

Jacek OSKARBSKI, Krystian BIRR, Karol ŻARSKI
Gdansk University of Technology (Politechnika Gdańska)

USE OF DATA FROM SATELLITE NAVIGATION SYSTEM IN OPERATIONAL AND STRATEGIC MANAGEMENT OF TRANSPORT IN CITIES

Wykorzystanie danych z systemu nawigacji satelitarnej w operacyjnym i strategicznym zarządzaniu transportem w miastach

Abstract: *The article presents the possibilities of using data from the Global Positioning System for the development of traffic models and examples of use this data in the transport management. Traffic models are useful tools in planning and evaluation of transport solutions, but also can be used for current, operational transport management.*

Keywords: Intelligent Transportation Systems, GPS, transport telematics

Streszczenie: *W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania danych z systemu GPS do budowy modeli ruchu oraz przykłady wykorzystania tych danych w bieżącym, operacyjnym zarządzaniu transportem. Modele ruchu są użytecznymi narzędziami planowania i oceny rozwiązań transportowych, ale mogą być również wykorzystywane do bieżącego, operacyjnego zarządzania transportem.*

Słowa kluczowe: Inteligentne Systemy Transportu, GPS, telematyka transport

1. Introduction

ITS (Intelligent Transport Systems) and ICT (Information and Communication Technology) are a category of measures which are structured in many ways according to available sources. European Commission defines ITS as advanced applications providing innovative services related to the different modes of transport and traffic management. This definition may be structured into the following detailed transport management systems including user information systems, fleet and freight management systems, public transport management systems, automatic toll collection systems, traffic control systems and incident management systems [7]. ITS integrate telecommunications, electronics and information technologies with transport engineering in order to plan, operate, maintain and manage transport systems. It must be emphasized that the core of ITS comprises obtaining, processing and distributing information for better use of transport systems, infrastructure and services [5]. Therefore, quality of data input to the planning system is crucial. This would allow to design measures based on reliable predictions and quantifiable outcomes.

Proper implementation of modern transport technologies may result in a situation, in which both the city authorities and other operators (e.g. freight or public transport) equally reach their objectives improving the overall quality of services and transport system efficiency. However, the implementation of ITS solutions in transport necessarily require advanced planning environment, clear objectives and involvement of various stakeholders from both the public and the private sector. Some of these requirements extend far beyond the city authorities competence and deal with the policy making on the national level. The above mentioned measures should be enforced as a part of a complex concept with a well-planned and well-organized system of supporting actions outstretching previously implemented solutions. Technology used should be recognized and verified as well as based on sound business cases engaging reliable private actors [18].

Data from the GPS systems are primarily used in traffic control systems, freight or public transport management systems and information systems for traffic users. There are also a number of areas where intelligent agents can assist in implementing urban logistics schemes such as determining optimal paths for delivery vehicles in road networks, dynamic vehicle routing and scheduling, or service time durations. Developing intelligent agent software involves specifying a number of elements of the system, including the roles, interactions, types of agents, system goals, capabilities and services. Events are defined from the processing of percepts (information gained from the environment) and situated agents are capable of performing actions or tasks [21]. This category of models is often organized in three steps. The first step is that of round identification, done by defining the point of departure and the different destinations. The second step permits defining the order of delivery in each round, generally by using empirical approaches (in this case the use of ITS tools, e.g. GPS readouts is possible and justified). ITS technologies are indispensable in modelling, relying on intelligent agent software or the multi agents method, providing options for tracking vehicles and locating them in time and space to model their behaviour [18].



Another example would be public transport management system, which uses GPS system to record the location of public transport vehicles. ITS measures offers in addition many solutions of dispatching tools for the public transport organizers. Information about the location of vehicles is also applicable to traffic control systems in order to enable the provision of vehicles priority at intersections with traffic lights. The basic condition for the functioning of such systems is to equip all vehicles with devices allowing their location in real time. Apart from the advantages of the live preview, are also useful historical data on the position relative to the stops and intersections which can be used in public transport modelling [17].

Henceforth the paper is organized as follows: Section 2 consist of sample literature review on research concerning GPS use in transport planning and management. Section 3 presents use of GPS in public transport management and traffic control. Section 4 presents sample research concerning average speed of public transport vehicles modelling and estimation with use of data obtained from the Integrated Traffic Management System TRISTAR implemented in the years 2012–2015 in the Tri-City [19]. Finally section 5 concludes the paper.

2. Examples of Research Use GPS In City Logistics

Mobility location and tracking using GPS devices has brought to the transportation engineering a new perspective to gather vehicle information. These devices collect GPS-Data, including device-ID, location in coordinates, time, speed and distance. This information might be saved into the device for its future analysis, it can be used on vehicle to vehicle analysis systems, or send it to a server for its immediate analysis and use in Real-Time.

For instance it can be used to explain the vehicular dynamics of urban cities as micro and macroscopic simulations, traffic flow and travel time estimations. At segment level of analysis average speed has been used to calculate Level Of Service (LOS) scale and characterize street segments with a LOS and performance [13]. As a case of study, a subset of 1012 GPS-Data traces, gathered from Beijing, China, were analyzed. This trajectory data corresponds to 90 minutes of a Taxi. The implementation of this framework showed that, using only three GPS-Data fields, traffic information about individual vehicles can be estimated and used to characterize street segments with the average speed and its corresponding LOS.

Research of speed of buses in traffic with the use of GPS was carried out, inter alia, in India by Vasantha Kumar and Vanajakshi [22]. Because of the reliability of the results, the route of buses with a length of 15 km and 24 intermediate stops was divided into 500 m sections in order to measure the buses speed. Indication of the GPS position error and the local conditions of the road network, especially distance between intersections and intersections with traffic signals, should be taken into account when determining the length

of the test section. Example of research results for the bus trip is shown in fig. 1, where the speed of the bus is related to the length of the travelled distance.

The horizontal axis shows the location of bus stops. The GPS determined speed at the ringed stops is not always equal to zero when the vehicle is stationary. This is has to do with the accuracy of location setting and the frequency and continuity of measurement. When the bus is stationary at the stop, the speed measured in adjacent measurement intervals is interpolated, which explains the results.

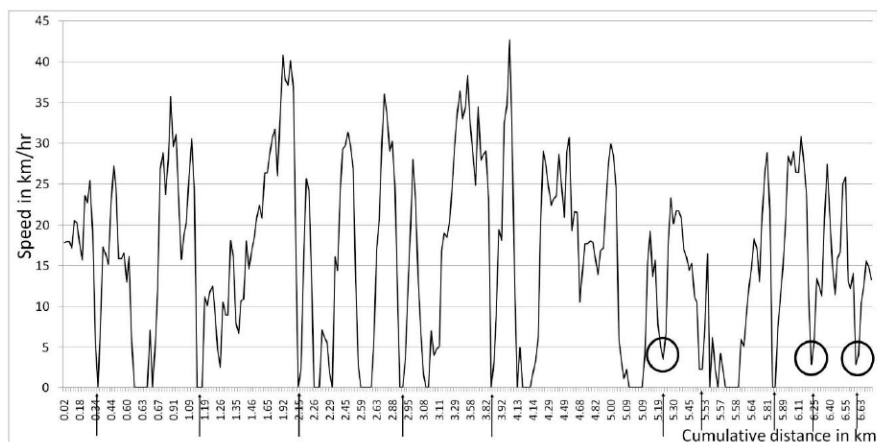


Fig. 1. Speed – distance plot for a bus trip [22]

Authors of [4] analysed the spatial relationship existing between the location of the origin and destination and route choices using GPS coordinates that allow to represent the trajectories of paths made by the sample of drivers. This study has shown that higher deviations from the optimal alternatives refer to paths that involve the selection of road links that allows for higher speeds thus suggesting that the road infrastructure does influence the choice of the route. Different assumptions should be taken into account in the implementation of traffic models and large dataset should be used to have more significant results.

