מודלים חישוביים, חישוביות וסיבוכיות | 67521

הרצאות | פרופ׳ אורנה קופרמן

כתיבה | נמרוד רק

תשפ״ג סמסטר א׳

תוכן העניינים

שבוע $\mathbb{I}$ | מבוא לאוטומטים

הרצאה

חלק א' של ההרצאה

דוגמה נקפוץ לחלק האחרון של הקורס (סיבוכיות). בהינתן גרף לא מכוון $G=\langle V,E\rangle$, נרצה לדעת האם יש בו מעגל אוילר (כזה שעובר בכל צלע בדיוק פעם אחת).

אוילר הוכיח שיש מעגל כזה אם"ם דרגת כל הקודקודים זוגית, ולכן ניתן להכריע את הבעיה בזמן לינארית כי יש לבעיה אפיון מתמטי.

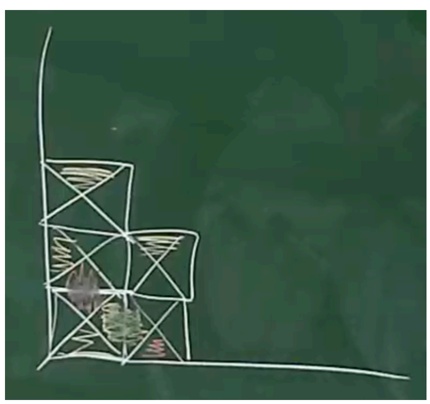
מעגל המילטון הוא מעגל שעובר בכל קודקוד בדיוק פעם אחת. לבעיה הזו אין אפיון מתמטי, והוכח שאין אלג' יותר טוב מאשר מעבר על כל האפשרויות, בסיבוכיות אקספוננציאלי.

דוגמה בהינתן $n=p\cdot q$, למצוא את p,q דורש זמן חישוב אקספוננציאלי באורך הייצוג, אפע"פ שהאלג' הוא לינארי במספר עצמו. זה משום שהפרמטר שלנו במקרה הזה הוא לא המספר אלא הייצוג (אנחנו מקבלים $\log n$ ספרות/אחדים ואפסים, לא את המספר במלואו).

דוגמה קלט: $\{t_i\}$ אריכים שלכל אחד מהם יש צלעות $\{u_i\},\{d_i\},\{r_i\},\{l_i\}$ (למעלה, למטה, ימינה ושמאלה בהתאמה) כאשר הצלעות הם צבעים (אדום, צהוב, ירוק).

פלט: האם ניתן לרצף באופן חוקי ריבוע $n\times n$ לכל $n\geq 1$, כאשר "חוקיות" מתבטאת בכך שצלעות סמוכות מסכימות על הצבע.

דוגמת ריצה באופן אינטואיטיבי, במקרים מסוימים, נוכל להציב אחד מהאריכים בפינה, למצוא אילו אריכים מתאימים לו מבחינת הצלעות הסמוכות, להציב אריכים חוקיים נוספים, וכך לחזור חלילה. לעתים (כמו זה שבתמונה), נוצרת תבנית של אריכים חוקיים על האלכסון (כלומר אריך א' בפינה השמאלית התחתונה, ואז ב' מימינו ומעליו, ואז ג' מימין ומעל כל ב') ואז אפשר לגדום את התבנית האינסופית הזו לריבוע $n\times n$ כל פעם שצריך ולהחזיר ריבוע חוקי. במקרה כזה הפלט יהיה כן.



איור 1: דוגמה לתבנית שנוצרת, אפשר להמשיך לצייר את האלכסון בכיוון דרום-מזרח ולחזור על התבנית החוצה עוד ועוד

הבעיה היא שאין שום ערובה לכך שהתבנית באמת קיימת במקרה הכללי, או שהיא נשמרת, ואי אפשר לרוץ עד ∞. לכן התשובה היא שאין אלג' שפותר את הבעיה.

דוגמה (בעיית העצירה) קלט: תכנית מחשב P וקלט x.

