רשימות הרצאה לחבורות לי
חורף 2020, הטכניון

הרצאותיו של מקס גורביץ'
הוקלדו על ידי אלעד צורני

5 בנובמבר 2020

תוכן העניינים

פרק 1

מבוא

1.1 מבוא היסטורי

1.1.1 חבורות לי

בנורבגיה, סביב שנת 1870, מתמטיקאי בשם סופוס לי, שחקר משוואות דיפרנציאליות, שם לב להופעה של מה שנקרא $``trans\text{-}formation\ groups"$.

באופן לוקלי, נניח כי נתון שדה וקטורי חלק

$x\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$.

נחפש פתרון למשוואה

$$y'(t) = x(y(t))$$
$$y(0) = y_0$$

עבור $y\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}^n$. לפי משפט קיום ויחידות של מד"ר, קיים פתרון יחיד $y(t)$ שמוגדר עבור $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ עבור $\varepsilon > 0$ כלשהו.

נגדיר $\varphi_x(t)(y_0) \coloneqq y(t)$ לכל $y_0 \in \mathbb{R}^n$. אז

$$\varphi_X(t) : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$$

אוטומורפיזם של $\mathbb{R}^n$. זאת משפחה של אופרטורים שמשתנה באופן חלק כתלות ב־t.

מתקיים

$$\varphi_x(0) = \mathrm{id}$$

ומיחידות הפתרונות,

$$\varphi_x(t) \circ \varphi_x(s) = \varphi_x(t+s).$$

התמונה $\mathrm{Im}\,\varphi_x$ נקראת *חבורה חד־פרמטרית*. אז

$$\varphi_x\colon \mathbb{R} \to \mathrm{Aut}(\mathbb{R}^n)$$

הומומורפיזם של חבורות. זה לא מדויק, φ_x אולי לא מוגדר תמיד.

באופן גלובלי, קיימות משוואות שהפתרונות שלהן אינווריאנטיים לפעולה של חבורה כלשהי. למשל

$$\mathcal{O}_n(\mathbb{R}) \coloneqq \left\{ A \in M_n(\mathbb{R}) \;\middle|\; A^t A = I \right\}.$$

נסתכל על הלפלסיאן

$$\Delta = \sum_{i\in[n]} \partial_{x_i, x_i}.$$

אם $y\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ מקיימת $\Delta(y) = 0$ אז $y \circ g = y$ לכל $g \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$.

סופוס לי חקר חבורות חלקות כאלו, ולמעשה הגדיר חשבון דיפרנציאלי של חבורות. כדי לחקור פונקציה חלקה $f\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ אנו מסתכלים על הנגזרת של f בנקודה, שהיא העתקה לינארית

$$T\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m.$$

האנלוג לחבורות הוא *חבורת לי* שהיא חבורה שאותה אפשר "לגזור" פורמלית, זאת חבורה עם מבנה של יריעה חלקה, או במילים אחרות, אובייקט חבורה בקטגוריה של יריעות חלקות.

"נגזרת" של חבורת לי נקראת *אלגברת לי* $\mathrm{Lie}(G)$. זהו מרחב וקטורי עם מבנה מסוים. תורת לי בסיסית היא הבנת ההתאמה בין חבורות לי לאלגבראות לי שלהן.

דוגמאות.

1. $\text{Lie}\left(\text{GL}_n\left(\mathbb{R}\right)\right)=M_n\left(\mathbb{R}\right)$.
2. $\text{Lie}\left(\text{GL}_n\left(\mathbb{C}\right)\right)=M_n\left(\mathbb{C}\right)$.
3. $\text{Lie}\left(\mathcal{O}_n\left(k\right)\right)=\mathfrak{so}_n\left(k\right):=\left\{A\in M_n\left(k\right)\mid A^t=-A\right\}$.
4. $\text{Lie}\left(\text{SL}_n\left(k\right)\right)=\mathfrak{sl}_n\left(k\right):=\left\{A\in M_n\left(k\right)\mid \text{tr}\left(A\right)=0\right\}$.
5. נגדיר
$$\text{Sp}_{2n}\left(k\right)=\left\{A\in M_{2n}\left(k\right)\,\middle|\,A^tJA=J\right\}$$
עבור
$$J=\begin{pmatrix}0 & I_n\\ {}_{n}-I & 0\end{pmatrix}.$$
זאת נקראת *החבורה הסימפלקטית*. אז
$$\text{Lie}\left(\text{Sp}_{2n}\left(k\right)\right)=\mathfrak{sp}_{2n}\left(k\right):=\left\{A\in M_{2n}\left(k\right)\,\middle|\,A^tJ=-JA\right\}.$$