GPS-DATA can be also used in traffic safety improving by ITS solutions. Algorithms that uses data from GPS have been presented in [3]. By the results perceives the possibility to predict and avoid road accidents. For instance in [15] the design of a Dynamic Speed Guidance System under CVIS (Cooperative Vehicle Infrastructure System) is developed, which is of vital significance in reality. The use of GPS in dynamic road user charging has been presented in [23]. The wide spread use of the GPS devices in vehicle it has enables to collect traffic data and detect the traffic congestion information from it (for example from probe vehicles [24] mobile phones [11,14], smartphones [12]). It comes to a conclusion that GPS is a suitable option for traffic congestion detection, since it is cheaper and able to monitor whole road network and help in avoiding congestion by analysis and can be incorporated with different congestion avoiding techniques [6].

GPS-DATA can be also used for freight transport modelling. It is true that to evaluate this issue and many other concerns (e.g. disruption of the system due to natural disasters, modal shifting, and policy decisions) affecting the freight transportation system, analysts need data at different geographic levels and at different time periods. An empirical method reflecting this relation between economic activity and freight movements involves estimating generation freight models, similar to the concept of generation demand modelling for urban planning [16].

The range of data necessary to model freight shipment is also related to the applied modelling technique and methodology. Travel demand estimation and trip-generation is the first stage of the conventional four-step transportation modelling process. The objective of the trip-generation is to quantify the number of trips that are generated in each transportation zone and attracted in each zone in a study area. Modelling the demand for freight transport accounting for locations generating heavy vehicle and delivery vehicle traffic requires socio-economic data and spatial management data on the transport area, the points of departure and destination of the vehicle. This approach may be applied in modelling some categories of freight/commercial transport such as e-commerce or express courier [10]. The paper [8] presents models developed by analogy to passenger travel, which allow calculating the number of trips generated in the given transport zone or location under study and next deduces an origin-destination matrix (O-D) of the goods.

The second category of freight transport models takes into account trip chains or rounds in more detail. These models describe concurrently trip distribution between transport zones or defined locations in the transport network. ITS technologies supported by GPS techniques are useful in modelling, relying on intelligent agent software or the multi agents method, providing options for tracking vehicles and locating them in time and space to model their behaviour. These models use the round as a unit and are also based on a sequential format [10]. By performing a typological and statistical analysis of trips, it is possible to link the flows of goods generated by the different activities with the vehicles concerned and the organizations that set them in traffic (direct tracking). In that case, regression mathematical approach is generally used to define those relations [18].

The development of transport models requires the collection of multi fold data (e.g. private data), often difficult to acquire or unavailable without access to IT sources. This is also the case of freight transport modelling, which often requires detailed information not only at the transport zone level, but also at road section level (e.g. in the case of parking delivery vehicles) or about a given location. GPS techniques can help to fill this gap.

3. Use of GPS in Public Transport Management

Besides data about the movement of all vehicles on the road the ITS systems are able to provide data about the location of public transport (PT) vehicles. These data can be categorized into two types, the first is the location of the vehicle using satellite navigation on road sections between bus stops and on stops. The second type is location of the vehicle



in the reporting points used to prioritize the public transport vehicles at intersections with traffic lights.

ITS applications offer a number of solutions in dispatching tools for the organizers of public transport. Computer (On Board Unit –OBU) installed in each vehicle is equipped with a GPS receiver, a GSM radio modem and a short-range radio. While driving, the computer informs the driver, among others, about deviations relative to the timetable.

Information about the location of the public transport vehicle is useful not only for the organizers (dispatchers) and carriers, but also for public transport passengers. The main place to inform passengers about the current position of the vehicle on the route is the Passenger Information System (PIS), using for this purpose variable information boards for passengers at stops, displaying the real time of departure. The second place to the transmission of this information is the web portal showing the departure times of buses, trolley and trams from all stops in the Tri-City (this is component of Integrated Transport Management System TRISTAR, implemented in 2015), not only those on which are located the physical variable information boards Web portal are primarily be used as a journey planner using information about the real position of public transport vehicles.

Sending information about vehicle position to the server will be done with use of GSM network. It is assumed that the accuracy of vehicle location will be 20 m plus the GPS accuracy. Data from the GPS receiver may be with various accuracy (depending on the number of "visible" satellites, coverage, signal strength, etc.), hence the position obtained from the calculations may differ from the actual position. Therefore will be make calculate with use mathematical algorithms, received data and other parameters, for example data from odometer. Then will be able to determine the actual position of the vehicle with high precision. Position between stops will be sent every 20 s around the stops frequency will increase to 10 s. While the OBU registers PT vehicle position continuously, it communicates with the control centre with the above frequency. [2] This helps to locate PT vehicles more accurately within bus stops and register bus stop arrivals and departures. This helps with calculating travel time between stops and updating the passenger information system (fig. 2). Once application knows bus stop arrival and departure time, it can calculate the speed.



Fig. 2. Passenger Information System variable message board at bus stop (source: mobilnagdynamia.pl)

Information about the location of vehicles is also used in traffic control systems in order to enable the provision of vehicles priority at intersections with traffic lights. Priority in traffic has an impact on increasing the traffic flow and increase the average speed of public transport vehicles operating in areas of ITS systems.

There are several standard methods for detection of vehicles in traffic control systems, that include the priorities in traffic lights at intersections, Loops (or other type of sensors embedded in the road lane) and responder which is installed on the chassis of the public transport vehicle to detect the vehicle are normally used [9]. Responder gives the characteristic disturbance of the magnetic field of loops, allowing to inform the signal controller about impending vehicle and can realize established for him priority.

Another way to detect a vehicle within the intersection is the optical method, which resembles a flowchart of the crossovers tramway control method via infrared. This method is most commonly used in the US and Japan. Vehicles that are to receive priority signal, report the need with a signal light to the signal detectors [1]. The most advanced type of vehicle detection is a method uses radio including GPS position (fig. 3). The vehicle sends information to the controller via radio waves that is located within the previously designated point with an accuracy of approx. 15 m [2].

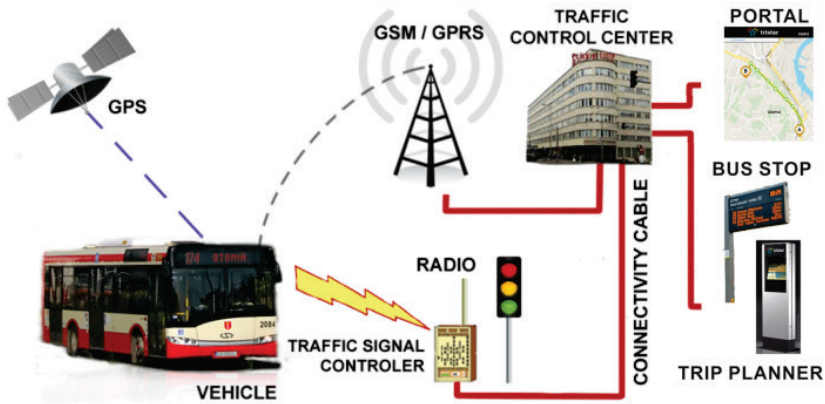


Fig. 3. Scheme of the communication and data transfer [20]

The location of PT vehicle is analysed by OBU with use of GPS. Communication between the vehicle and the controller is carried out by sending a telegram (the information) using short-range radio without the need for additional equipment. Communication is always initiated by the OBU. If no response is detected, then after 3 s, the computer repeats the request until receipt of the response, but not more than 3 times [2]. Information on actual departures from bus stops can be passed on to open data using open protocols. Thanks to this, it is possible to create mobile applications by independent creators.