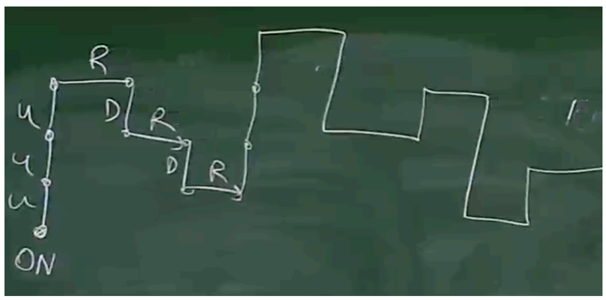
פלט: האם P עוצרת על x.

אין לבעיה זו אלג' שפותר אותה בכל המקרים (תחת הנחות מסוימות, אפשר לפעמים לתת תשובה).

אוטומטים

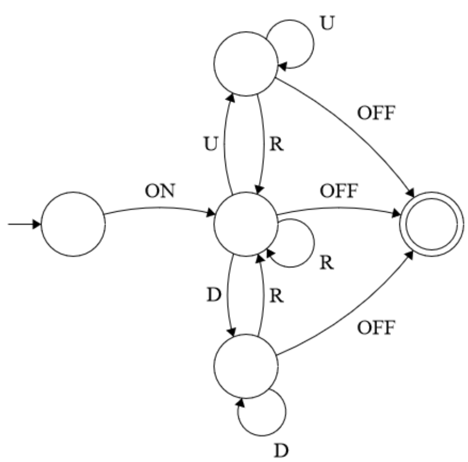
הגדרה אוטומט הוא מחשב עם זכרון מוגבל.

דוגמה נתון עט דיגיטלי שיכול לבצע אחת משש פקודות, ON, OFF, U, D, L, R. סדרת פקודות היא חוקית אם היא מתחילה ב-ON, מסתיימת ב-OFF ומייצרת קו רקיע משמאל לימין.



איור 2: דוגמה לקו רקיע חוקי, אסור ללכת שמאלה ואסור לעלות מיד אחרי שיורדים (ולהפך)

נכתוב אוטומט שמחליט האם סדרת פקודות היא חוקית. אם נצליח לעבור בין המצבים (העיגולים), החל מהמצב הראשון (זה עם חץ ללא מקור) ועד למצב המקבל (עם העיגול הכפול) על קשתות קיימות, הרי שהסדרה חוקית.



איור 3: אוטומט חוקי

אינטואיטיבית, המצב האמצעי הוא זה שממנו אפשר לעשות מה שרוצים, העליון הוא אחרי עלייה והתחתון הוא אחרי ירידה. נשים לב כי מכולם אפשר לפנות ימינה.

הגדרה <u>אוטומט</u> (automaton, DFA) הוא חמישייה $A = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ שהם המצבים, הא"ב, פונקציית המעברים, המצב ההתחלתי וקבוצת המצבים המקבלים שמוכלת ב-Q.

- δ היא פ' $Q \times \Sigma \mapsto Q$.
- Σ היא קבוצה סופית של אותיות, לדוגמה $\{0,1\}^4$, $\Sigma = \{0,1\}$ וכו'.
- מילה היא $w = w_1, \ldots, w_n$ סדרה סופית של אותיות, ו-ϵ היא המילה הריקה.
- שפה היא קבוצה של מילים, $L \subseteq \Sigma^*$ כאשר $\Sigma^* = \{w : \Sigma$ מילה סופית מעל הא"ב $w\}$.

דוגמה A_1 הוא האוטומט בציור. במקרה הזה $\Sigma = \{0,1\}$, $Q = \{q_0, q_1\}$, $F = \{q_0\}$ ופ' המעברים היא.

δ	0	1
q_0	q_0	q_1
q_1	q_1	q_0

הגדרה <u>ריצה</u> על מילה $w = w_1 \ldots w_n$ מעל Σ היא סדרה של מצבים $r = r_0 \ldots r_n$ כך ש :

- $r_0 = q_0$ (הריצה מתחילה ב-q_0).
- לכל $i \geq 0$, $r_{i+1} = \delta\left(r_i, w_{i+1}\right)$ (הריצה מכבדת את δ).

דוגמה עבור A_1 והמילה 011, הריצה היא $q_0 q_0 q_1 q_0$.

הגדרה r היא ריצה <u>מקבלת</u> (accepting) אם $r_n \in F$ (המצב האחרון בריצה הוא מקבל). אחרת, r הוא <u>דוחה</u> (rejecting).

