Verkehrsdynamik und -simulation

SS 2024, Lösungsvorschläge zu Übung Nr. 2

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 2.1: Datenarten

(a) Was kann man mit FCD rekonstruieren?

- Trajektorien (Orts-Zeit-Linien) einzelner Fahrzeuge ✓
- Orte und Zeiten von Spurwechseln (***NIXDA*** **!!**)
- Verkehrsdichte ***NIXDA*** **!!**
- Verkehrsfluss ***NIXDA*** **!!**
- Geschwindigkeit ✓
- Länge von Staus und Lage von Staufronten ✓
- Reisezeit ✓

GPS-Daten beinhalten Orte und Zeiten, außerdem (anonymisiert) eine ID des absendende Fahrzeugs. Durch Verbinden der Orts-Zeit-Koordinaten kann man für diese Fahrzeuge **Trajektorien** konstruieren und durch die Steigung im Raum-Zeit-Diagramm auch **Geschwindigkeiten** ermitteln. Niedrige Geschwindigkeiten (z.B. 30 km/h) auf der Autobahn kann man i.A. als Indiz für einen **Stau** werten. Da Orte und Zeiten bekannt sind, erhält man auch (zumindest bei hinreichenden Ausstattungsgrad) die **Länge von Staus** sowie die **Lage der Staufronten**. Wegen der Genauigkeit von etwa 10 m sind **keine Fahrstreifenwechsel** detektierbar, außer man hat Differential-GPS mit einer Genauigkeit von wenigen cm. Da auch der Ausstattungsgrad (der Anteil von sendenden Fahrzeugen) nicht bestimmbar ist, kann man von der Dichte der Trajektorien **keine Verkehrsdichte** rekonstruieren und damit wegen "Fluß = Dichte mal Geschwindigkeit" auch **keinen Fluss**.

Auch FCD von Nutzfahrzeugen haben trotz ihrer nichtrepräsentativen Höchstgeschwindigkeiten ihren Wert, denn im Stau (dann wenn die Daten wichtig sind) "sind alle gleich".

Besonders wichtig: FCD werden im Prinzip überall erhoben, wo Autos fahren, also auch auf Umleitungsstrecken von Autobahnen, wo es in der Regel keine Detektoren gibt, oder auf Stadtstraßen ohne Detektoren. Deshalb sind sie für eine dynamische Routenempfehlung unverzichtbar!

(b) Generell sind auf Funkzellen basierende FPD heutzutage nicht mehr so relevant, da es immer mehr hochqualitativere FCD gibt. Aktuell sind jedoch bluetooth-basierte Erfassungsmethoden mit ähnlichen Charakteristiken sehr viel versprechend, so dass die Aufgabe nach wie vor relevant bleibt. Was kann man nun mit auf Funkzellenlokalisieung oder Bluetooth basierenden FPD rekonstruieren?

- Trajektorien (Orts-Zeit-Linien) einzelner Fahrzeuge ***NIXDA*** **!!**
- Orte und Zeiten von Spurwechseln ***NIXDA*** **!!**

- Verkehrsdichte ***NIXDA*** **!!**
- Verkehrsfluss ***NIXDA*** **!!**
- Geschwindigkeit (✓)
- Länge von Staus und Lage von Staufronten ✓
- Reisezeit ✓

Floating-Phone-Daten kommen nur zustande, wenn tatsächlich *telefoniert* wird; ein eingeschaltetes Mobiltelefon reicht nicht. "Glücklicherweise" wird aber gerade in Staus sehr viel telefoniert ("Hallo Schatzi! Du, ich steh im Stau"), so dass Daten verstärkt dann anfallen, wenn man sie braucht, um die Staulänge und Lage von Staufronten zu ermitteln. Wegen der fehlenden Genauigkeit kann man keine Trajektorien bestimmen und Geschwindigkeiten nur als Mittelwerte über mehrere hundert Meter oder km, was aber für Reisezeiten und die Staubestimmung völlig ausreicht.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 2.2: Daten-Aggregierung an einem Querschnitt

(a) Flüsse ($n_1 = 6, n_2 = 4, t_{\text{aggr}} = 30\,\text{s}$:

$$Q_1 = \frac{n_1}{\Delta t_{\text{aggr}}} = 0.2\,\text{Fz/s} = \underline{\underline{720\,\text{Fz/h}}}, \quad Q_2 = \frac{n_2}{\Delta t_{\text{aggr}}} = 0.133\,\text{Fz/s} = \underline{\underline{480\,\text{Fz/h}}}.$$