4. Average Vehicle Speed Estimation

The speed of public and private vehicles depends on a number of factors, some of which cannot be parameterized. The most common factors for estimating speed are: distance, traffic volume, volume-capacity ratio, and technical class of road. Based on the data obtained from the Traffic Control System (one of the component of TRISTAR system) for road sections class G 2/2 (dual carriageway with two lanes in each direction) in time period from 4.00 am – 11.00 pm, the distribution of average speed variability was derived. Analysis of the results showed that vehicles move slowly during the afternoon peak hours (3.00 pm – 5.00 pm) with varying average speeds during the morning peak. By comparing the speed distribution with daily traffic volumes we can see that as traffic density increases, the average speed of public transport vehicles decreases. This is particularly visible in the peak hours mentioned above. In addition, the speed was broken by buses and trolleybuses for the same sections to find differences, if any. The results show (fig. 4):

- variability of the average speed for each hour (up to 23%)
- lower average speed of trolleybuses relative to buses (about 5%).

The lower trolleybus speed can be explained by the need to maintain the OCL (overhead contact line), small radius curves, reduced speed when passing through switches and inability to overtake other trolleybuses [17].

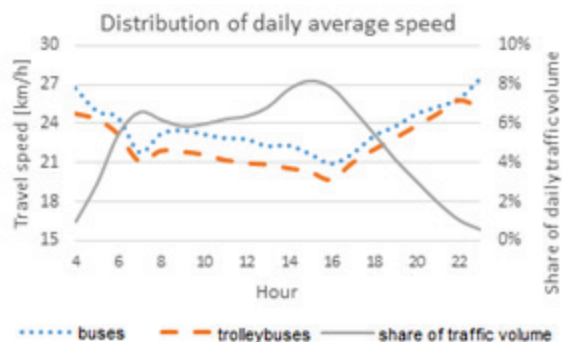


Fig. 4. Distribution of daily average speed [17]

The complexity of the problem of estimating the speed and travel time of public transport vehicles can be seen when trying to establish the relationship between these variables, and, e.g. traffic volume Q or volume-capacity ratio Q/C . TRISTAR traffic light parameters were included in capacity calculations (primarily the share of green light). By including the effects of Q/C on average travel time between stops, the effects of time lost at junctions on travel time were also included. Using regression, a mathematical function was fitted to empirical data from the traffic control system's GPS data and the correlation coefficient R^2 was determined for travel speed on sections between stops in relation to the volume-capacity ratio. The resulting relationship is shown in fig. 5. The function of travel



time depending on the distance and the average total time of bus stop service has a degree of compliance at the level of $R^2=0.49$. The function parameters were adjusted to empirical data: travel time between bus stops and traffic volume for each section (from the ITS system). Finally, the following relationship defining the average speed of travel between bus stops is:

$$V_{av} = 24,89 \cdot 0,27 \left(\frac{Q}{C}\right)^{3,3} \quad (1)$$

where:

V_{av} – average speed of travel between bus stops [km/h] including time lost at junctions

Q – traffic volume [veh/h]

C – capacity [veh/h].

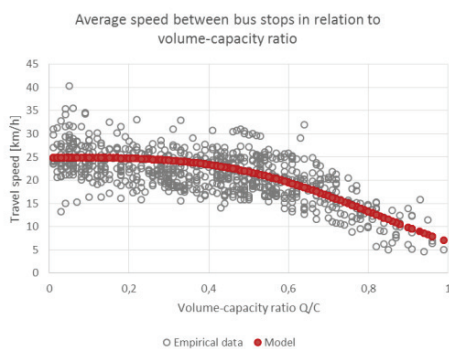


Fig. 5. Average speed between bus stops in relation to volume-capacity ratio [17]

In order to determine the average speed of travel and minimize the impact of additional mostly random factors, a statistical tool was used, which is the stem-and-leaf. The average speed of travel for each of the volume-capacity ratios was determined with range breadth of 0.01 (fig. 6). As a result, the model was applied to the function (1). The coefficient of R^2 value determination was obtained at 0.84 [17].

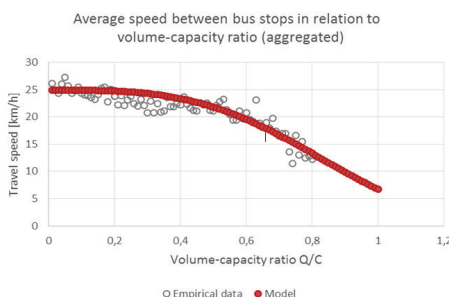


Fig. 6. Average speed between bus stops in relation to volume-capacity ratio (aggregated) [17]

5. Conclusions

The application of ITS solutions allows for the development of new study methodology and models that account for earlier gaps, however changes must also refer to the organisation and content of databases in companies as well as adopting a data supplementing method, and the appointing of a unit collecting such data. These technologies should be used in both the urban infrastructure and in vehicles. ITS solutions as presented in the paper, can be an integral part of planning, implementing and operating urban transport management measures contributing to improve the level of safety and reliability of transport systems.

GPS technique offers a relatively simple and effective way of determining public transport speeds. Previous studies, however, did not look at how the speed profile changes depending on the current traffic conditions. The use of section or junction capacity will have an effect on instantaneous speed and service time at stops. When section saturation is high, merging into traffic from a bus bay may be difficult. In this case, the speed graph in relation to distance travelled is less steep, which suggests lower acceleration at the start. Therefore, a detailed analysis should be conducted of the location of stops and its impact on the required speed, depending on traffic volume.

From a planning and policy perspective the study of route choice behaviour over time and its relationship between infrastructure and paths characteristics may help to develop new strategies that are more dynamic and new transport solutions capable to meet travellers needs.

6. References

1. Adamski A.: Priorytetowe sterowanie w transporcie publicznym z wykorzystaniem metod PIACON-DISCON. *Transport Miejski i Regionalny*, 4/2006, Kraków 2006.
2. Birr K., Oskarbski J., Żarski K.: Module of priorities for public transport vehicles in the TRISTAR system. *Logistyka*, 4/2014, Poznań 2014.
3. Cardoso F., Serrador A., Canas T.: Algorithms for Road Safety Based on GPS and Communications Systems WAVE. *Procedia Technology*, vol. 17, 2014, <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.187>
4. Ciscal-Terry W., Dell'Amico M., Hadjidimitriou N. S., Iori M.: An analysis of drivers route choice behaviour using GPS data and optimal alternatives. *Journal of Transport Geography*, vol. 51, 2016, <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.12.003>
5. Crainic T.G., Gendreau M., Potvin J.Y.: Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C*, no. 17, 2009.