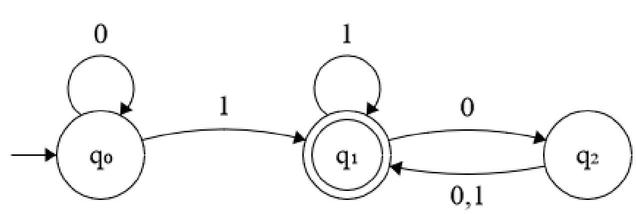
A <u>מקבל</u> את w אם הריצה של A על w היא מקבלת.

$L\left(A\right)$, <u>השפה</u> של האוטומט היא אוסף המילים ש-A מקבל עליהן.

דוגמה עבור A_1, $L\left(A_1\right) = \{w :$ מספר ה- 1 -ים ב-w הוא זוגי$\}$ (אפשר להוכיח באינדוקציה).

הערה אם לא קיים מעבר עבור אות ומצב, אפשר או להחליט ש-δ לא מוגדרת על כל $Q \times \Sigma$ או להחליט שכל קשת לא קיימת מובילה לבור דוחה, כלומר מצב לא מקבל שאי אפשר לצאת ממנו.

דוגמה נצייר אוטומט נוסף, A_2, ונחשב את השפה שלו.



איור 4 : האוטומט A_2

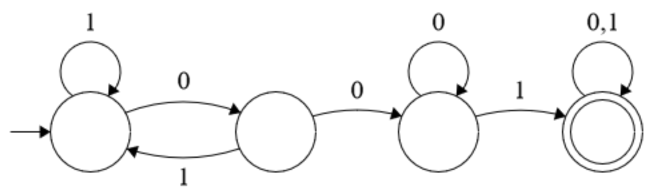
נסמן בצבע האם כמה מילים נבחרות הן בשפה או לא, $00000, 11, 1, 001110, 011, 010$.

אם נחשוב עוד קצת, נגלה ש-

$$L\left(A_{2}\right)=\{w:\text{יש ב- } w \text{ לפחות 1 אחד, ואחרי ה-1 האחרון יש מספר זוגי (או אפס) של 0-ים}\}$$

בתרגול נוכיח את זה באופן פורמלי.

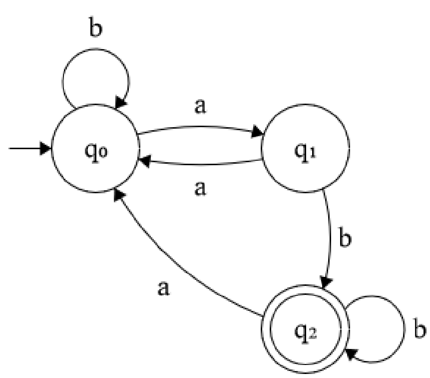
דוגמה בהינתן שפה, ננסה לחשב את האוטומט. השפה היא $L_3=\{w: 001 \text{ מכילה את הרצף } w\}$.



איור 5 : אוטומט שנגזר מ-L_3

חלק ב' של ההרצאה

דוגמה $\Sigma=\{a,b\}$, $L=\{w: \text{אי זוגי } \#_a w \wedge w_n=b\}$ (כאשר $\#_a w$ הוא מספר ה-a-ים ב-w ו-w_n האות האחרונה במילה).



איור 6 : אוטומט שאנחנו טוענים שנגזר מ-L

המצב ההתחלתי לא מקבל כי $\epsilon \notin L$. b כאות ראשונה לא מקדם אותנו כי זו לא מילה חוקית. הרעיון בהלוך-חזור ב-q_0, q_1 הוא שרק אם המספר הוא אי זוגי של a-ים, נגיע ל-q_1 ומשם נעצור במצב מקבל רק אם אנחנו נגמרים ב-b.

לכל מצב נוכל להתאים סטטוס - מה מאפיין את המילה שמגיעה אליו (לאחר מכן נשתמש בסטטוסטים האלה, נפרמל אותם ונוכיח איתם את נכונות האוטומט):

- q_0 - $\#_a w$ זוגי.
- q_1 - $\#_a w$ אי זוגי ו-w מסתיימת ב-a.
- q_2 - $\#_a w$ אי זוגי ו-w מסתיימת ב-b.