Geschwindigkeiten:

$$V_1 = \frac{1}{n_1}\sum_\alpha v_{1\alpha} = \underline{\underline{25.8\,\text{m/s}}}, \quad V_2 = \frac{1}{n_2}\sum_\alpha v_{2\alpha} = \underline{\underline{34.0\,\text{m/s}}}.$$

(b) Da der Korrelationskoeffizient nach Annahme gleich Null ist, ist auch die Kovarianz $\text{Cov}(v_\alpha, \Delta t_\alpha) = 0$ und damit

$$\rho_1 = \frac{Q_1}{V_1} = \underline{\underline{7.74\,\text{Fz/km}}}, \quad \rho_2 = \frac{Q_2}{V_2} = \underline{\underline{3.92\,\text{Fz/km}}}.$$

(c) Dichte und Fluss durch einfache Summation:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = \underline{\underline{11.66\,\text{Fz/km}}}, \quad Q = Q_1 + Q_2 = \underline{\underline{1\ 200\,\text{Fz/h}}}.$$

Die Geschwindigkeit entweder mit der hydrodynamischen Beziehung oder durch das gewichtete *harmonische* Mittel (diese beiden Berechnungsarten sind identisch!):

$$V = \frac{Q}{\rho} = \frac{Q}{Q_1/V_1 + Q_2/V_2} = 28.5\,\text{m/s} = \underline{\underline{102.9\,\text{km/h}}}.$$

(d) Anteil $\underline{\underline{2/6 = 1/3}}$ auf der rechten Spur, 0 auf der linken, $\underline{\underline{2/10 = 1/5}}$ insgesamt. Da der Anteil aus Flüssen bestimmt wird (Zahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit), ergibt dies einen erwartungstreuen Schätzer für den Partial*fluss*, nicht der Partial*dichte* (letztere ist tendenziell höher, da die LKW tendenziell langsamer fahren).

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 2.3: Bestimmung makroskopischer Größen aus Einzelfahrzeug-Daten

Auf beiden Spuren ist der Bruttoabstand $\Delta x_\alpha = 60\,\mathrm{m}$ konstant. Die Fahrzeuge haben alle die gleiche Fahrzeuglänge $l = 5\,\mathrm{m}$. Die Geschwindigkeiten betragen

$$\begin{aligned} v_\alpha^{\mathrm{l}} &= 144\,\mathrm{km/h} = 40\,\mathrm{m/s}, \\ v_\alpha^{\mathrm{r}} &= 72\,\mathrm{km/h} = 20\,\mathrm{m/s}. \end{aligned}$$

(a) **Zeitlücken** Die (Brutto-)Zeitlücken $\Delta t_\alpha = \Delta x_\alpha / v_\alpha$ betragen

$$\begin{aligned} \Delta t_\alpha^{\mathrm{l}} &= \frac{60\,\mathrm{m}}{40\,\mathrm{m/s}} = 1.5\,\mathrm{s}, \\ \Delta t_\alpha^{\mathrm{r}} &= \frac{60\,\mathrm{m}}{20\,\mathrm{m/s}} = 3.0\,\mathrm{s} \end{aligned}$$

Die Nettozeitlücken T_α ergeben sich daraus, indem man die Zeit für die Überfahrt der Eigenlänge des Vordermanns $l_{\alpha-1}$ abzieht,

$$T_\alpha = \Delta t_\alpha - \frac{l_{\alpha-1}}{v_{\alpha-1}}. \tag{1}$$

Da die Fahrzeuglängen identisch sind, ergibt sich einfach

$$\begin{aligned} T_\alpha^{\mathrm{l}} &= \frac{60-5}{40} = 1.375\,\mathrm{s}, \\ T_\alpha^{\mathrm{r}} &= \frac{60-5}{20} = 2.75\,\mathrm{s}. \end{aligned}$$

(b) **Makrogrößen** Zunächst berechnen wir die makroskopischen Größen Fluss Q, Belegung O und Geschwindigkeit V für jede Spur. Das Aggregationsintervall betrage $\Delta t = 60\,\mathrm{s}$ (Minutenwerte).

