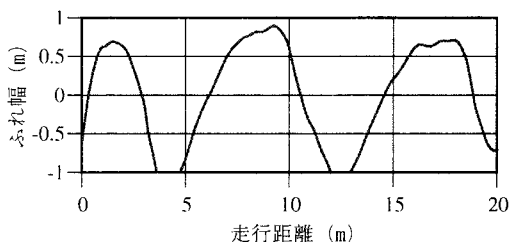


図-6 幅員 2.0 m のスラローム走行結果

5. 勾配計測

勾配推定には、傾斜そのものを計測する手法と、角速度を計測して積分する手法がある。ここでは、加速度センサを傾斜センサとして用い、勾配を計測した。さらに、勾配変化による自転車体のローリングとピッチングの角速度を、ジャイロセンサを用いて計測した。ジャイロセンサは、走行にともなう直進加速度の影響がなく、角速度を積分することで勾配を求めることができる。

(1) 方法

縦断勾配 6～8% 程度の既設スロープ（陸橋）と波打ち歩道の実走行を行い、加速度と角速度の計測を行った。加速度センサの出力には、重力加速度以外に、直線加速度、回転運動にともなう遠心加速度、振動による加速度などが含まれるため、これらを除去しなければ、勾配の影響による重力成分を抽出することができない。そこで本研究では、カルマンフィルタと平滑化アルゴリズムにより、振動的な波形から勾配の影響によるトレンドの抽出を行った。得られた加速度のトレンドから勾配 $grad$ (%) を求めた。

$$grad = \tan(\sin^{-1}(accel)) \times 100 \quad (4)$$

ジャイロセンサにより計測した角速度波形にも振動の影響が含まれており、同様に平滑化によりトレンドを求めた。

(2) 結果

図-7 にスロープを登坂したときの加速度波形と平滑化により求めたトレンド波形を示す。データ収集のための走行開始直後に走行開始にともなう加速度の影響を受けて、推定値に誤差を生じた。走行スピードが安定した後は、実勾配に近い推定値を得ることができた。図-8 に、同一の場所で計測した角速度波形（ピッチ）と平滑化により求めたトレンド波形を示す。ほとんど勾配変化のない場所であるため、ピッチ、ロールともに角速度は計測されないはずであるが、振動の影響により、偽の角速度波形が認められた。しかし、同様にトレンド推定することにより、振動の影響を除去することができ、角速度から推定される勾配はほぼ0%であった。

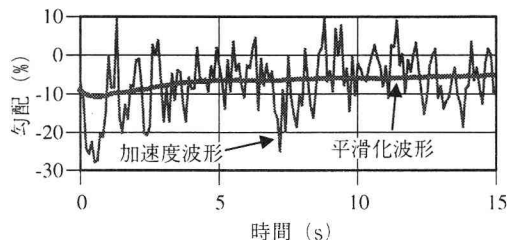


図-7 スロープを登坂したときの加速度波形と平滑化波形

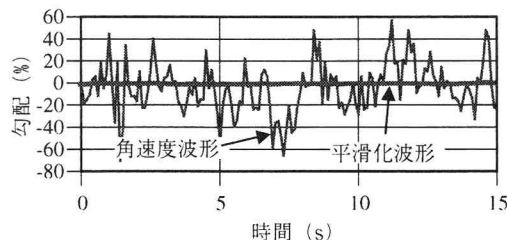


図-8 スロープを登坂したときの角速度波形と平滑化波形

図-9 と図-10 に波打ち歩道（下り縦断勾配 9%，登り縦断勾配 11%，下りから登りまでの横断勾配 8～10%）を、比較的ゆっくり（時速 8 km/h 程度）で走行したときの加速度の平滑化波形と平滑化した角速度（それぞれピッチとロール）の積分波形である。縦断、横断ともに加速度センサにより推定した勾配は、実勾配に近いものであった。

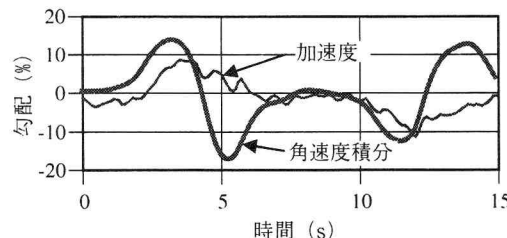


図-9 勾配に換算した、波打ち歩道を走行したときの加速度と角速度積分値の平滑化波形（縦断勾配）

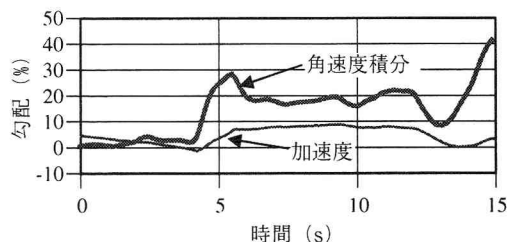


図-10 勾配に換算した、波打ち歩道を走行したときの加速度と角速度積分値の平滑化波形（横断勾配）

それに対し、角速度積分値では、勾配を検出した直後（図-9 では、5 秒前後と 14 秒前後）にゴースト波形が現れており、推定を混乱させている。横断勾配の推定においても同様である。しかしながら、よりハイスピードで走行した場合には、加速度センサへの振動の影響や、加速・減速時の影響を除去することが困難になることも考えられ、ジャイロセンサの出力を信号処理する工夫が望まれる。