באופן כללי, אם ניקח חבורת לי $G\le\text{GL}_n\left(k\right)$ אז $\text{Lie}\left(G\right)\le M_n\left(k\right)$ וזאת תהיה אלגברה יחד עם הפעולה של הקומוטטור
$$\left[A,B\right]=AB-BA\,.$$
בקורס זה נעשה "קירוב" של התאמת לי על ידי לקיחת *כל* תת־חבורה $G\le\text{GL}_n\left(\mathbb{R}\right)$ ובניית $\text{Lie}\left(G\right)\le M_n\left(\mathbb{R}\right)$.

1.1.2 סיווג של חבורות לי

חבורות לי מופיעות במגוון מקומות בטבע ובמתמטיקה. הרבה חבורות סימטריה בטבע הינן חבורות לי. אנו רוצים להבין בין השאר מסיבות אלו את המבנה של חבורות לי ולנסות לסווג אותן.

תחילה נבין את הקשר בין G_1,G_2 כך ש־$\text{Lie}\left(G_1\right)\cong\text{Lie}\left(G_2\right)$. התשובה לשאלה זאת תיעזר בחבורות כיסוי. נקבל מכך שמספיק להשיג סיווג של אלגבראות לי. למעשה, מספיק לסווג אלגבראות לי מעל $\mathbb{C}$.

נצמצם לפעמים את הדיון לחבורות לי *פשוטות* שהן חבורות לי קשירות ללא תת־חבורות נורמליות קשירות לא טריוויאליות. דוגמאות לחבורות לי פשוטות הן $\text{SO}_n=\text{SL}_n\cap\mathcal{O}_n,\text{Sp}_{2n},\text{SL}_n$. מהן ניתן, במובן מסוים, לבנות כל חבורת לי. עבור G חבורת לי פשוטה, $\text{Lie}\left(G\right)$ היא אלגברת לי פשוטה. לכן, מספיק לסווג אלגבראות לי פשוטות.

סביב שנת 1890, Cartan ו־Killing סיווגו באופן מלא אלגבראות לי פשוטות מעל $\mathbb{C}$, שהן "אבני הבניין של הסימטריה של הטבע".

יש משפחות של אלגבראות לי פשוטות, שנקראות אלגבראות קלאסיות. הן $\mathfrak{sl}_n\left(\mathbb{C}\right),\mathfrak{so}_n\left(\mathbb{C}\right),\mathfrak{sp}_{2n}\left(\mathbb{C}\right)$ שהגדרנו מקודם. חבורות לי שאלו הן אלגבראות לי שלהן נקראות חבורות קלאסיות. התברר שלמעט המשפחות הקלאסיות יש עוד בדיוק 5 אלגבראות לי פשוטות, שנקראות מיוחדות exceptional. הן מסומנות G_2,F_4,E_6,E_7,E_8. הכי קטנה מהן היא G_2 בעלת מימד 14, והכי גדולה היא E_8 בעלת מימד 248. לצורך הבנת התוצאה, נדרשת התעמקות אלגברית במבנה של אלגבראות לי, מה שדורש זמן.

1.1.3 חבורות קומפקטיות

חבורות לי הן חבורות שהן יריעות חלקות. מתברר שאם הן קומפקטיות, יש הרבה מה להגיד עליהן. חבורות לי קומפקטיות הן למשל
$$\mathcal{O}\left(n\right)\equiv\mathcal{O}_n\left(\mathbb{R}\right):=\left\{A\in\text{GL}_n\left(\mathbb{R}\right)\,\middle|\,A^tA=I\right\}$$
$$U\left(n\right):=\left\{A\in\text{GL}_n\left(\mathbb{C}\right)\,\middle|\,\bar{A}^tA=I\right\}.$$
כאשר המבנה שלהן מושרה מזה של $M_n\left(k\right)\cong k^{n^2}$.

1.1.4 תורת ההצגות

בתורת לי הגיעו להבנה שניתן ללמוד הרבה על חבורה ע"י הבנת הפעולה שלה על מרחבים וקטוריים. זוהי תורת ההצגות. עבור חבורות קומפקטיות יש מבנה נחמד לתורת ההצגות.