טענה $L\left(A\right)=L$.

הוכחה: $\forall w\in\Sigma^*$ (אוסף המילים האפשריות) מתקיים $\delta^*\left(q_0,w\right)=q_0$ (כאשר $\delta^*:Q\times\Sigma^*\mapsto Q$, כלומר הפעלה שוב ושוב של δ על המילה החל ממצב נתון).

נוכיח את שלוש הטענות הבאות ומשם ינבע כי

$$w\in L\iff\delta^*\left(q_0,w\right)=q_2\iff\delta^*\left(q_0,w\right)\in F$$

האם"ם נובע משתי הטענות הראשונות, הטענה השלישית מספקת לנו רק כיוון אחד.

1. אם $\delta^*\left(q_0,w\right)=q_0$ אז $\#_a w$ זוגי.
2. אם $\delta^*\left(q_0,w\right)=q_1$ אז $\#_a w$ אי זוגי ו-w מסתיימת ב-a.
3. אם $\delta^*\left(q_0,w\right)=q_2$ אז $\#_a w$ אי זוגי ו-w מסתיימת ב-b.

באינדוקציה על $|w|$:

בסיס ($|w|=0$): $w=\epsilon$ ולכן $\delta^*\left(q_0,\epsilon\right)=q_0$ ואכן $\#_a\epsilon$ זוגי.

צעד ($|w|\to|w|+1$): נוכיח את הטענה על $w\cdot a,w\cdot b$ בהנחה שהיא נכונה על w. נוכיח רק את המקרה של $w\cdot a$ ונשאיר לסטודנטית המשקיעה להוכיח את המקרה השני.

- אם $\delta^*\left(q_0,w\cdot a\right)=q_0$ אז בהכרח $\delta^*\left(q_0,w\right)\in\left\{q_1,q_2\right\}$ ($\delta\left(q_0,a\right)\neq q_0$) ולכן מה"א $\#_a w$ אי זוגי (מטענות 2 ו-3) ולכן $\#_a w\cdot a$ זוגי.
  - אם $\delta^*\left(q_0,w\cdot a\right)=q_1$ אז $\delta^*\left(q_0,w\right)=q_0$ ומה"א $\#_a w$ זוגי ולכן $\#_a w\cdot a$ אי זוגי ו-w נגמרת ב-a.
  - אם $\delta^*\left(q_0,w\cdot a\right)=q_2$ אז זה לא ייתכן (מהגדרת האוטומט).

■

דוגמה $\Sigma=\left\{a,b\right\}$, $L=\left\{w:\#_a w=\#_b w\right\}$. אין אוטומט סופי ששפתו L! זה בגלל שאחרי ה-a הראשון, נצטרך "לזכור" שיש לנו 1 לטובת a, ואז אם שוב יש a נצטרך לזכור עוד 1, ואם b אז אחד לטובת b וזה אינסופי בעצם.

הגדרה <u>שפה רגולרית</u> היא שפה שניתנת לזיהוי ע"י אוטומט, ונסמן $L \in \mathrm{REG}$, פורמלית, L היא רגולרית אם קיים DFA כך ש-$L\left(A\right)=L$.

פעולות על שפות

תהיינה $L_1, L_2 \in \Sigma^*$. כל הפעולות עובדות על שפות מעל $\Sigma_1 \neq \Sigma_2$ ובמקרה כזה נסמן $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$.

1. איחוד (union): $L_1 \cup L_2 = \{w : w \in L_1 \vee w \in L_2\}$ (שפות הן קבוצות, זו לא פעולה חדשה).
2. שרשור (concatenation): $L_1 \cdot L_2 = \{w_1 \cdot w_2 : w_1 \in L_1, w_2 \in L_2\}$ (הצמדה של כל צמד מילים משתי השפות).
3. כוכב (star): $L^* = \{w_1 \cdot \ldots \cdot w_k : k \geq 0 \wedge w_i \in L, \forall i \leq k\}$ (שרשור של 0 או יותר מילים ב-L כולל את ϵ עבור $k=0$).

