

運転免許保有有無と慣れが通学路歩行時の 注視行動に与える影響の検討

長谷川 裕修¹・葛西 誠²・田村 亨³

¹正会員 秋田工業高等専門学校准教授 土木・建築系 (〒 011-8511 秋田市飯島文京町 1-1)
E-mail: hasegawa@akita-nct.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 秋田工業高等専門学校准教授 土木・建築系 (〒 011-8511 秋田市飯島文京町 1-1)
E-mail: kasai@akita-nct.ac.jp

³フェロー会員 北海商科大学教授 商学部 (〒 062-8607 札幌市豊平区豊平 6 条 6 丁目 10 番)
E-mail: tamura@hokkai.ac.jp

本研究では通学路歩行時の安全性に関わる行動として注視行動に着目し、通学生の属性による違いを把握することを目的として研究を行った。具体的には、1) 道路環境に対する慣れ・不慣れ、2) 普通自動車運転免許保有の有無の2要因によって注視行動を含む歩行挙動が変化するという仮説のもと、眼鏡型視線計測装置を使用して測定したデータを分析した。分析の結果、注視行動の類似度を表現する指標のうち、全体的な注視の傾向を表すベクトル(形状)、注視対象の探索が大域的か局所的かを表す長さ、情報を入手するのに要する時間を表す継続時間の3つの指標において2つの要因の交互作用が有意な影響を与えることが明らかとなった。

Key Words: road safety, eye-tracking, school road, pedestrian behavior analysis

1. はじめに

通学路を移動中の児童・生徒・学生(以下、通学生と記す)の安全は、交通安全に関する最も重大な問題の1つである。2012年4月に京都府亀岡市で発生した登校中の児童らの列に自動車が入り込む事故を始め、登下校中の児童等が死傷する事故が連続して発生したことを受けて通学路の緊急合同点検が実施された。その後も定期的な合同点検の実施・対策立案・対策実施・対策効果の把握・対策の改善からなる通学路安全確保のためのPDCAサイクルの推進が継続されている¹⁾。これらの検討は主に学校やPTA、道路・交通管理者によるものであり、実際に道路利用者が「どのような経路」を「どのように見て・行動しているか」という観点からの検討が不十分であった。以上の問題意識に基づき、筆者らは、スマートウォッチに搭載されたGPSで測定した経路位置・歩行速度と眼鏡型デバイスに搭載された加速度・角速度センサで測定した頭部挙動によって通学路歩行時の「ただ歩いている」「注意しながら歩いている」「ただ止まっている」「注意しながら止まっている」という特徴的な歩行挙動を把握する技術を開発した²⁾。しかし、使用機器の制約により歩行時の重要な情報収集行動である注視行動についての検討はできていない。

通学中の事故を削減するには、通学路そのものの安全性向上や歩行者行動の把握だけでなく、交通安全教

育もまた重要である。本研究で対象とする秋田工業高等専門学校(以下、秋田高専と記す)の通学生は、中学校以前の児童・生徒および普通高校の生徒と比較して、1) 通学距離が長く、2) 入学後に交通安全教育を受ける機会が少ない。このような環境下で、普通自動車免許取得は最も体系的で質・量ともに充実した教育機会である。しかし、免許取得可能な年齢に達しない低学年や、進学のために免許取得を見送る学生も多く、これを補完する手段の検討が必要である。本研究では、通学路環境への慣れを向上させるという、低コストで実行可能な手段に着目して検討を行った。

以上を踏まえて本研究では通学路歩行時の安全性に関わる行動として注視行動に着目し、通学生の属性による行動特性の違いを把握することを目的として研究を行った。具体的には、1) 道路環境に対する慣れ・不慣れ、2) 普通自動車運転免許保有の有無、によって注視行動を含む歩行挙動が変化するという仮説を掲げ、眼鏡型視線計測装置(アイトラッカー)を使用して実道路での実験を行った。

2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

通学路の交通安全対策を検討する際には、通学生と自動車ドライバーの2種類の道路利用者を考慮する必要があるが、本研究では特に歩行通学生を対象とする。従来、交通安全分野における歩行者行動の把握は主にア

ンケート調査によるものが主流だった^{3),4),5)}。アンケート調査の利点是对象者に対して詳細な質問ができる点にあるが、その一方で時系列的な行動過程を把握することができないため、行動の文脈を踏まえた対策の立案に制限がある。

近年のセンサ技術やモノのインターネット (IoT) 技術の発展により、スマートフォンやスマートウォッチなどの各種ウェアラブルデバイスに組み込まれるセンサの多様化・高度化が進み、より個別的で経時的な行動過程を把握する交通調査の実施が可能になりつつある。しかし、センサ技術を用いた歩行者行動分析ではプローブパーソン調査に代表される交通手段推定と経路推定の事例^{6),7)}が多い一方で、筆者ら²⁾が指摘するように歩行者の個別具体的な歩行行動に着目した研究は少なく、今後の研究蓄積が重要である。

既往研究において、道路空間における慣れ・不慣れや免許の有無が空間把握の仕方や安全確認の差に関連していることが明らかになっている。例えば、慣れ・不慣れが道路空間における空間把握と注視に与える影響に着目した先行研究として知花⁸⁾の研究がある。知花はアイカメラを用いて、注視点が抽出された場合のアイマーク位置にある景色の映像のものを注視対象として注視傾向を特定し、空間把握の特性を明らかにしている。一方、高齢者を対象とした免許の保有有無による歩行条件の検討と比較を行った研究として多田ら⁹⁾の研究がある。多田らは事故多発地点において運転者または歩行者が十分な事故防止動作をしているかを装着型の加速度・角速度センサおよびGPSで得たデータから自動的に判定する『運転技能自動評価システム Objet』を用い、テストコースで自転車乗車中・歩行中の安全確認行動の生起箇所、生起時の角度と時間を計測・解析し、安全確認における確認総得点を比較する研究を行い、免許保有者の方が安全確認行動の水準がより高いことを明らかにしている。しかし、これらの既往研究では慣れ・不慣れ、免許の有無それぞれについて個別の検討がなされているものの、両者を複合的にかつ実道路環境において検討した事例は筆者の知る限りない。