6. Dubey P. P., Borkar P.: Review on techniques for traffic jam detection and congestion avoidance. 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems, ICECS, 2015, <http://doi.org/10.1109/ECS.2015.7124941>
7. Gattuso D., Pellicanò D.S.: Advanced Methodological Researches Concerning ITS in Freight Transport. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, 2014.
8. Gentile G., Vigo D.: Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistics. *European Transport\ Trasporti Europei*, iss. 54, 2013.
9. Gondek S.: Uprzywilejowanie pojazdów komunikacji zbiorowej na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. *Transport Miejski i Regionalny*, nr 11, 2004.
10. Gonzalez-Feliu J., Routhier J.-L.: Modeling Urban Goods Movement: How to be Oriented with so Many Approaches? *Procedia – Social and Behavioral Science*, vol. 39, 2012.
11. Gupta A., Choudhary S, Paul S.: DTC: A framework to Detect Traffic Congestion by mining versatile GPS data. 1st International Conference on Emerging Trends and Applications in Computer Science (ICETACS), 2013.
12. Hoh B., Iwuchukwu T., Jacobson Q., Work D., Bayen A. M., Herring R., Herrera J. C., Gruteser M., Annavaram M., Ban J.: Enhancing Privacy and Accuracy in Probe Vehicle-Based Traffic Monitoring via Virtual Trip Lines. *IEEE Transactions On Mobile Computing*, vol. 11, iss. 5, 2012.
13. Jiménez-Meza A., Arámburo-Lizárraga J., de la Fuente E.: Framework for Estimating Travel Time, Distance, Speed, and Street Segment Level of Service (LOS), based on GPS Data. *Procedia Technology*, vol. 7, 2013, <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.008>
14. K.L.S.M.H.B.S.T., Thiagarajan A., Ravindranath L., Eriksson J.: VTrack: Accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Berkeley, California 2009.
15. Li M., Zhang L., Yang X.: A Review of Yellow Dilemma Problem and a Dynamic Speed Guidance System Design based on CVIS. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, 2013, <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.055>
16. Oliveira-Neto F., Chin S., Hwang H.: Assessing Temporal Effect of Economic Activity on Freight Volumes with Two-Period Cross-Sectional Data. *Transportation Research Record*, vol. 2285, iss. 2012, 2012.
17. Oskarbski J., Birr K., Miszewski M., Żarski K.: Estimating the average speed of public transport vehicles based on traffic control system data. *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, IEEE, 2015, <http://doi.org/10.1109/MTITS.2015.7223269>
18. Oskarbski J., Kaszubowski D.: Potential for ITS/ICT Solutions in Urban Freight Management. *Transportation Research Procedia*, vol. 16, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.041>



19. Oskarbski J.: Perspectives of Telematics Implementation in Tri-City Transport Systems Management and Planning. 11th International Conference on Transport Systems Telematics (TST 2011). Modern Transport Telematics. Communications in Computer and Information Science. Vol. 239, 2011, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-24660-9_27
20. Oskarbski, J., Zawisza, M., Żarski K.: The structure of the data flow in integrated urban traffic management systems – the case of TRISTAR system. Archives of Transport System Telematics, vol. 9, iss. 4, 2016.
21. Taniguchi E., Thompson R.G., Yamada T.: Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models. Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 39, 2012.
22. Vasantha Kumar S., Vanajakshi L.: Mode-wise travel time estimation on urban arterials using transit buses as probes. Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2011.
23. Velaga N.R., Pangbourne K.: Achieving genuinely dynamic road user charging: issues with a GNSS-based approach. Journal of Transport Geography, vol. 34, 2014, <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.013>
24. Yoon J., Noble B., Liu M.: Surface street traffic estimation in MobiSys. ACM, 2007.



WYKORZYSTANIE DANYCH Z SYSTEMU NAWIGACJI SATELITARNEJ W OPERACYJNYM I STRATEGICZNYM ZARZĄDZANIU TRANSPORTEM W MIASTACH

1. Wprowadzenie

ITS (Inteligentne Systemy Transportu) i ICT (technologie informatyczne i telekomunikacyjne, ang. *Information and Communication Technology*) są rodzajem środków, w zależności od dostępnych źródeł, kategoryzowanych na wiele sposobów. Komisja Europejska ITS definiuje, jako zaawansowane aplikacje dostarczające innowacyjne usługi związane z różnymi rodzajami transportu i zarządzaniem ruchem. Definicja ta może być podzielona na następujące szczegółowe systemy zarządzania transportem, w tym systemy informacji dla użytkowników, systemy zarządzania flotą i przewozami towarowymi, systemy zarządzania transportem zbiorowym, systemy automatycznego pobierania opłat, systemy sterowania ruchem oraz systemy zarządzania zdarzeniami [7]. Rozwiązania ITS integrują technologie telekomunikacyjne, elektroniczne i informatyczne z inżynierią transportu w celu planowania, obsługi, utrzymania i zarządzania systemami transportowymi. Należy podkreślić, że istotą ITS jest pozyskiwanie, przetwarzanie, a także rozpowszechnianie informacji w celu lepszego wykorzystania systemów transportowych, infrastruktury i usług [5]. Dlatego też, jakość danych wprowadzanych do systemów planowania ma kluczowe znaczenie, umożliwiając projektowanie usprawnień poprzez wykorzystanie wiarygodnych prognoz i wymiernych wyników.

Prawidłowe wdrożenie nowoczesnych technologii transportowych może doprowadzić do sytuacji, w której zarówno władze miasta, jak i operatorzy (np. przewoźników towarowych lub transportu zbiorowego) w równym stopniu osiągną swoje cele, poprawiając zarówno ogólną jakość usług, jak i efektywność systemu transportowego. Wdrożenie rozwiązań ITS w transporcie koniecznie wymaga zaawansowanego środowiska do planowania, jasnych celów i zaangażowania interesariuszy, zarówno z sektora publicznego, jak i prywatnego. Niektóre z tych wymogów wykraczają daleko poza kompetencje władz miejskich i dotyczą kształtowania polityki na poziomie krajowym. Powyższe środki powinny być egzekwowane, jako część złożonej koncepcji z dobrze zaplanowanym i dobrze zorganizowanym systemem wspierania działań, wykraczających poza wcześniej wdrożone rozwiązania. Stosowane technologie powinny być rozpoznane i zweryfikowane, a także

potwierdzone ekonomicznie przypadkami, w które angażowane były rzetelne podmioty prywatne [18].

Dane z GPS (Global Positioning System) są wykorzystywane przede wszystkim w systemach: sterowania ruchem, zarządzania transportem towarowym lub zbiorowym oraz informacyjnych dla użytkowników ruchu. Istnieje wiele obszarów, w których inteligentni agenci (IA) mogą stanowić podstawę miejskich systemów logistycznych, takich jak: określanie optymalnych tras dla pojazdów dostawczych w sieciach drogowych, dynamiczne wyznaczanie tras i harmonogramów, czy też określanie czasu trwania usługi. Opracowanie oprogramowania IA wymaga określenia wielu elementów systemu, w tym ról, interakcji, rodzajów agentów, celów i możliwości systemu. Zdarzenia są definiowane na podstawie przetworzonych danych pomiarowych (informacje uzyskane z otoczenia), a zlokalizowane czynniki są zdolne do wykonywania działań lub zadań [21]. Ta kategoria modeli jest często rozwijana w trzech etapach. Pierwszym krokiem jest identyfikacja rundy dostaw, przeprowadzana poprzez zdefiniowanie punktu wyjścia i różnych miejsc docelowych. Drugi krok pozwala na zdefiniowanie kolejności dostarczania w każdej rundzie przy użyciu metod empirycznych (w tym przypadku możliwe i uzasadnione jest wykorzystanie środków ITS, np. odczytów GPS). Narzędzia ITS są niezbędne w modelowaniu wykorzystującym oprogramowanie IA lub metody wieloagentowe, zapewniając opcje śledzenia pojazdów i lokalizowania ich w czasie i przestrzeni w celu modelowania ich zachowania [18].