דוגמה $L_1 = \{1, 333\}\,, L_2 = \{22, 4444\}$.

$$L_1 \cup L_2 = \{1, 333, 22, 4444\}$$
$$L_1 \cdot L_2 = \{122, 1444, 33322, 3334444\}$$
$$L^* = \{\epsilon, 1, 333, 11, 1333, 3331, 333333, ...\}$$

הערה אם $L = \varnothing$ אז $L^* = \{\epsilon\}$ וכך גם עבור $L = \{\epsilon\}$. כל שפה אחרת היא אינסופית (יש לפחות מילה אחת לא ריקה, נשרשר אותה כמה פעמים שרק נרצה).

תרגול

חזרנו על הגדרות מתורת הקבוצות ונושאים אחרים, כאן אכלול רק דוגמאות/הגדרות/טענות חדשות ו/או לא טריוויאליות.

הגדרה נאמר כי $R \subseteq S \times T$ הוא <u>יחס</u> מעל S, T (לרוב $S = T$).

דוגמה $A = \{1, 2, 3, 4\}$, $R = \{(a, b) : |a - b| \leq 1\}$.

תכונות של יחסים

- רפלקסיביות: $\forall a \in A$, $(a, a) \in A$ או בסימון חלופי, aRa (היחס הנ"ל הוא רפלקסיבי).
- סימטריה: $\forall a, b \in A$, אם aRb אז bRa (היחס הנ"ל הוא סימטרי).
- טרנזיטיביות: $\forall a, b, c \in A$, אם aRb ו-bRc אז aRc.

- יחס שקילות: יחס שמקיים את שלושת הנ"ל.

יחס שקילות R מעל A מחלק את A למחלקות שקילות זרות המוגדרות ע"י $[a]_R = \{b \in A : aRb\}$, כי אם קיים $x \in [a]_R \cap [b]_R$ אבל $[a]_R \neq [b]_R$ אז קיים $c \in [a]_R \setminus [b]_R$ ולכן

$$aRc \Rightarrow cRx \Rightarrow cRb \Rightarrow c \in [b]_R$$

סתירה.

דוגמה $G = \langle V, E \rangle$ גרף לא מכוון והיחס $R \subseteq V \times V$ שמשמעותו "כל זוגות הקודקודים שיש ביניהם מסלול ב-G". קל לראות שזהו יחס רפלקסיבי, טרנזיטיבי וסימטרי ולכן זהו יחס שקילות.

הגדרה עוצמה של קבוצה היא מדד ל"גודל" הקבוצה. עבור קבוצה סופית A, העוצמה שלה היא $|A|$.

הגדרה $|\mathbb{N}| = \aleph_0$.

הערה ראינו ש-$|\mathbb{Z}| = |\mathbb{Q}| = \aleph_0$ (כאשר שוויון עוצמות משמעו קיום פ' חחע"ל בין שתי הקבוצות).

הערה נאמר כי $|A| \leq |B|$ אם יש העתקה חח"ע מ-A ל-B ו-$|A| < |B|$ אם בנוסף אין העתקה חח"ע מ-A על B.

טענה (האלכסון של קנטור) $|[0,1]| = 2^{\aleph_0} > \aleph_0$.

הגדרה $\Sigma^n = \underbrace{\Sigma \times \ldots \times \Sigma}_{\text{פעמים } n}$ ונגדיר $\Sigma^* = \bigcup_{n=0}^{\infty} \Sigma^n$.

הערה רבים מתבלבלים כאן אבל חשוב לזכור ש-Σ סופית וכך גם Σ^n, אבל Σ^* אין סופית.

דוגמאות לשפות

$\Sigma = \{a, b\}$.

- $L_1 = \{\epsilon, a, aa, b\}$.
- $L_2 = \{w : w_1 = a\}$ (מילים שמתחילות ב-a).
- $L_3 = \{\epsilon\}$.
- $L_4 = \varnothing$ וזו אינה אותה קבוצה כמו L_3!
- $L_5 = \{w : |w| < 24\}$.