以上を踏まえて本研究の学術的貢献は、1) センサ技術を用いた歩行者行動分析の研究蓄積、2) 慣れ・不慣れと免許の有無が通学路歩行者の注視特性および安全確認行動に与える影響の把握を行うこと、の2点である。また、通学路の交通安全対策という実務的課題に対して、利用者視点での検討の重要性を指摘するものと位置付けられる。



図-1 測定装置

3. トビーグラスの実道路環境での歩行者行動分析への適用可能性の検討

(1) 測定装置の概要

本研究では、スウェーデン Tobii 社製のアイトラッカー Tobii pro glasses 2 (以下、トビーグラスと記す) を使用し、測定を行った (図-1)。トビーグラスは装着者の視線や音声等を収集するヘッドユニットおよび収集したデータをSDカードで記録するレコーディングユニットで構成されている。ヘッドユニットは重量約45gでアイトラッカー・HDシーンカメラ・加速度センサ・角速度センサ・マイクなどが搭載されている。アイトラッカーは近赤外LED・アイトラッキングカメラ・画像検出、3Dアイモデル、視点算出アルゴリズムを含む演算処理装置によって構成されており、視線の変動を測定する。具体的には、近赤外LEDは光の反射パターンを生成し、次にアイトラッキングカメラにより高解像度のアイイメージを取得し、最後に画像処理アルゴリズムが目と光の反射パターンを検出して視線の変動を測定する。HDシーンカメラは装着者の視界映像を水平方向82°・垂直方向52°の視野角の高精細度 (high definition, HD) ビデオで撮影する。加速度センサ・角速度センサは装着者の動作によって生じる加速度・角速度を測定し、撮影時のブレの補正や装着者の行動把握に用いられる。測定のサンプリング周波数は50Hzのもの100Hzのものがあるが、本研究ではTobii社に事前相談を実施し、歩行中の注視行動の把握に十分な50Hzのものを使用した。

(2) トビーグラスの実道路環境での歩行者行動分析への適用可能性の検討

通学路歩行時の注視行動に関する実験の予備実験として、秋田高専校舎内および敷地内でトビーグラスの実道路環境での歩行者行動分析への適用可能性を視線データ取得率から検討した。視線データ取得率とは、測定時間内における理論上の最大サンプル数に対する有効な視線データ取得サンプル数で表される値であり、視線計測の品質を表している。視線データ取得を阻害する要因としては、不完全な事前キャリブレーション、ま

表-1 通学路利用実態に関するアンケート調査概要

日時	2014年11月下旬
配布数	66（本科在籍840名のうち、1～4学年がほぼ同数になるように層別抽出）
配布・回収方法	直接配布・直接回収
有効回答数	45
調査項目	通学手段・経路、通学路上で危険な地点・区間、通学路選択要因等

ばたきによる物理的な障害やシーンカメラ視野角外への視線逸脱といった人的要因の他、太陽光に含まれる近赤外光が近赤外LEDによる反射パターンの生成を阻害するといった外部環境によるものがある。

予備実験の参加者は4名で、屋内外ともに測定を行った。視線データ取得率の平均値は、屋内で約90%、屋外では約30%であり、屋外環境での取得率の低さが明らかとなった。これは、近赤外線を用いるアイトラッカーでは一般的な傾向である。しかし、実験中に参加者の知人とすれ違う等、注意を引くものがあった場合には取得率が著しく向上した。この要因としては、注視対象物の存在によりまばたきや視線逸脱が減少したことが考えられる。予備実験を行った屋外区間は学校敷地内であり、注視をする対象物となる道路反射鏡や看板などが少なかったことが取得率の低さにつながったとも考えられ、実験区間によっては取得率の向上が期待できる。以上の結果から、トビーグラスの実道路環境での歩行者行動分析への適応に際しては事前に十分な検討を行い、注視対象物を含む等の条件を付けることが必要であることが分かった。

4. 注視行動調査のための通学路歩行実験

(1) 実験区間の検討

本研究に先立ち、秋田高専に通学する学生の道路利用実態を把握するためのアンケート調査を実施した。調査概要を表-1に示す。

自宅から徒歩のみ・自転車のみ等の手段を用いる通学生は移動経路が多様であり、傾向を見いだすことが困難なことが想定されたため、経路が比較的限定される北部方面からの最寄り駅であるJR上飯島駅、南部方面からの最寄り駅であるJR土崎駅の利用者からの回答のみを有効回答とした。上飯島駅利用者は15名であり、通学路上で危険な地点・区間として、(1)極端に見通しの悪いカーブ区間、(2)細い路地が複雑に交差する五叉路が挙げられた。土崎駅利用者は30名で、通学路上で危険な地点・区間として、(3)スーパーマーケット沿いの路地突き当りのT字路、(4)個人商店横の変形十字路、(5)右左折が連続する細い路地区間が挙げられた。



図-2 実験区間（左図）と分析対象箇所（右図）

以上の予備調査および3.(2)に記した予備実験結果を踏まえて、交差点や道路反射鏡などの注視対象物を含む実験区間を上飯島駅～秋田高専間および土崎駅～秋田高専間の2区間に設定した。それぞれの区間を上飯島ルートおよび土崎ルートと記す。ただし、歩行実験は両ルートで完了しているが、分析は上飯島ルートでのみ完了していることから、以降は上飯島ルートについてのみの記述に限定する。土崎ルートでの分析結果との比較検討については、今後の課題となる。なお、実験区間は実験前に実地調査を行い、実験中に参加者に危険がないことを確認した。

図-2に実験区間（左図）および分析対象箇所（右図）を示す。左図中下部の楕円で囲った範囲が分析対象箇所であり、右図に示した道路反射鏡のあるT字路を右折する地点である。左図黄色の点線で示した実験区間の総延長は約180mである。なお、本研究は通学路全体を網羅的に分析したものではなく、通学路内の一つのT字路における分析結果であることに留意する必要がある。異なる道路構造での分析など対象の拡充は今後の課題となる。