Innym przykładem wykorzystania nawigacji satelitarnej jest system zarządzania transportem zbiorowym, który używa systemu GPS do rejestrowania lokalizacji pojazdów. Rozwiązania ITS dostarczają ponadto wiele rozwiązań narzędzi dyspozytorskich dla organizatorów transportu zbiorowego. Informacje o lokalizacji pojazdów znajdują również zastosowanie w systemach sterowania ruchem, w celu umożliwienia zapewnienia priorytetu dla pojazdów transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Podstawowym warunkiem funkcjonowania takich usług jest wyposażenie wszystkich pojazdów w urządzenia umożliwiające ich lokalizację w czasie rzeczywistym. Oprócz korzyści ze śledzenia lokalizacji pojazdów w czasie rzeczywistym, użyteczne są również dane historyczne o ich położeniu względem przystanków oraz skrzyżowań, co może być pomocne w modelowaniu transportu publicznego [17].

W części drugiej niniejszego opracowania przedstawiono przegląd literatury na temat badań dotyczących wykorzystania GPS w planowaniu i zarządzaniu transportem. Następnie zaprezentowano możliwości wykorzystania GPS w zarządzaniu transportem publicznym i sterowaniu ruchem. W czwartej części zostały przedstawione przykładowe badania dotyczące modelowania średniej prędkości pojazdów transportu zbiorowego, z wykorzystaniem danych pochodzących ze Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem TRISTAR wdrożonego w latach 2012-2015 w Trójmieście [19], a w części piątej przedstawiono wnioski.



2. Przykłady badań z zastosowaniem GPS w logistyce miejskiej

Lokalizacja i śledzenie przemieszczeń za pomocą urządzeń GPS wniosło do inżynierii transportu nową perspektywę gromadzenia informacji o pojazdach. Urządzenia te zbierają dane GPS, w tym identyfikator urządzenia, współrzędne lokalizacji, czas, prędkość i długość podróży. Informacje te mogą być zapisywane w urządzeniu w celu umożliwienia późniejszej analizy, mogą być wykorzystywane w pojazdach do systemów analitycznych pojazdów lub wysyłane do serwera w celu ich natychmiastowego przetworzenia i wykorzystania w czasie rzeczywistym.

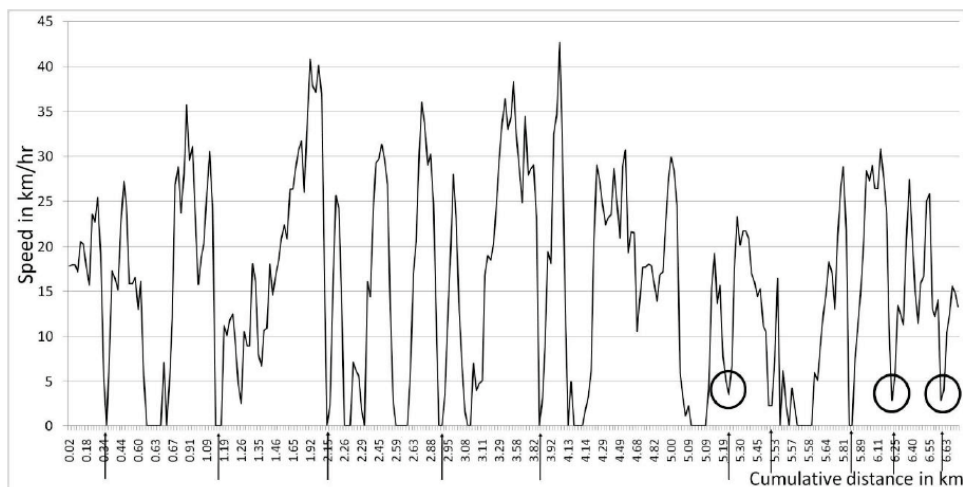
Przykładowo dane można użyć do zobrazowania dynamiki pojazdów w miastach, poprzez symulacje mikro i makroskopowe, w celu oszacowania charakterystyk potoku ruchu i czasu podróży. Dla obiektu, jakim jest odcinek drogi średnia prędkość została wykorzystana do obliczenia poziomu warunków ruchu (LOS – Level of Service) i scharakteryzowania odcinków ulic za pomocą LOS i miar sprawności ruchu [13]. W ramach studium przypadku przeanalizowano zbiór 1012 śladów GPS zebranych w Pekinie w Chinach. Zebrane dane o trajektoriach dotyczyły 90 minut jazdy taksówki. Przeprowadzone badania wykazały, że wykorzystanie tylko trzech pól danych GPS, pozwala na oszacowanie charakterystyk, dotyczących ruchu poszczególnych pojazdów i wykorzystanie danych do scharakteryzowania odcinków ulic pod względem średnich prędkości jazdy i odpowiadających im zmianom poziomu warunków ruchu .

Badania prędkości autobusów w ruchu z wykorzystaniem GPS były prowadzone m.in. w Indiach przez Vasantha Kumar i Vanajakshi [22]. Ze względu na wiarygodność wyników, trasa autobusów o długości 15 km z 24 przystankami pośrednimi została podzielona na 500 m odcinki w celu pomiaru prędkości autobusów. Przy określaniu długości odcinka testowego należy uwzględnić wskazanie błędu pozycji GPS oraz lokalne warunki sieci drogowej, w szczególności odległość między skrzyżowaniami i skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną. Przykład wyników badań dla podróży autobusem pokazano na rys. 1, gdzie prędkość jest związana z długością przejechanej trasy.

Oś pozioma pokazuje położenie przystanków autobusowych. Ustalona przez GPS prędkość na przystankach oznaczonych okręgami nie zawsze jest równa zeru, ponieważ pojazd jest nieruchomy. Ma to związek z dokładnością ustawienia lokalizacji oraz częstotliwością i ciągłością pomiaru. Gdy autobus stoi na przystanku, prędkość mierzona w sąsiednich przedziałach pomiarowych jest interpolowana, co wyjaśnia wyniki.

Autorzy w [4] analizowali przestrzenną zależność pomiędzy lokalizacją źródła i celu podróży, a wyborem trasy z wykorzystaniem współrzędnych GPS, które umożliwiają zobrazowanie przebiegu tras pokonanych przez badaną próbę kierowców. Badanie wykazało, że większe odchylenia od optymalnych tras alternatywnych, odnoszą się do tych, które wiążą się z wyborem połączeń w sieci drogowej, umożliwiających przemieszczanie się z większą prędkością, co sugeruje, że infrastruktura drogowa ma wpływ na wybór trasy. Podczas opracowywania modeli ruchu należy uwzględnić różne założenia, a w celu uzyskania miarodajnych wyników należy wykorzystywać duże zbiory danych.





Rys. 1. Prędkość – odległość wykres dla przejazdu autobusu [22]

Dane z GPS mogą być również wykorzystywane do poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego poprzez rozwiązania z obszaru ITS. Algorytmy wykorzystujące dane z GPS zostały przedstawione w [3]. Wyniki badań pokazują możliwość wykorzystania danych do przewidywania i unikania wypadków drogowych. Przykładowo w [15] przedstawiono propozycję systemu dynamicznego sterowania prędkością w ramach CVIS (Cooperative Vehicle Infrastructure System – System Pojazdów Współpracujących), który ma kluczowe znaczenie w poprawie bezpieczeństwa ruchu. Wykorzystanie GPS w dynamicznym naliczaniu opłat od użytkowników dróg zostało przedstawione w [23]. Szerokie zastosowanie urządzeń GPS w pojazdach pozwala na zbieranie danych o ruchu drogowym i wykrywanie informacji o zatorach drogowych (np. z pojazdów testowych [24] telefonów komórkowych [11,14], smartfonów [12]). GPS jest zatem przydatnym rozwiązaniem, umożliwiającym wykrywanie zatorów drogowych, ponieważ jest tańszy i pozwala na monitorowanie całej sieci drogowej. Dostarczone dane wspomagają diagnozę zatłoczenia sieci ulicznej oraz mogą być stosowane w metodach i środkach umożliwiających unikanie miejsc zatłoczonych [6].