- **Fluss:** Hier gilt wegen der stationären und homogenen Verkehrsverhältnisse für beide Fahrstreifen $Q = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t_\alpha}$, also

$$\begin{aligned} Q^{\mathrm{l}} &= \frac{1}{\Delta t_\alpha^{\mathrm{l}}} = \frac{1}{1.5\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{2\,400\,\mathrm{Fz/h}}}, \\ Q^{\mathrm{r}} &= \frac{1}{\Delta t_\alpha^{\mathrm{r}}} = \frac{1}{3.0\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{1\,200\,\mathrm{Fz/h}}} \end{aligned}$$

- **Belegung:** Hier gilt analog wegen der stationären und homogenen Verkehrsverhältnisse für beide Fahrstreifen:

$$O = \frac{\Delta N\ (\Delta t_\alpha - T_\alpha)}{\Delta t} = \frac{\Delta t_\alpha - T_\alpha}{\Delta t_\alpha},$$

also

$$\begin{aligned} O^{\mathrm{l}} &= \frac{0.125}{1.5} = \underline{\underline{0.083}} = \underline{\underline{8.3\%}}, \\ O^{\mathrm{r}} &= \frac{0.25}{3.0} = \underline{\underline{0.083}} = \underline{\underline{8.3\%}} \end{aligned}$$

- **Geschwindigkeitsmittel:** Für das arithmetisches Mittel gilt

$$\begin{aligned} V^{\mathrm{l}} &= \frac{1}{\Delta N^{\mathrm{l}}} \sum_\alpha v_\alpha^{\mathrm{l}} = \underline{\underline{144\,\mathrm{km/h}}}, \\ V^{\mathrm{r}} &= \frac{1}{\Delta N^{\mathrm{r}}} \sum_\alpha v_\alpha^{\mathrm{r}} = \underline{\underline{72\,\mathrm{km/h}}}. \end{aligned}$$

Wegen der homogenen Verhältnisse kann man das auch direkt aus den konstanten Einzelgeschwindigkeiten schließen. Außerdem ist es hier gleich dem harmonischen Mittel.

- **Gesamtwerte und Mittelwerte über beide Fahrstreifen:** Hierbei muss man *extensive* Größen unterscheiden, welche sich mit den Fahrstreifen summieren (Fluss, Dichte), bei denen also Gesamtgrößen (Index "tot") und spurgemittelte Größen (ohne Index) sinnvoll sind und *intensive* Größen, bei denen nur mit extensiven Größen gewichtete Mittelwerte über die Fahrstreifen sinnvoll sind (Geschwindigkeit, Belegung).

Fluss:

$$Q_{\mathrm{tot}} = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta N^{\mathrm{l}} + \Delta N^{\mathrm{r}}}{\Delta t} = \underline{\underline{3\,600}} Fz/h, \quad Q = \frac{Q_{\mathrm{tot}}}{2} = \underline{\underline{1\,800}} Fz/h/Spur. \tag{2}$$

- Belegung:

$$O = O^{\mathrm{l}} = O^{\mathrm{r}} = \underline{\underline{0.083}}. \tag{3}$$

- Arithmetisches Geschwindigkeitsmittel:

$$V = \frac{1}{\Delta N} \sum_\alpha v_\alpha = \frac{40 \cdot 40 + 20 \cdot 20}{60} = 120 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}. \tag{4}$$

- Harmonisches Geschwindigkeitsmittel:

$$V_{\mathrm{H}} = \frac{\Delta N}{\sum 1/v_\alpha} = \frac{60}{\frac{40}{40} + \frac{20}{20}} = 108 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}. \tag{5}$$

Das harmonische Mittel ist also das arithmetische Mittel der Spurgeschwindigkeiten. Das arithmetische Mittel liegt höher, weil in einem Aggregationsintervall Δt mehr schnelle Fahrzeuge den Querschnitt überfahren. Dieser statistische Effekt (der Zeitmittelung) führt zu einer systematischen Verschiebung.

(c) **Geschwindigkeitsvarianz** Die Geschwindigkeitsvarianz innerhalb der Spuren ist =0. Die Varianz θ zwischen der linken und rechten Spur beträgt

$$\begin{aligned} \theta &= \left\langle (v_\alpha = \langle v_\alpha \rangle)^2 \right\rangle \\ &= \frac{1}{60} \left(40[40 - 33.3]^2 + 20[20 - 33.3]^2 \right) \\ &= 88.9 \frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^2}. \end{aligned}$$