6. 調査例

以上の手法を用いて、プローブ自転車により歩道、自転車歩行者道の調査を行った。プローブ自転車に GPS（EMPEX 社製、ポケナビ map2lex）を装着し、調査ルート上の緯度経度データを一旦 GPS のメモリ媒体に記録した。その後、オフラインで各センサとの同期をとった。各センサの出力は長さ 60 秒、精度 12 ビット、周波数 500 Hz でサンプリングし、ノートブック型コンピュータに取り込んだ。

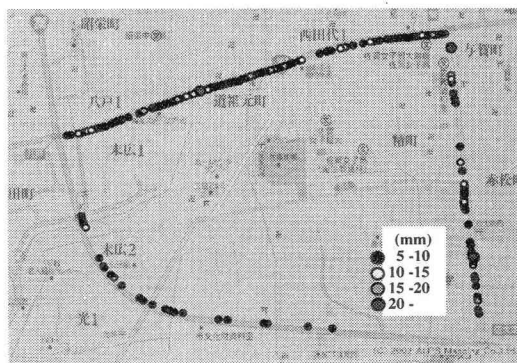


図-11 プローブ自転車により計測した加速度から推定した段差の分布

図-11 は段差の推定結果を GIS 上に重ね合わせた例を示している。図に示す調査範囲は、佐賀大学周辺道路の歩道あるいは自転車歩行者道である。段差、幅員ともに高さや幅毎に色分けし、状態を可視化した。

このように、単純にセンサにより得られた時系列データを地図上に重ね合わせることができるが、作業の

簡便さや見やすさという点で、GIS 側の工夫が必要になる。

7. 考察

歩道、自転車歩行者道の整備状況に関する情報を、走行しながら収集するプローブ自転車を開発した。プローブ自転車には、磁気センサ、加速度センサ、ポテンショメータ、ジャイロセンサを搭載し、段差、幅員、勾配を計測、推定するシステムとした。

段差の高さ推定では、段差の境界形状が一定という条件下で実用に耐えうる推定結果が得られた。しかし、実際の歩道等には種々の形状の段差がみられ、これら段差形状の違いを含めて推定するためには、モデルの変数を増やす必要があるだろう。例えば、振動加速度波形の瞬時周波数情報を利用することが一つの方法であると考えられる。また、実際の利用においては、ある閾値を設定し、それ以上であれば歩行、車いす走行、自転車走行に対するバリアとして表現する方法が簡便で有効であると考えられる。

また、加速度センサの出力から段差高が推定できるだけでなく、舗装の優劣、インターロッキングの目地間隔などの情報を抽出することもできる⁵⁾。このような路面の情報は、詳細な物理的数値として表現するだけでなく、段差情報とともに、生の加速度データを総合的に評価することにより、走行の快適性として表現することも有効である。逆に、振動に現れにくい情報、すなわち雨天時における滑りやすさ等も重要な情報であり、今後、計測、推定する手法の確立が必要になるだろう。

幅員の推定では、誤差の絶対値は実幅員の大小に関係なく、大きい場合で 0.2~0.4 m であった。そして、幅員が小さいほど相対的に誤差が大きくなる傾向にあった。本研究におけるこのような誤差は、スラローム走行技術に関するヒューマンエラーが大きな原因として考えられ、その意味において本手法は計測・推定手法として必ずしも望ましくない。今後、計測手法の見直しも視野に入れて、精度向上を図る必要がある。しかし、実用上、精度は 0.1 m 単位でも十分すぎると考えられ、さらに公開のためのマップ表示を想定した場合、0.5 m 単位程度に丸めた値でも十分であると考えられる。

勾配の推定では、振動や直進加速度などの影響を受ける加速度波形と角速度波形を、カルマンフィルタにより平滑化し、ノイズを除去してトレンドを抽出した。加速度波形においては、DC に近い低周波成分が重力加速度分に相当するという考えによった。トレンドから推定した勾配は、自転車の大きな加減速がない場合や、上下動が少ない場合に有効であった。しかし、例えば、歩道を横切る自動車用のすりつけ勾配が設けられるこ

とによってできる波打ち状の歩道では、その勾配の変化が激しいため、プローブ自転車により計測する加速度への影響が大きく、平滑化の効果が適切に発揮されない場合もある。このような場合には、ジャイロセンサの情報を副次的に利用することが有効であると考えられる。本研究では、ジャイロセンサにより得られた角速度から積分した角度データに、ドリフト様のゴースト波形が認められており、今後、この問題の解決が勾配推定精度向上の鍵になるといえる。