(2) 実験の概要

本研究では、1)道路環境に対する慣れ・不慣れ、2)普通自動車運転免許保有の有無、によって注視行動が変化するという仮説のもと、通学路歩行実験を行った。前者の仮説については、通い慣れた道を歩行する場合、周辺環境に対する事前知識が注視行動に変化を及ぼすと考えた。後者の仮説については、普通自動車運転免許保有者は、自動車教習所における技能講習34時限(MT)・学科教習26時限・修了検定(仮免許試験)・卒業検定、免許センターにおける学科試験および適性試験を受講および合格しており、非保有者に比べて交通安全意識・知識ともに高いことが想定され、これが注視行動に影

表-2 実験参加者の属性と視線データ取得率

No.	年齢	免許	慣れ不慣れ*	CL**	取得率
1	20	有	慣れ	無	63%
2	19	有	慣れ	無	59%
3	20	有	慣れ	無	52%
4	17	無	慣れ	無	73%
5	16	無	慣れ	無	67%
6	16	無	慣れ	無	74%
7	19	有	不慣れ	有	79%
8	20	有	不慣れ	無	73%
9	20	有	不慣れ	無	72%
10	17	無	不慣れ	有	79%
11	17	無	不慣れ	無	72%
12	18	無	不慣れ	無	5%
平均	18				64%

* 道路環境への慣れ不慣れ ** コンタクトレンズ

響を与えると考えた。

これら本研究で措定した仮説以外に、性別や年齢といった個人属性や視機能にかかる能力、普段の交通手段なども注視行動に影響を与える可能性はあるが、本研究では、比較的容易にコントロール可能な「慣れ不慣れ」と「免許保有有無」に限定して検討を行った。

表-2に実験参加者の属性と視線データ取得率を示す。実験参加者は秋田高専在学中の学生12名で、No.1から6は日常的に上飯島駅を、No.7から12は日常的に土崎駅を利用している。よって、No.1から6は道路環境に慣れており、7から12は不慣れである。実験参加者に対しては、実験開始前にトビークラスを身に付けて指定した道路を普段通り歩いてもらうこと、その最中に視線計測をすることを説明した。また、倫理的配慮や個人情報の取扱いについても説明を行い、参加の同意を得た。

実験は2019年1月8日から1月16日までの平日に行った。実験は公道上で実施し、当該道路を利用する自動車や歩行者・自転車の流入制御は行っていないが、本実験実施時に分析対象箇所近辺では他の交通主体の流入はなく、参加者間で一定の交通環境下での実験結果が得られているといえる。しかし、現実では他の交通主体の存在によって視線やその他の行動が変化することが想定されるため、本実験の結果については一定の統制された条件下でのものであることに留意が必要である。

(3) 視線データの概要

前掲の表-2に示した本実験での視線データ取得率は全体平均で64%と予備実験時の約30%と比較して大きく向上した。なお、使用する機材および解析ソフトウェアの制約により、測定データ取得率は実験区間全体

での取得率を示しており、分析対象箇所に限定したものであるのではない。しかし、予備実験の項で述べたデータ取得率に影響する要因のうち、実道路環境での実験では、注視対象物の存在によりまばたきや視線逸脱が減少することが取得率改善に特に影響すると考えられる。このため、注視対象物が明確に存在する分析対象箇所に限定した場合での取得率は区間全体の結果よりも改善される傾向にあることが予想されることから、視線計測の品質としては問題がないと考えられる。また、コンタクトレンズの有無は取得率に悪影響が無いことも明らかとなった。極端に取得率が悪い参加者(=No.12)1名について、実験後の参加者への聞き取りと視界映像の確認により、「参加者がポイントを注視していない」、「キャリアレーション中に気が散っている」等の要因が影響している可能性が判明したが、より詳細な検討は今後の課題となる。No.12のデータは解析ソフトウェアにより視線データ分析対象から自動的に除外された。

5. 注視行動分析

(1) データの前処理

測定によって得られた視線データから分析対象箇所における注視データをTobii社の視線計測解析ソフトウェアであるトビープラボの機能を用いて作成した。解析ソフトウェアは以下の手順により注視データを作成する。

- 測定によって得られた視野映像中に別途撮影した分析対象箇所の静止画像が映り込んでいる時間を画像認識技術によって特定し、その間の視線データの座標を背景画像上の座標に対応付けする
- 視線移動速度が100°/s以下の状態が60ms以上継続する場合を注視とするフィルタ処理(Tobii I-VT (Attention) フィルタ)を適用

注視データには、注視の静止画像上でのxy座標(px)および測定開始からのタイムスタンプが含まれる。

次に、注視データのタイムスタンプから個々の注視の継続時間を算出し、一連の眼球運動をスキャンパスとして整理した。スキャンパスは注視のxy座標(px)および継続時間(ms)からなり、ある注視から次の注視までがサッカードを表している¹⁰⁾。サッカードとは、ある対象物から別の対象物を見るときに高速に視線を移動させる動きのことである。例として、No.1のスキャンパスの一部を抜粋したものを表-3に示す。

No.1のスキャンパスを背景画像上に描画した図を図-3に示す。図中の円は注視の位置を表しており、円の大きさは注視継続時間の長さを、円のそばに表示されている数字は注視の順番を、円同士を繋ぐ線がサッカードを、それぞれ表している。また、右側の凡例には上

表-3 No.1 のスキャンパス抜粋

x 座標 px	y 座標 px	継続時間 ms
325	247	175
728	454	219
760	521	171
788	480	173
815	497	133

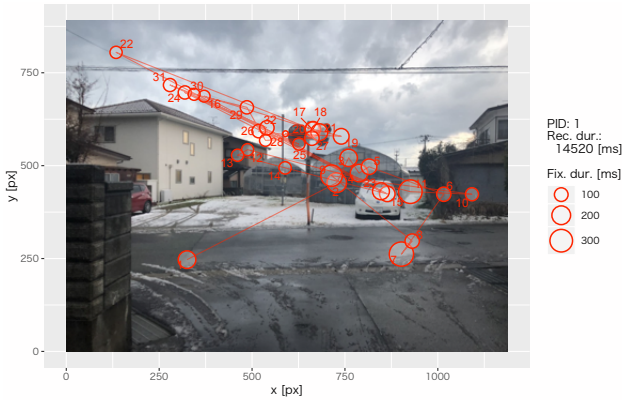


図-3 No.1 のスキャンパス可視化結果

から順に参加者番号, 分析対象箇所における記録時間, 円の大きさ別の注視継続時間を示している. なお, 記録時間は注視データのタイムスタンプの最大値と最小値の差から算出しており, 視野映像と背景画像が一致する累計時間の長短を表している. このようにスキャンパスは注視と次の注視を結ぶサッカードからなるベクトルの連続として表現され, 眼球運動の時空間的な連続性を保持した表現形式となる.