Dane GPS mogą być również wykorzystywane do modelowania transportu ładunków. W celu przeprowadzenia analiz z uwzględnieniem innych czynników (np. zakłócenia systemu transportu z powodu klęsk żywiołowych, transportu intermodalnego i decyzji politycznych) mających wpływ na system transportu towarów, analitycy potrzebują danych z różnych obszarów geograficznych i w różnych okresach czasu. Metoda empiryczna, odzwierciedlająca związek między działalnością gospodarczą a ruchem towarowym obejmuje opracowanie modeli generowania ładunków, podobnych do koncepcji modelowania generacji ruchu na potrzeby planowania miejskiego [16].

Zakres danych niezbędnych do modelowania przewozów towarowych jest również związany z zastosowaną techniką i metodyką modelowania. Oszacowanie popytu na

podróże i generacji podróży jest pierwszym etapem konwencjonalnego czterostopniowego procesu modelowania transportu. Celem tego etapu jest określenie liczby podróży, które są generowane i absorbowane w poszczególnych rejonach transportowych badanego obszaru. Modelowanie popytu na transport towarowy z uwzględnieniem lokalizacji rejonów transportowych, generujących ruch pojazdów ciężkich i pojazdów dostawczych wymaga zebrania danych społeczno-ekonomicznych i danych o zagospodarowaniu przestrzennym rejonów oraz miejsc początku i końca podróży. Podejście to może być stosowane w modelowaniu niektórych kategorii transportu towarowego, takich jak handel elektroniczny lub przesyłki kurierskie [10]. W pracy [8] przedstawiono modele opracowane analogicznie do modeli podróży pasażerskich, które pozwalają na obliczenie liczby podróży generowanych w badanym rejonie transportowym i następnie estymowanie macierzy źródło-cel (O-D) towarów.

Druga kategoria modeli transportu ładunków uwzględnia w sposób bardziej szczegółowy łańcuchy podróży lub trasy. Modele te opisują jednocześnie rozkład podróży pomiędzy rejonami transportowymi lub określonymi lokalizacjami w sieci transportowej. Technologie ITS wspierane technikami GPS są przydatne w modelowaniu poprzez wykorzystanie oprogramowania IA lub metody wieloagentowej, zapewniając opcje śledzenia pojazdów i lokalizowania ich w czasie i przestrzeni w celu odzwierciedlenia ich zachowania. Modele te wykorzystują przejazd, jako jednostkę i jednocześnie wykorzystują format sekwencyjny [10]. Przeprowadzając typologiczną i statystyczną analizę przejazdów, możliwe jest powiązanie przepływów towarów z poszczególnymi pojazdami i organizacjami, które zajmują się transportem ładunków (bezpośrednie śledzenie). W takim przypadku do zdefiniowania tych relacji stosuje się na ogół podejście regresji matematycznej [18].

Rozwój modeli transportowych wymaga gromadzenia danych wielozgałęziowych (np. danych prywatnych), często trudnych do pozyskania lub nieosiągalnych bez dostępu do źródeł informatycznych. Dotyczy to również modelowania transportu towarowego, które często wymaga szczegółowych informacji nie tylko na poziomie rejonu transportowego, ale także na poziomie odcinka drogi (np. w przypadku parkowania samochodów dostawczych) lub danej lokalizacji. Techniki GPS mogą pomóc w wypełnieniu tej luki.

3. Zastosowanie danych GPS w zarządzaniu publicznym transportem zbiorowym

Oprócz danych o ruchu wszystkich pojazdów na drodze, systemy ITS są w stanie dostarczyć dane o lokalizacji pojazdów transportu publicznego (PT). Dane te można podzielić na dwa rodzaje: pierwszy to lokalizacja pojazdu pozyskana za pomocą nawigacji satelitarnej na odcinkach między przystankami, a drugi to lokalizacja pojazdu w punktach zgłoszeniowych służących do nadawania priorytetu pojazdom transportu publicznego na skrzyżowaniach ze sygnalizacją świetlną.



Systemy ITS umożliwiają zastosowanie wielu rozwiązań w zakresie narzędzi dyspozytorskich dla organizatorów transportu publicznego. Komputer (jednostka pokładowa – OBU) zainstalowany w każdym pojeździe może być wyposażony w odbiornik GPS, modem radiowy GSM i radio krótkiego zasięgu. Podczas jazdy komputer może informować kierowcę m.in. o odchyleniach w stosunku do rozkładu jazdy.

Informacja o lokalizacji pojazdu transportu publicznego jest przydatna nie tylko dla organizatorów (dyspozytorów) i przewoźników, ale również dla pasażerów transportu publicznego. Podstawowym sposobem informowania pasażerów o aktualnej pozycji pojazdu na trasie jest system informacji pasażerskiej (SIP), wykorzystujący dynamiczne tablice informacyjne dla pasażerów zlokalizowane na przystankach, wyświetlające szacowany na bieżąco czas odjazdu pojazdu. Drugim sposobem do przekazania tego rodzaju informacji jest Internet, dokładniej portale internetowe udostępniające informacje o czasie rzeczywistych odjazdów autobusów i tramwajów ze wszystkich przystanków w Trójmieście (jest to element zintegrowanego systemu zarządzania ruchem TRISTAR, wdrożony z końcem 2015 r.). To rozwiązanie umożliwia przekazywanie informacji nie tylko na tych, na których znajdują się dynamiczne tablice informacyjne. Ponadto stanowi ono uzupełnienie internetowych planerów podróży.

Wysyłanie informacji o pozycji pojazdu do serwera odbywa się za pomocą sieci GSM. Zakłada się, że dokładność lokalizacji pojazdu wyniesie 20 m, która może zostać zmniejszona w zależności od dokładności odbiornika GPS. Dane z odbiornika GPS mogą mieć różną dokładność (w zależności od liczby „widocznych” satelitów, zasięgu, siły sygnału itp.). Uzyskana z obliczeń lokalizacja może różnić się od rzeczywistej pozycji. Wówczas system jest wspomagany dodatkowymi algorytmami matematycznymi, wykorzystujące otrzymane dane GPS oraz dane z innych źródeł, jak na przykład z licznika kilometrów przejechanych przez pojazd od ostatniego przystanku. Pozycja pojazdu znajdującego się między przystankami wysyłana jest przez nadajnik zainstalowany w pojeździe, co 20 s, zaś w pobliżu przystanków, co 10 s. Jednocześnie OBU rejestruje pozycję pojazdu w sposób ciągły i komunikuje się z centrum sterowania z powyższą częstotliwością [2]. Pomaga to dokładniej zlokalizować pojazdy PT w obrębie przystanków autobusowych i rejestrować przyjazdy oraz odjazdy z przystanków autobusowych. Rozwiązanie to umożliwia dokładne obliczenie czasu przejazdu między przystankami i tym samym aktualizację informacji przekazywanej przez system informacji pasażerskiej (rys. 2). Ponadto na podstawie wspomnianych informacji możliwe jest obliczenie średniej prędkości przejazdu poszczególnych odcinków międzyprzystankowych.

Informacje o lokalizacji pojazdów są również wykorzystywane w systemach sterowania ruchem w celu umożliwienia przydzielenia pierwszeństwa przejazdu pojazdom transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Priorytet w ruchu ma wpływ na zwiększenie płynności ruchu oraz średniej prędkości pojazdów transportu publicznego działających w obszarach systemów ITS.