- $L_1 = \{w : w_1 = a\}$ ו-$L_2 = \{w : w_n = b\}$ (סימון לקוני למילים שמסתיימות ב-b). שפה נוספת היא

$$L_1 \cup L_2 = \{w : w_1 = a \vee w_n = b\}$$

$$L_2 \cdot L_1 = \{w : ab \text{ מכילה את הרצף } w\}$$

$$L_1 \cap L_2 = \{w : w_1 = a \wedge w_n = b\}$$

$$L_1 \cdot L_2 = L_1 \cap L_2$$

כאשר השוויון האחרון נכון כי המילה הראשונה בצמד מתחילה ב-a והשנייה נגמרת ב-b ובאמצע לא משנה מה יש, בדומה ל-$L_1 \cap L_2$.

- $L = \{ww : w \in \Sigma^*\}$.

$$\overline{L} = \Sigma^* \backslash L = \{w : 2 \nmid |w|\} \cup \{w = w_1 \ldots w_{2n} : w_1, \ldots, w_n \neq w_{n+1} \ldots w_{2n}\}$$

$$L \cdot L = \{wwxx : w, x \in \Sigma^*\}$$

הערה כל שפה מקיימת $L \subseteq \Sigma^*$, או באופן שקול $L \in P(\Sigma^*)$.

כמה מילים יש ב-Σ^*? $|\Sigma^*| = \aleph_0$.

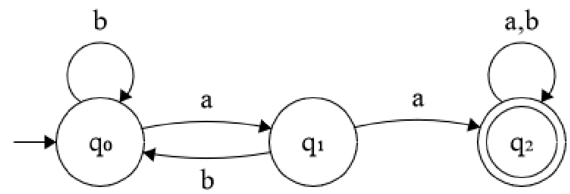
כמה שפות יש מעל Σ^*? $2^{|\Sigma^*|} = 2^{\aleph_0}$.

כמה שפות רגולריות יש מעל Σ^*? $\aleph_0$, כי כל אוטומט מוגדר ע"י מחרוזת מעל א"ב סופי (המצבים, הא"ב של האוטומט וכו') ולכן מהנ"ל עוצמת אוסף המחרוזות ששקולות לאוטומטים היא $\aleph_0$. לחלופין, כל אוטומט אפשר לצייר ויש מספר בן מנייה של פיקסלים על canvas (במחשב).

מסקנה קיימות שפות לא רגולריות, ויש "יותר" לא רגולריות מאשר לא (השפות הרגולריות הן קבוצה במידה 0 מתוך כל השפות).

הגדרה בהינתן אוטומט A, נגדיר $\delta^*(q, w) = \begin{cases} q & w = \epsilon \\ \delta(\delta^*(q, w'), \sigma) & w = w'\sigma, \sigma \in \Sigma \end{cases}$.

דוגמה נביט באוטומט הבא.



איור 7 : אוטומט לדוגמה

נחשב ערך של δ^*.

$$\delta^*(q_1, ba) = \delta(\delta^*(q,b), a) = \delta(\delta(\delta^*(q,\epsilon), b), a) = q_1$$

.

דוגמה עבור $\Sigma = \{0,\ldots,9,\#\}$ והשפה

$$L = \left\{x\#a : x \in \{0,\ldots,0\}^*, a \in \{0,\ldots,9\}, a \in x\right\}$$

נמצא את האוטומט המתאים ל-L. ראשית נשים לב לדוגמה כי $64424\#5 \notin L$ אבל $1243\#2 \in L$.

הבעיה באוטומט זה שאין לנו זיכרון ולכן נצטרך "לזכור" מספיק מידע כדי לזכור האם ראינו # עד עכשיו ואילו ספרות ראינו עד כה.

נבחר $Q = \left(2^{\{0,\ldots,9\}} \times \{1,2\}\right) \cup \{q_{acc}, q_{sink}\}$ כאשר מצב מייצג את אוסף הספרות שראינו עד כה והאם ראינו את סולמית עד עכשיו (2 כן ראינו).