以上の前処理を全参加者のデータに対して行い, 参加者ごとにスキャンパスを作成した. 全参加者のスキャンパス可視化結果と背景画像を図-4に示す. 各スキャンパスの円の色は参加者を区別し, 図の1行目は「免許有り-慣れ」群, 2行目は「免許無し-慣れ」群, 3行目は「免許有り-不慣れ」群, 4行目は「免許無し-不慣れ」群および背景画像である. それぞれ, 「免許有り-慣れ」群は進行方向から反対方向までの広い範囲を平均的な時間で, 「免許無し-慣れ」群は画面中央からやや右にかけての狭い範囲を短時間で, 「免許有り-不慣れ」群は進行方向である右下側を平均的な時間で, 「免許無し-不慣れ」群は路面である画像下部中心で時間をかけて, 注視している傾向が見られる. この結果から, 他群と比較して「免許有り-慣れ」群が最も望ましい注視行動を取っているといえる. なお, 視野映像と背景画像が一致する累計時間を表す記録時間について, No.5は他の参加者に比べて著しく短い. この原因としては, 参加者 No.5が背景画像範囲外の空間に視線を向ける時間が長かったことが挙げられる. 事前に撮影した画像・

表-4 基本パラメータの集計結果

No.	注視回数	総注視継続時間 ms	総サッカード長 px
1	32	4224	7283.9
2	25	4478	7777.0
3	16	2721	2331.9
4	8	2664	563.2
5	4	971	141.6
6	13	8135	2710.7
7	29	6567	2675.3
8	18	2367	2352.9
9	21	3053	3987.2
10	46	8618	11308.5
11	26	5331	6271.2

映像を画面に投影し, スクリーン型のアイトラッカーを用いて視線計測を実施することで, このような参加者間の記録時間のバラツキが抑制可能と考えられる.

(2) スキャンパスの基礎分析

スキャンパスから, 眼球運動に関する基本パラメータである注視回数・注視継続時間・サッカードの長さを参加者ごとに集計した結果を表-4に示す. 注視回数, 総注視継続時間, 総サッカード長のいずれも参加者間のバラツキが大きい.

注視回数, 総注視継続時間, 総サッカード長間のピアソンの積率相関係数を求め, 無相関検定を行った結果, 注視回数-総注視継続時間は有意水準 0.05 で, 注視回数-総サッカード長は有意水準 0.001 で, 総注視継続時間-総サッカード長は有意水準 0.1 で, それぞれ有意となった.

図-5に参加者別の注視一回当たりの注視継続時間の分布を箱ひげ図で表した図を示す. 箱の上端は第3四分位数 $Q_{3/4}$ を, 中央の太線は中央値 $Q_{2/4}$ を, 下端は第1四分位数 $Q_{1/4}$ を, それぞれ表す. 四分位範囲 $IQR = Q_{3/4} - Q_{1/4}$ とするとき, 閉区間 $[Q_{1/4} - 1.5IQR, Q_{3/4} + 1.5IQR]$ の範囲外にあるものを外れ値とし, 点プロットで表示している. データから外れ値を除いたものの最大値をひげの上端で, 最小値をひげの下端で表している. 箱ひげ図の描画色は, 免許の有無と慣れ・不慣れによる分類を表している. 「免許有り-慣れ」群と「免許無し-不慣れ」群は群内で似た分布をしているが, 「免許無し-慣れ」群と「免許有り-不慣れ」群は群内での分布に特徴はない. また, 群間で似た分布はない.

図-6に参加者別の注視一回当たりのサッカード長の分布を箱ひげ図で表した図を示す. 図中の表現方法は図-5と同様である. 「免許無し-不慣れ」群は群内で似た分布をしているが, それ以外の群では群内での分布