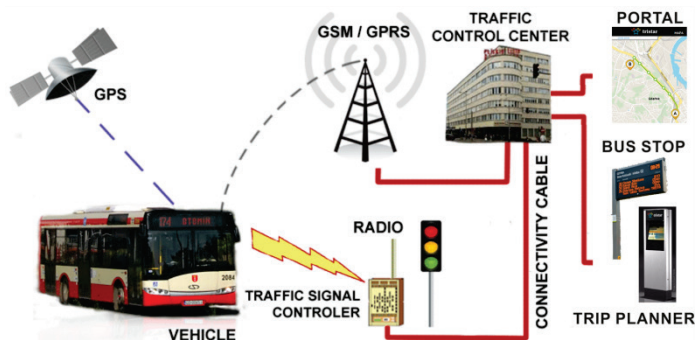


Rys. 2. Tablice zmiennej treści systemu informacji pasażerskiej na przystanku (źródło: mobilnagdynia.pl)

Istnieje kilka metod wykrywania pojazdów w systemach sterowania ruchem, które obejmują priorytety na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Podstawową i najpopularniejszą metodą jest instalacja pętli indukcyjnych (lub innych czujników osadzonych w pasie drogi) [9]. Pojazd, poprzez najechanie na pole objęte pętlą powoduje charakterystyczne zakłócenie pola magnetycznego pętli, wywołuje przesłanie informacji do sterownika sygnalizacji świetlnej o zbliżającym się pojeździe i przydzielić ustalone dla niego priorytety.

Innym sposobem na wykrycie pojazdu na skrzyżowaniu jest metoda optyczna, która działa na analogicznej zasadzie do metody sterowania zwrotnicami tramwajowymi przez nadajnik podczerwieni. Ta metoda jest najczęściej stosowana w USA i Japonii. Pojazdy, które mają otrzymać priorytetowy przejazd przez skrzyżowanie, zgłaszają potrzebę za pomocą światła sygnałowego do detektorów sygnału [1].

Najbardziej zaawansowanym typem wykrywania pojazdów jest metoda wykorzystująca radio bliskiego zasięgu, w tym pozycję GPS (rys. 3). Pojazd po pojawieniu się w ustalonym wcześniej punkcie, wysyła informacje do sterownika sygnalizacji świetlnej za pomocą fal radiowych [2].



Rys. 3. Schemat komunikacji i przesyłu danych pomiędzy pojazdem, sterownikiem i centrum sterowania z wykorzystaniem GPS i radia [2]

Lokalizacja pojazdu PT jest analizowana przez OBU przy użyciu GPS. Komunikacja między pojazdem a sterownikiem odbywa się poprzez wysłanie telegramu (informacji) za pomocą radia bliskiego zasięgu bez potrzeby dodatkowego działania ze strony prowadzącego pojazd. Komunikacja jest zawsze inicjowana przez OBU. Jeśli nie zostanie wykryta żadna odpowiedź, po 3 s komputer powtarza żądanie do momentu otrzymania odpowiedzi, ale nie więcej niż 3 razy [2]. Informacje na temat rzeczywistych odjazdów z przystanków autobusowych mogą być przekazywane do otwartych danych przy użyciu otwartych protokołów. Dzięki temu możliwe jest tworzenie aplikacji mobilnych przez niezależnych twórców.

4. Szacowanie średniej prędkości pojazdu

Na prędkość przejazdu zarówno pojazdów transportu zbiorowego, jak i indywidualnego wpływa wiele czynników, których sparametryzowanie nie raz nie jest możliwe. W oparciu o literaturę, przedstawioną również w niniejszym artykule, można zauważyć, że najczęściej wykorzystywanymi do szacowania prędkości czynnikami są: długość odcinka, natężenie ruchu drogowego, stopień wykorzystania przepustowości, klasa techniczna i przekrój.

Na podstawie danych uzyskanych z systemu sterowania ruchem dla odcinków klasy G o przekroju 2/2 (dwie jezdnie z dwoma pasami ruchu każda) dla przedziału godzin 4:00-22:59 uzyskano rozkład zmienności średniej prędkości dla całego tego okresu. Analiza otrzymanego wyniku wykazała, że najwolniej pojazdy poruszają się w godzinach szczytu popołudniowego (15–17), ale także w godzinie szczytu porannego (7–8) zaobserwować można istotną różnicę średniej prędkości. Zestawiając otrzymany rozkład prędkości z rozkładem dobowego natężenia ruchu drogowego można zauważyć, wraz ze wzrostem natężenia ruchu drogowego maleje średnia prędkość przejazdu pojazdów transportu zbiorowego. Zależność ta jest szczególnie zauważalna w godzinach szczytowych.

Dodatkowo przeprowadzono podział prędkości pomiędzy ruchem autobusowym i trolejbusowym dla tych samych odcinków dążąc do wykazania ewentualnych różnic. Otrzymane wyniki (rys. 4) wykazują:

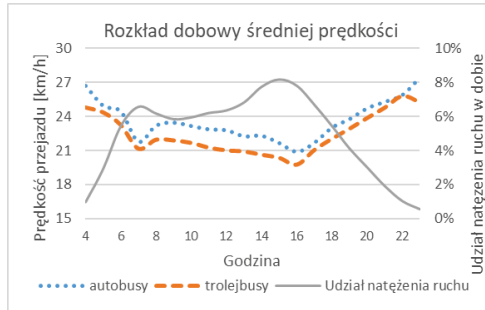
- zmienność średniej prędkości w dobie (do 23%).
- niższą średnią prędkość trolejbusów względem autobusów (o około 5%).

Prawdopodobnymi przyczynami niższej prędkości jazdy trolejbusów jest konieczność uwzględnienia sieci jezdnej podczas jazdy ze szczególnym uwzględnieniem zakrętów o małym promieniu, zmniejszonej prędkości przejazdu przez zwrotnice oraz brak możliwości wyprzedzania trolejbusu poprzedzającego [17].

Potwierdzeniem złożoności problemu szacowania prędkości oraz czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego jest próba znalezienia zależności pomiędzy tymi zmiennymi, a przykładowo natężeniem ruchu drogowego Q lub stopniem wykorzystania przepustowości Q/C . Stosując metodę regresji do danych empirycznych dopasowano



funkcję matematyczną oraz wyznaczono współczynnik korelacji R^2 dla prędkości na odcinkach między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości Q/C . Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Rozkład dobowy średniej prędkości przejazdu [17]

Wyznaczona funkcja zależności prędkości przejazdu od stopnia wykorzystania przepustowości charakteryzuje się stopniem zgodności na poziomie $R^2=0,49$. Parametry funkcji dopasowano względem wartości empirycznych czasu przejazdu pomiędzy przystankami oraz natężenia ruchu drogowego uzyskanych z systemu sterowania ruchem. Ostatecznie otrzymano następującą zależność wyznaczającą średnią prędkość przejazdu pomiędzy przystankami:

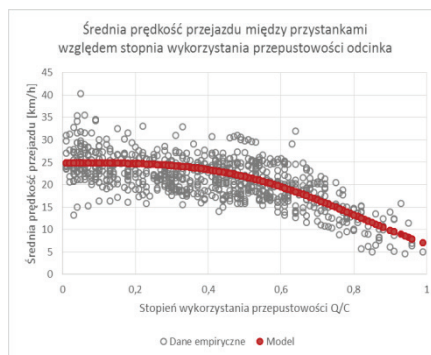
$$V_{av} = 24,89 \cdot 0,27 \left(\frac{Q}{C}\right)^{3,3} \quad (1)$$

gdzie:

V_{av} – średnia prędkość przejazdu między przystankami [km/godz.]