$q_0 = \langle \varnothing, 1\rangle$ כלומר לא ראינו את סולמית ולא ראינו אף ספרה, $F = \{q_{acc}\}$ ו-$\Sigma = \{0,\ldots,9,\#\}$.

$$\delta(\langle c,i\rangle, \sigma) = \begin{cases} \langle c \cup \{\sigma\}, 1\rangle & \sigma \in \{0,\ldots,9\}, i=1 \\ \langle c, 2\rangle & \sigma = \#, i=1 \\ q_{acc} & \sigma \in c, i=2 \\ q_{sink} & \sigma \notin c, i=2 \end{cases}$$

עברו על כל המצבים והבינו את המשמעות, הרעיון בסוף הוא שאם ראינו סולמית ונתקלנו באות נוספת, נקבל או נשלול בהתאם להאם ראינו את הספרה או לא. לשם השלמות גם נגדיר $\delta(q_{acc}, \sigma) = \delta(q_{sink}, \sigma) = q_{sink}$ כי אם הגענו למצב המקבל והוספנו עוד תו זה כבר לא בשפה.

טענת עזר בהינתן $w \in \{0,\ldots,9\}^*$, נגדיר $S(w) = \{\sigma \in \{0,\ldots,9\}^* : w \text{ מופיעה ב- } \sigma\}$ (אוסף הספרות שמופיעות ב-w). נוכיח כי $\delta^*(q_0, w) = \langle S(w), 1\rangle$.

הוכחה: באינדוקציה על $|w|$.

בסיס ($w = \epsilon$): $\delta^*(q_0, w) = \delta(q_0, \epsilon) = \langle \varnothing, 1\rangle$ כנדרש.

צעד ($|w| - 1 \to |w|$): נסמן $w' = w\sigma$

$$\delta^*(q_0, w') = \delta(\delta^*(q_0, w), \sigma) \overset{\text{ה"א}}{=} \delta(\langle S(w), 1\rangle, \sigma) = \langle S(w'), 1\rangle$$

■

טענה $L = L(A)$.

הוכחה: נוכיח הכלה דו-כיוונית באינדוקציה על אורך המילה; זו דרך ההוכחה המקובלת לטענות על שפות ואוטומטים.

$L \subseteq L(A)$: נניח כי $w \in L$ ונראה שריצה של A על w מקבלת. $w = x\#a$ כאשר $x \in [0,\ldots,9]^*, a \in \{0,\ldots,9\}$ ו-$a \in S(x)$.

$$\begin{aligned}
\delta^*(q_0, w) &= \delta(\delta^*(q_0, x\#), a) \\
&= \delta\left(\delta\left(\underbrace{\delta^*(q_0, x)}_{\langle S(x),1\rangle}, \#\right), a\right) \\
\text{הגדרת } \delta &= \delta(\langle S(x), 2\rangle, a) \\
\text{הגדרת } \delta &= q_{acc}
\end{aligned}$$

$L(A) \subseteq L$: מספיק שנוכיח שאם $w \notin L$ אז $w \notin L(A)$. נעבור על כל המילים $w \notin L$.

- אם $w \in \{0,\ldots,9\}^*$ אז מטבענת העזר $\delta(q_0, w) = \langle S(w), 1\rangle \neq q_{acc}$.
- אם $w \in \{0,\ldots,9\}^* \times \{\#\}$ אז

$$\delta^*(q_0, w) = \delta\left(\underbrace{\delta^*(q_0, w)}_{\langle S(x),1\rangle}, \#\right) = \langle S(x), 2\rangle \neq q_{acc}$$

- אם $w = x\#y$ עבור $|y| > 1$ אז

$$\delta^*(q_0, w) = \delta^*(\langle S(x), 2\rangle, y) \neq q_{acc}$$

כאשר השוויון נובע מכך שניתן לפצל את הריצה על $x\#$ ואז על y. הריצה על $x\#$ מביאה אותנו ל-$\langle S(x), 2\rangle$ מהגדרה של δ. האי-שוויון נובע מכך ש-$|y| > 1$ ולכן גם אם אחרי הספרה הראשונה של y הגענו ל-q_{acc}, בהכרח כל הספרות האחרות יובילו אותנו תמיד לבור דוחה.

- אם $w = x\#a$ אבל $a \notin S(x)$ אז

$$\begin{aligned}
\delta^*(q_0, w) &= \delta(\delta(\delta^*(q_0, x), \#), a) \\
&= \delta(\langle S(x), 2\rangle, a) \\
a \notin S(x) \quad &= q_{sink}
\end{aligned}$$

■