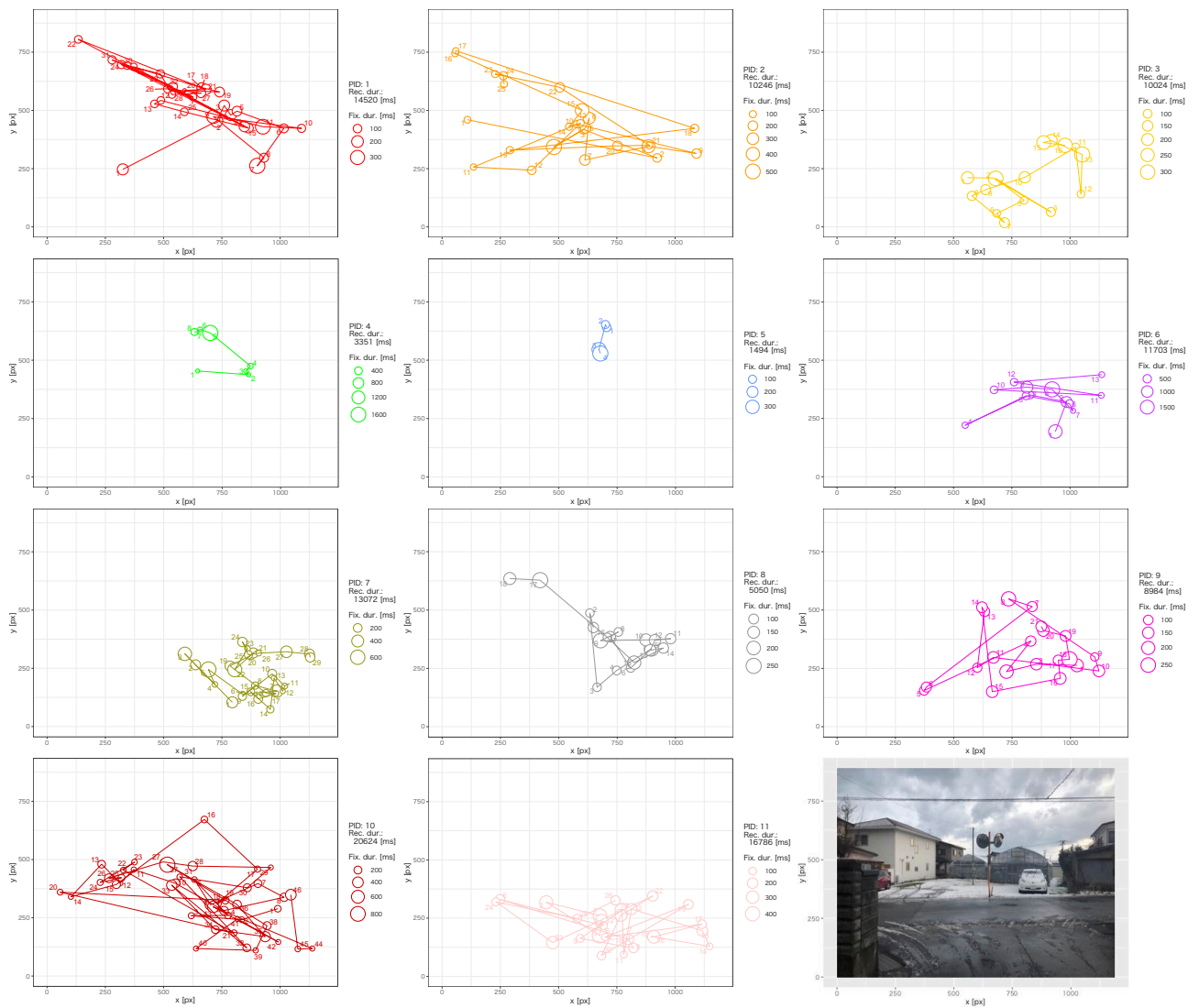


図-4 全参加者のスキャンパス可視化結果と背景画像

に特徴はない。また、群間で似た分布はない。

以上の基礎分析により、スキャンパスからの集計によって得られた眼球運動に関する基本パラメータを用いた分析では道路環境に対する慣れ・不慣れと免許所持の有無が注視行動に与える影響は確認できなかった。

(3) スキャンパスの非類似度に基づく分析

本節では、スキャンパスが持つ情報を有効に用いて道路環境への慣れの有無と免許の有無が注視行動 (= スキャンパス) に与える影響を検証することを試みる。具体的には、以下の手順で分析を行った。

1. MultiMatch^{11),12)} で参加者 i と j とのスキャンパスの類似度指標 (表-5) を算出
2. 類似度指標を非類似度指標に変換
3. 指標ごとに PERMANOVA¹³⁾ で非類似度に対する「免許の有無」と「慣れ不慣れ」の影響を検定

a) スキャンパスの類似度指標の算出と非類似度指標への変換

MultiMatch は Jarodzka ら¹¹⁾ によって提案されたベクトルベースのスキャンパスの比較方法であり、2つのスキャンパスを比較し、表-5 に示した5つの類似度指標を算出する。これ以降、ある参加者 $i = 1, 2, \dots, N$ と別の参加者 $j = 1, 2, \dots, N$ との類似度を s_{ij} と書き表す。ここで、 N : 全参加者数である。なお、 $i = j$ のとき $s_{ij} = 1$ となる。MultiMatch は文字列ベースのレーベンシュタイン編集距離に基づく比較方法や注視領域に基づく方法に比べて頑健な結果を得られることが知られている¹¹⁾。

MultiMatch により算出される指標を歩行者交通安全研究の文脈に位置付けると、ベクトル (形状) は全体的な注視の傾向を、長さや方向は注視対象の探索が大域的还是局所的かを、位置はどのような対象を注視するかを、継続時間は必要な情報を入手するのに要する時間

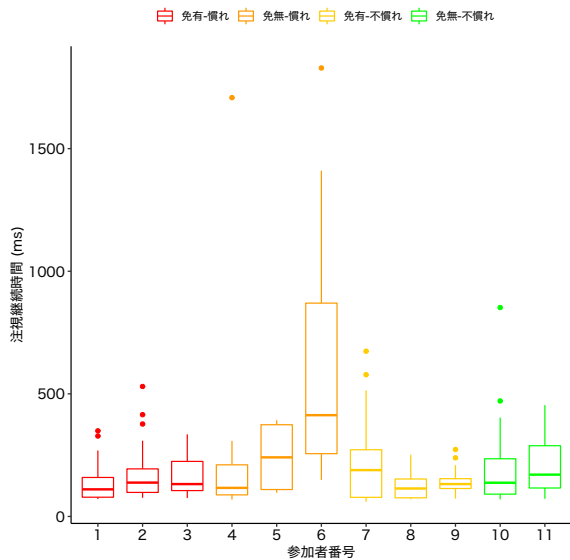


図-5 参加者別注視継続時間の分布

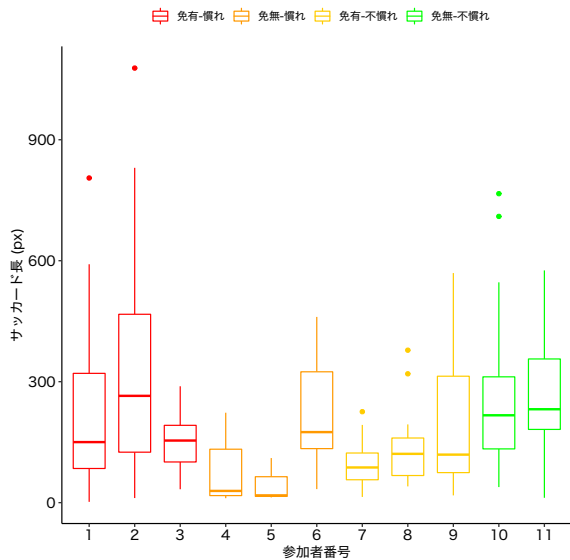


図-6 参加者別サッカード長の分布

を表していると解釈できる。

本研究では、MultiMatch の Adina Wagner らによる Python 実装である multimatch-gaze¹⁴⁾ を用いて類似度 s_{ij} を算出した。