Q – natężenie ruchu drogowego [poj/godz.]

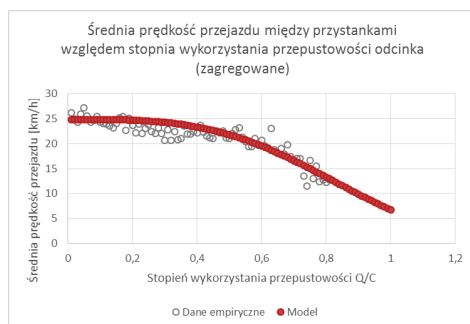
C – przepustowość odcinka [poj/godz.].



Rys. 5. Średnia prędkość przejazdu między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości odcinka [17]



Dążąc do wyznaczenia średniej prędkości przejazdu z minimalizacją wpływu dodatkowych czynników, głównie losowych zastosowano narzędzie statystyczne, jakim jest szereg rozdzielczy i wyznaczono średnią prędkość przejazdu dla każdego ze stopni wykorzystania przepustowości z rozpiętością przedziału wynoszącą 0,01. Na otrzymane wyniki naniesiono wartości modelowe wyznaczone funkcją (1). Stopień dopasowania R^2 wartości modelowych do otrzymanych w ten sposób uśrednionych wartości wynosi 0,84 [17].



Rys. 6. Średnia prędkość przejazdu między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości odcinka (zagregowane) [17]

5. Podsumowanie

Zastosowanie rozwiązań ITS pozwala na opracowanie nowej metodologii badań i budowy zależności matematycznych na podstawie pozyskanych danych, uzupełniając tym samym dotychczasowe luki w dostępie do informacji. W tym celu niezbędne jest jednak pozyskiwanie takich danych przez poszczególne podmioty odpowiadające za zarządzanie i organizację transportu. Opisane w niniejszej pracy rozwiązania technologiczne powinny być stosowane zarówno w infrastrukturze miejskiej, jak i w pojazdach. Ponadto przedstawione rozwiązania ITS mogą stanowić integralną część planowania, wdrażania i obsługi środków zarządzania transportem miejskim, przyczyniając się do poprawy poziomu bezpieczeństwa i niezawodności systemów transportowych.

Technika GPS oferuje stosunkowo prosty i skuteczny sposób określania prędkości transportu publicznego. Dotychczasowe badania dotyczące prędkości przejazdu pojazdów transportu zbiorowego nie obejmowały zmian profilu prędkości w zależności od aktualnych warunków ruchu. Tymczasem stopień wykorzystania przepustowości odcinka drogowego ma istotny wpływ na czas przejazdu pojazdu transportu zbiorowego, uwzględniając również związane z tym utrudnienie włączenia się do ruchu w trakcie opuszczania przystanku.

Z perspektywy planowania transportu, prowadzenia polityki transportowej, badanie czasu i prędkości przejazdu pojazdów transportu zbiorowego może stanowić element oceny



atrakcyjności transportu zbiorowego, a także zaspokojenia oczekiwań podróżnych dotyczących oferty przewozowej.

6. Literatura

1. Adamski A.: Priorytetowe sterowanie w transporcie publicznym z wykorzystaniem metod PIACON-DISCON. *Transport Miejski i Regionalny*, 4/2006, Kraków 2006.
2. Birr K., Oskarbski J., Żarski K.: Module of priorities for public transport vehicles in the TRISTAR system. *Logistyka*, 4/2014, Poznań 2014.
3. Cardoso F., Serrador A., Canas T.: Algorithms for Road Safety Based on GPS and Communications Systems WAVE. *Procedia Technology*, vol. 17, 2014, <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.187>
4. Ciscal-Terry W., Dell'Amico M., Hadjidimitriou N. S., Iori M.: An analysis of drivers route choice behaviour using GPS data and optimal alternatives. *Journal of Transport Geography*, vol. 51, 2016, <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.12.003>
5. Crainic T.G., Gendreau M., Potvin J.Y.: Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C*, no. 17, 2009.
6. Dubey P. P., Borkar P.: Review on techniques for traffic jam detection and congestion avoidance. 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems, ICECS, 2015, <http://doi.org/10.1109/ECS.2015.7124941>
7. Gattuso D., Pellicanò D.S.: Advanced Methodological Researches Concerning ITS in Freight Transport. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, 2014.
8. Gentile G., Vigo D.: Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistics. *European Transport\ Trasporti Europei*, iss. 54, 2013.
9. Gondek S.: Uprzywilejowanie pojazdów komunikacji zbiorowej na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. *Transport Miejski i Regionalny*, nr 11, 2004.
10. Gonzalez-Feliu J., Routhier J.-L.: Modeling Urban Goods Movement: How to be Oriented with so Many Approaches? *Procedia – Social and Behavioral Science*, vol. 39, 2012.
11. Gupta A., Choudhary S, Paul S.: DTC: A framework to Detect Traffic Congestion by mining versatile GPS data. 1st International Conference on Emerging Trends and Applications in Computer Science (ICETACS), 2013.
12. Hoh B., Iwuchukwu T., Jacobson Q., Work D., Bayen A. M., Herring R., Herrera J. C., Gruteser M., Annavaram M., Ban J.: Enhancing Privacy and Accuracy in Probe Vehicle-Based Traffic Monitoring via Virtual Trip Lines. *IEEE Transactions On Mobile Computing*, vol. 11, iss. 5, 2012.
13. Jiménez-Meza A., Arámburo-Lizárraga J., de la Fuente E.: Framework for Estimating Travel Time, Distance, Speed, and Street Segment Level of Service



- (LOS), based on GPS Data. *Procedia Technology*, vol. 7, 2013, <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.008>
14. K.L.S.M.H.B.S.T., Thiagarajan A., Ravindranath L., Eriksson J.: VTrack: Accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Berkeley, California 2009.
 15. Li M., Zhang L., Yang X.: A Review of Yellow Dilemma Problem and a Dynamic Speed Guidance System Design based on CVIS. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, 2013, <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.055>
 16. Oliveira-Neto F., Chin S., Hwang H.: Assessing Temporal Effect of Economic Activity on Freight Volumes with Two-Period Cross-Sectional Data. *Transportation Research Record*, vol. 2285, iss. 2012, 2012.
 17. Oskarbski J., Birr K., Miszewski M., Żarski K.: Estimating the average speed of public transport vehicles based on traffic control system data. *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, IEEE, 2015, <http://doi.org/10.1109/MTITS.2015.7223269>
 18. Oskarbski J., Kaszubowski D.: Potential for ITS/ICT Solutions in Urban Freight Management. *Transportation Research Procedia*, vol. 16, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.041>
 19. Oskarbski J.: Perspectives of Telematics Implementation in Tri-City Transport Systems Management and Planning. *11th International Conference on Transport Systems Telematics (TST 2011). Modern Transport Telematics. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 239, 2011, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-24660-9_27
 20. Oskarbski, J., Zawisza, M., Żarski K.: The structure of the data flow in integrated urban traffic management systems – the case of TRISTAR system. *Archives of Transport System Telematics*, vol. 9, iss. 4, 2016.
 21. Taniguchi E., Thompson R.G., Yamada T.: Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, 2012.
 22. Vasantha Kumar S., Vanajakshi L.: Mode-wise travel time estimation on urban arterials using transit buses as probes. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, 2011.
 23. Velaga N.R., Pangbourne K.: Achieving genuinely dynamic road user charging: issues with a GNSS-based approach. *Journal of Transport Geography*, vol. 34, 2014, <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.013>
 24. Yoon J., Noble B., Liu M.: Surface street traffic estimation in MobiSys. *ACM*, 2007.