歩道を中心とした道路空間は、実態として管理が行き届いていないだけに⁶⁾、高齢化の進展を見据えた歩道等のバリアフリー化は喫緊の課題である。しかしながら、歩車道境界に見られる段差、景観を意識した種々の舗装材、車の出入りのための勾配、幅員に関わるさまざまな障害物等は、転倒などを誘発する、交通弱者に重くのしかかるバリアであることを現実として社会全体が実感しているとはいいい難い。それは、社会の大半が自動車依存で、交通強者にまわっていることに本質的な原因があると思われる。このような背景のもと、交通弱者の視点で、持続可能なコンパクトなまちづくりの方向性を示唆することは、土木計画学の使命であるともいえる。プローブ自転車システムは、そのための有効な一手段と考えられる。すなわち、プローブ自転車を利用することで、より広範囲の多角的な情報を短時間に収集することができ、それら情報を整理することで、見過ごされやすい、問題点を浮き彫りにすることができる。

現段階では、プローブ自転車による調査の対象を歩道、自転車歩行者道の段差、幅員および勾配に絞っているが、段差、勾配は、その物理量がバリアの程度と直結しやすいのに対し、幅員は性質が異なる。実際の歩道上には、電柱、看板、植栽等の存在だけでなく、乗り上げ駐車、放置駐輪、歩行者、自転車との錯綜がある。そして、同一箇所においても、有効幅員が変動するという側面を持ち合わせている。つまり、バリアの要素として幅員を見る場合、幅員という構造的問題以外に、機能上の複合的な問題が潜在しており、それらも常に視野に入れておく必要がある。そして、前述のように、幅員計測の手法改善の余地もあるが、このような、複合的問題を抱える実態の情報を入手するためには、今後、画像分析手法や超音波センサ計測法などを検討する必要があるだろう。

現在、センサの出力は A/D コンバータを介してコンピュータに直接記録しているが、記録媒体の容量の都合上、長時間、大容量データの記録は困難である。したがって、実利用に際しては、大容量のデータレコーダの利用、あるいは、携帯電話等の IT 機器を用いて、直接サーバへデータを伝送する方法も検討課題となる。さらに、GPS データのセンサ出力との完全同期化、デ

データベースの構築, GIS における可視化を自動的に行うシステム構築など, 今後の課題となる。

謝辞

本研究は, 平成 14 年度佐賀大学低平地研究プロジェクトの助成および平成 15 年度ユニバーサル財団研究助成による研究の一部である。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京都生活文化局 消費生活部生活安全課商品安全係: 高齢者の事故防止マニュアル, 2002.
- 2) 斎藤健治, 清田 勝: 自転車利用の視点から見た持
- 続可能な共生社会における環境, 社会福祉・健康, 教育, Human Interface, 6(1), pp.1-8, 2004.
- 3) 斎藤健治, 井上伸一, 細谷 聡, 清田 勝: ハンドルと車体のふれからみた高齢者の自転車操作の特徴, 人間工学, Vol. 39-5, pp.241-249, 2003.
- 4) 斎藤健治, 井上伸一, 細谷 聡, 清田 勝: 自転車歩行者道の勾配と段差が高齢者の自転車操作に及ぼす影響, 人間工学, Vol. 41-1, pp.36-39, 2005.
- 5) 白川龍生, 川村 彰, 中島繁則, 中辻 隆: 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて, 交通工学, Vol. 38-6, pp.32-41, 2003.
- 6) 津田美知子: 通行帯のデザイン, 技法堂出版, 東京, 2002.

プローブ自転車による自転車歩行者道のバリア調査法

斎藤健治**・清田 勝***

歩道, 自転車歩行者道におけるバリアに関する情報を効率よく収集するためのプローブ自転車を開発した。このプローブ自転車には, 磁気センサ, 加速度センサ, ポテンシオメータ, 傾斜センサ, ジャイロセンサが搭載されており, 段差の高さ, 幅員, 勾配を推定することができる。段差の推定については種々の形状に対応すること, 幅員の推定についてはヒューマンエラーの介在を防止すること, 勾配の推定についてはジャイロセンサの情報を有効利用することが課題となった。行政等における実利用のためには, 大容量記憶媒体やリアルタイム処理方式の採用, GPS との同期, GIS 上でセンサ出力波形を変換して可視化するシステムが必要となる。

Investigation of Barrier on Bicycle-Pedestrian Track with Probe Bicycle*

By Kenji SAITOU**・Masaru KIYOTA***

The purpose of this study was to develop probe bicycle that investigate and collect the information about the barrier on pedestrian track and bicycle-pedestrian track. The barriers such as difference-in-level, narrow width and slope were detected with accelerometers, potentiometer and gyroscope-sensors which were carried on the bicycle. The management of the difference-in-level with various shapes, the prevention of human error in the estimate of width, the effective use of the information from the gyroscope-sensors were needed for the practical use of probe bicycle.