次の項で詳述する PERMANOVA は距離 (= 非類似度) に対する検定であるので、式 (1) により類似度 s_{ij} を非類似度 d_{ij} に変換する。

$$d_{ij} = 1 - s_{ij} \quad (1)$$

図-7 に算出した非類似度をヒートマップとして可視化した図を示す。横軸と縦軸はそれぞれ参加者番号 i , j を表し、比較ペアの非類似度が低いものほど暗色に、高いものほど明色となっている。なお、個々のヒート

表-5 MultiMatch の類似度指標

類似度指標	概要	イメージ図*
ベクトル (形状)	スキャンパス間の形状の違いから算出	
長さ	サッカードベクトル間の長さの差から算出	
方向	サッカードベクトル間の角度から算出	
位置	注視位置のユークリッド距離から算出	
継続時間	注視継続時間の差から算出	

*矢印はベクトル (サッカード) を表し、円の大きさは注視継続時間の長さを表す

マップはそれぞれ異なる値の範囲を持っているため、同一色であっても非類似度は異なっていることに注意されたい。それぞれの指標において左下から右上への対角要素は $i = j$ であり、非類似度は 0 となる。全体的な傾向として、継続時間、方向、位置、長さ、ベクトル (形状) の順に非類似度が高く、図-4 に示した参加者間のスキャンパスの違いを反映していることが確認できる。

b) 非類似度指標に対する「免許の有無」と「慣れ不慣れ」の影響

本項では MultiMatch により算出したスキャンマップの非類似度指標に対する「免許の有無」と「慣れ不慣れ」の 2 因子の影響を把握するために PERMANOVA による検定を行う。PERMANOVA (Permutational multivariate analysis of variance) は、Anderson によって一般距離行列に対してノンパラメトリック多変量分散分析を行うことを目的として開発された手法である。以下に PERMANOVA についての概要を記すが、詳細は原著論文¹³⁾ を参照されたい。

いま、全参加者数を N とし、参加者 $i = 1, 2, \dots, N$ と $j = 1, 2, \dots, N$ 間の距離 (= 非類似度) は式 (1) の通り d_{ij} である。このとき、全体平方和 SS_T を

$$SS_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \quad (2)$$

とする。次に、水準数 a の因子 A と水準数 b の因子 B の 2 つの因子を考える。2 つの因子の組み合わせがそれぞれ n あるとすれば、 $N = abn$ となる。

因子 B の影響を無視した、因子 A の群内平方和 $SS_{W(A)}$

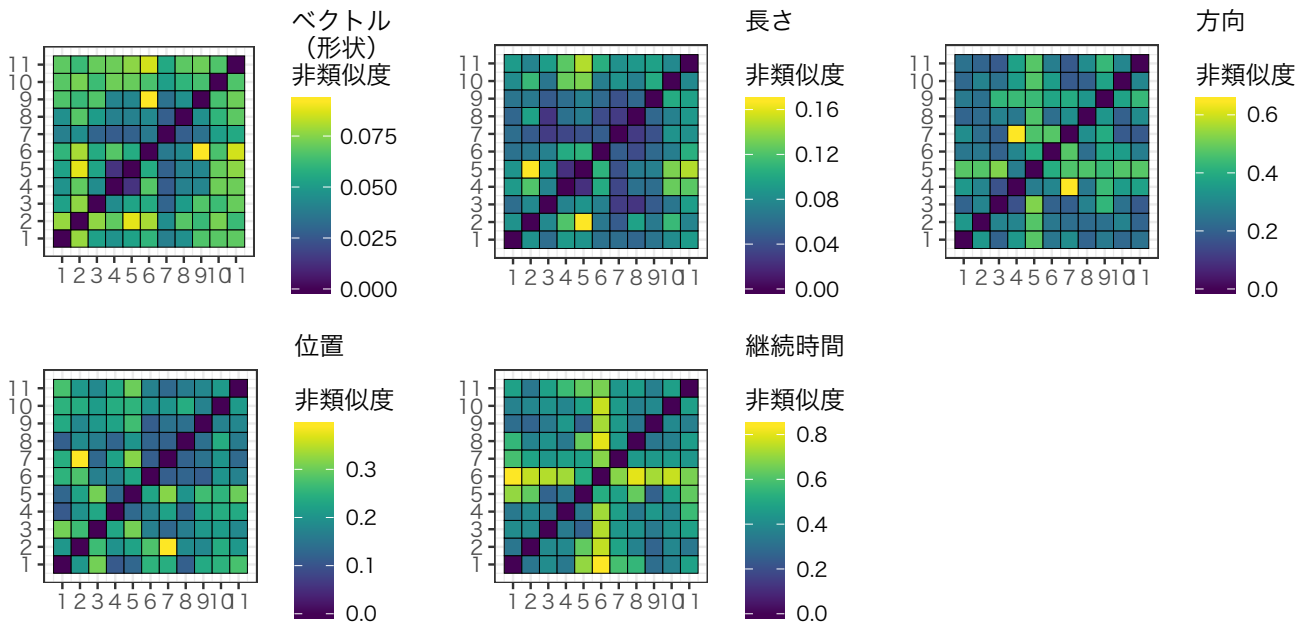


図-7 非類似度のヒートマップ

を

$$SS_{W(A)} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \epsilon_{ij}^{(A)} \quad (3)$$

とする。ここで、 $\epsilon_{ij}^{(A)}$ は参加者 i と j が因子 A の同じ群に属しているときに 1、そうでないときに 0 の値をとる。

同様に因子 A の影響を無視した、因子 B の群内平方和 $SS_{W(B)}$ は

$$SS_{W(B)} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \epsilon_{ij}^{(B)} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\epsilon_{ij}^{(B)}$ は参加者 i と j が因子 B の同じ群に属しているときに 1、そうでないときに 0 の値をとる。

それぞれの対応する主効果の群間平方和は $SS_A = SST - SS_{W(A)}$ と $SS_B = SST - SS_{W(B)}$ で求められる。

一方、残差平方和は

$$SS_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}^2 \epsilon_{ij}^{(AB)} \quad (5)$$

となる。ここで、 $\epsilon_{ij}^{(AB)}$ は参加者 i と j が因子 A と因子 B が同じ組み合わせの群に属しているときに 1、そうでないときに 0 の値をとる。

以上より、因子 A と因子 B の交互作用の平方和 SS_{AB} は $SS_{AB} = SST - SS_A - SS_B - SS_R$ で求められる。

因子 A の自由度 $df_A = a - 1$ 、因子 B の自由度 $df_B = b - 1$ 、交互作用の自由度 $df_{AB} = (a - 1)(b - 1)$ 、残差の自由度 $df_R = N - df_A - df_B - df_{AB}$ より、因子 A と B

それぞれの主効果および交互作用の疑似 F 統計量は、

$$F(A) = \frac{SS_A/df_A}{SS_R/df_R} \quad (6)$$

$$F(B) = \frac{SS_B/df_B}{SS_R/df_R} \quad (7)$$

$$F(AB) = \frac{SS_{AB}/df_{AB}}{SS_R/df_R} \quad (8)$$

となる。

この疑似 F 統計量は帰無仮説「群間に差がない」のもとで F 分布には従わない。いま、帰無仮説が真であり、群が実際には異なる群間で交換可能となる。したがって、参加者の群を識別するラベルをランダムに並べ替えると、新たな F (疑似 F 統計量 F^π) を計算可能となり、この計算を繰り返すことで疑似 F 統計量の分布全体を得ることができる。 P 値は、式 (9) で求められる。

$$P = \frac{(\text{No. of } F^\pi \geq F)}{(\text{Total no. of } F^\pi)} \quad (9)$$

並べ替えの回数を増やせば P 値の精度が上がり、有意水準 0.05 の検定では少なくとも 1000 回、有意水準 0.01 の検定では少なくとも 5000 回の並べ替えを行う必要がある。本研究では、余裕を見て 10000 回の並べ替え回数で検定を行った。なお、計算には Oksanen らによる R¹⁵⁾ パッケージ `vegan`¹⁶⁾ の `adonis2` 関数を用いた。

ベクトル (形状) の検定結果を表-6 に示す。免許有無と慣れ不慣れともに主効果は有意でないが、交互作用は有意水準 0.05 で有意であった。

長さの検定結果を表-7 に示す。免許有無と慣れ不慣れともに主効果は有意でないが、交互作用は有意水準 0.05 で有意であった。

表-6 ベクトル（形状）の分散分析表

	自由度	平方和	R ²	F 統計量	P 値
免許有無	1	0.001	0.076	0.859	0.581
慣れ不慣れ	1	0.002	0.104	1.177	0.333
交互作用	1	0.004	0.200	2.264	0.033
残差	7	0.011	0.619	NA	NA
Total	10	0.018	1.000	NA	NA

表-7 長さの分散分析表

	自由度	平方和	R ²	F 統計量	P 値
免許有無	1	0.002	0.057	0.747	0.535
慣れ不慣れ	1	0.002	0.058	0.770	0.535
交互作用	1	0.012	0.353	4.644	0.014
残差	7	0.018	0.532	NA	NA
Total	10	0.034	1.000	NA	NA

表-8 方向の分散分析表

	自由度	平方和	R ²	F 統計量	P 値
免許有無	1	0.095	0.167	1.883	0.173
慣れ不慣れ	1	0.076	0.134	1.509	0.284
交互作用	1	0.045	0.079	0.886	0.570
残差	7	0.353	0.621	NA	NA
Total	10	0.569	1.000	NA	NA

表-9 位置の分散分析表

	自由度	平方和	R ²	F 統計量	P 値
免許有無	1	0.015	0.068	0.755	0.588
慣れ不慣れ	1	0.042	0.186	2.074	0.118
交互作用	1	0.027	0.120	1.342	0.303
残差	7	0.142	0.627	NA	NA
Total	10	0.227	1.000	NA	NA

方向の検定結果を表-8に示す。主効果・交互作用ともに有意ではなかった。

位置の検定結果を表-9に示す。主効果・交互作用ともに有意ではなかった。

継続時間の検定結果を表-10に示す。免許有無と慣れ不慣れともに主効果は有意でない。交互作用は有意水準0.05で有意ではないものの、十分な影響がある。

以上の結果より、全体的な注視の傾向を表すベクトル（形状）、注視対象の探索が大域的か局所的かを表す長さ、情報を入手するのに要する時間を表す継続時間の3つの指標において、「免許の有無」と「慣れ不慣れ」の交互作用が影響していることが明らかとなった。これらの指標においては、「免許の有無」と「慣れ不慣れ」以外の残差項に含まれる特性（年齢・性別・視機能等）の影響は限定的であると推察される。一方、主効果および交互作用のいずれも有意ではなかった長さや方向については、表-4に示した「免許無し-慣れ」群（No.4からNo.6）の注視回数が他群と比べて少なく、特徴的

表-10 継続時間の分散分析表

	自由度	平方和	R ²	F 統計量	P 値
免許有無	1	0.183	0.145	1.783	0.123
慣れ不慣れ	1	0.153	0.121	1.488	0.221
交互作用	1	0.209	0.166	2.039	0.067
残差	7	0.717	0.569	NA	NA
Total	10	1.261	1.000	NA	NA

な分布となっていることが影響している可能性がある。この注視回数の影響については、今後、追加の検討が必要である。

「免許有り-慣れ」群が最も望ましい注視行動を取っている（図-4参照）ことを含めて考えると、免許取得過程で見込まれる交通安全意識・知識の向上だけでは不十分であり、道路環境への慣れも必要なことがわかる。「免許無し-慣れ」群は免許取得を、「免許有り-不慣れ」群は道路環境への慣れを、「免許無し-不慣れ」群は免許取得と道路環境への慣れの両方を行うことで、「免許有り-慣れ」群との差がなくなる、すなわち、適切な注視行動を取ることができるようになることが示唆される。ただし、免許の取得には多くの費用と期間がかかること、受験資格が18歳以上であること、取得は任意であることを考えると、免許取得に代わる交通安全教育の実施が必要であろう。

6. おわりに

本研究は通学路の安全性に関わる行動として注視行動に着目し、歩行実験と統計解析によってこれを検討した。その結果、1)「免許有り-慣れ」群は進行方向から反対方向までの広い範囲を平均的な時間で注視しており、他群よりも望ましい注視行動を取っていることがわかった。また、2)注視行動の類似度を表現する指標のうち、全体的な注視の傾向を表すベクトル（形状）、注視対象の探索が大域的か局所的かを表す長さ、情報を入手するのに要する時間を表す継続時間の3つの指標において、免許の有無と道路環境への慣れの有無の交互作用が有意な影響を与えることが明らかとなった。

免許の取得は任意であることを踏まえると、1)免許の取得に代わる交通安全教育、2)通学路環境に対する理解促進を両輪として推進することが通学路の交通安全向上に重要となる。

ただし、本研究は通学路全体を網羅的に分析したのではなく、通学路内の一つのT字路における分析結果であることに留意する必要がある。これを踏まえて、今後の課題としては、以下の7点が挙げられる。

1. 単路部など本研究とは異なる道路構造における注視行動の分析

2. 土崎ルートの実験データを用いた分析の実施と今回の結果との比較検討
3. 免許保有有無と慣れ不慣れ以外の特性（年齢・性別・視機能等）の影響把握
4. 他の実験区間で収集したデータを用いた提案手法の頑健性・信頼性の検証
5. スキャンパス以外の定量的な注視行動分析方法の検討
6. MultiMatch 以外のスキャンパス比較手法の検討
7. 注視対象の性質に着目した定性的な分析との比較検討

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP18K04400 の助成および公益財団法人高速道路調査会令和 2 年度研究助成の一部により実施した。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局: 通学路の交通安全対策, <http://www.mlit.go.jp/road/sesaku/tsugakuro.html>, 閲覧日: 2020-02-12.
- 2) Hasegawa, H., Konno, H., Kikuchi, K. and Tamura, T.: Pedestrian behavior analysis using smart eyewear, *Asian Transport Studies*, Vol. 5, No. 3, pp. 453–469, 2019.
- 3) Koekemoer, K., Van Gesselien, M., Van Niekerk, A., Govender, R. and Van As, A. B.: Child pedestrian safety knowledge, behaviour and road injury in Cape Town, South Africa, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 99, pp. 202–209, 2017.
- 4) Schroeder, P. and Wilbur, M.: 2012 National survey of bicyclist and pedestrian attitudes and behavior, volume 3: Methodology report, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, pp. 1–93, 2013.
- 5) Papadimitriou, E., Theofilatos, A. and Yannis, G.: Patterns of pedestrian attitudes, perceptions and behaviour in Europe, *Safety Science*, Vol. 53, pp. 114–122, 2013.
- 6) 北村清州, 中嶋康博, 牧村和彦: プローブパーソン調査による交通行動データ収集・活用の高度化, 2005.
- 7) 中村英夫, 宮下浩一, 羽藤英二, 岸井隆幸: パーソントリップ調査のための加速度センサを活用した Random Forest による移動手段推定手法, *交通工学論文集*, Vol. 1, No. 5, pp. 10–18, 2015.
- 8) 知花弘吉: 歩行者の注視傾向からみた空間把握に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, Vol. 64, No. 520, pp. 159–164, 1999.
- 9) 多田昌裕, 岡田昌也, 蓮花一己: 装着型センサを用いた高齢運転者・自転車・歩行者の行動特性分析, *生体医工学*, Vol. 54, No. 3, pp. 129–134, 2016.
- 10) Tobii Pro Support: *Tobii Pro Lab User's Manual*, Tobii Pro, p. 10, 2018.
- 11) Jarodzka, H., Holmqvist, K. and Nyström, M.: A vector-based, multidimensional scanpath similarity measure, *ETRA '02: Proceedings of the 2010 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, pp. 211–218, 2010.
- 12) Dewhurst, R., Nyström, M., Jarodzka, H., Foulsham, T., Johansson, R. and Holmqvist, K.: It depends on how you look at it: Scanpath comparison in multiple dimensions with MultiMatch, a vector-based approach, *Behavior Research Methods*, Vol. 44, No. 4, pp. 1079–1100, 2012.
- 13) Anderson, M. J.: A new method for non-parametric multivariate analysis of variance, *Austral Ecology*, Vol. 26, No. 1, pp. 32–46, 2001.
- 14) Wagner, A., Halchenko, Y. and Hanke, M.: multimatch-gaze: The MultiMatch algorithm for gaze path comparison in Python, *Journal of Open Source Software*, Vol. 4, No. 40, p. 1525, 2019.
- 15) R Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing, <http://www.r-project.org>, 2017.
- 16) Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E. and Wagner, H.: *vegan: Community Ecology Package*, 2019. R package version 2.5-6.

(Received June 19, 2020)
(Accepted December 28, 2020)

EFFECTS OF DRIVER'S LICENSE POSSESSION AND HABITUATION TO SCHOOL ROAD ON GAZE BEHAVIOR DURING WALKING ON SCHOOL ROAD

Hironobu HASEGAWA, Makoto KASAI and Tohru TAMURA

In this study, we focused on gaze behavior as a behavior related to the safety of students walking on school routes, and conducted a study to understand the differences in behavior characteristics according to the attributes of students. Specifically, we analyzed the data measured using an eyeglass-type eye-tracking device under the hypothesis that gaze behavior changes depending on whether or not a person is familiar with the road environment and whether or not a person has a driver's license. As a result of the analysis, among 3 indices representing the similarity of gaze behavior, the interaction between familiarity with the road environment and whether they have a license or not has a significant effect on the vector representing the overall tendency of gaze (Shape), the length which indicates whether the search for a subject to gaze is global or local, and the duration which indicates the time required to obtain information.