1.1.5 חבורות רדוקטיביות ואלגבריות

משפט שנחתור אליו הוא שכל חבורת לי קומפקטית קשירה היא חבורה אלגברית של מטריצות ממשיות. מסקנה ממשפט זה תהיה שלכל חבורת לי קומקפטית ניתן להגדיר קומפלקסיפיקציה על ידי הרחבת סקלרים. זאת מוגדרת על ידי השורשים המרוכבים של אותם פולינומים. חבורות שנקבל מקומפלקסיפיקציה נקראות *רדוקטיביות* ומהוות משפחה גדולה.

בשנת 1920 פיתח הרמן וייל $\left(\text{Weyl}\right)$ את המבנה וההצגות של חבורות לי רדוקטיביות על סמך חבורות קומפקטיות.

בשנת 1940 קלוד שיבליי $\left(\text{Chevalley}\right)$ הראה שניתן לתאר כל חבורת לי פשוטה כחבורה אלגברית. מסקנה של כך היא ש"לא צריך" אנליזה כדי לחקור תורת לי. אפשר גם להגדיר אנלוגית של חבורות לי מעל כל שדה.

1.1.6 התפתחות מודרנית של התחום

חבורות לי התפתחו לנושאים מאוחרים שמופיעים בהרבה תחומים.

- אחד התחומים הוא חבורות אלגבריות. תחום אחר הוא חבורות סופיות מסוג לי (Lie Type) שהן חבורות אלגבריות מעל שדה סופי. אלו אבני יסוד בסיווג של חבורות סופיות פשוטות.
- נושא אחר הוא מרחבים סימטריים. אלו מרחבים טבעיים עם פעולה של חבורת לי. למשל S^3 הוא מרחב סימטרי עם הפעולה של $\mathcal{O}\left(3\right)$.
- חבורות לי גם הפכו לכלי מרכזי בחקר של תבניות אוטומורפיות ותורת המספרים. הן מתקשרות למשפט Harish-Chandra ולתוכנית Laglands.
- חבורות לי מתקשרות גם לאנליזה הרמונית.
- נחקרת היום גם תורת הצגות אינסוף־מימדיות של חבורות לי ופעולות של חבורות לי על מרחבי פונקציות. בין השאר נחקרות פעולות על מרחבי פונקציות שמקודדים תוכן של תורת מספרים.
- נחקרות גם היום, משנת 1985, חבורות קוונטיות, שהן דפורמציות של חבורות לי.
- נחקרות גם חבורות ואלגבראות אינסוף־מימדיות שנקראות אלגבראות Kac-Moody.
- ישנן תורת לי קטגורית ותורת לי גיאומטרית. הראשונה עוסקת למשל בקטגוריות שמוגדרות באופן דומה לחבורות לי.

1.2 חבורות לי

1.2.1 אקספוננט של מטריצות

נעבוד מעל שדה $k\in\left\{ \mathbb{R},\mathbb{C}\right\}$.
נסמן ב־

$$M\equiv M_{n}\equiv M_{n}\left(k\right)$$

מטריצות $n\times n$ מעל k עם הנורמה האוקלידית המושרית מ־$k^{n^{2}}$.

טענה 1.2.1 (עקרון ההצבה). *יהי*

$$F\left(z\right)=\sum_{n=0}^{\infty}a_{n}z^{n}$$

עבור $a_{n}\in k$ טור חזקות עם רדיוס התכנסות r.
לכל $A\in M_{n}$ עבורה $\left\Vert A\right\Vert <r$ הטור $F\left(A\right)=\sum_{n=0}^{\infty}a_{n}A^{n}$ מגדיר טור מטריצות מתכנס בנורמה.

הוכחה. הנורמה מקיימת

$$\left\Vert X+Y\right\Vert \le\left\Vert X\right\Vert +\left\Vert Y\right\Vert$$
$$.\left\Vert X\cdot Y\right\Vert \le\left\Vert X\right\Vert \cdot\left\Vert Y\right\Vert$$

לכן

$$\begin{aligned}\left\Vert \sum_{n=k}^{\ell}a_{n}A^{n}\right\Vert & \le\sum_{n=k}^{\ell}\left|a_{n}\right|\left\Vert A^{n}\right\Vert \\
 & \le\sum_{n=k}^{\ell}\left|a_{n}\right|\left\Vert A\right\Vert ^{n}\\
 & <\sum_{n=k}^{\ell}\left|a_{n}\right|\left(r-\varepsilon\right)^{n}\\
 & \xrightarrow[k,\ell\to\infty]{}0
\end{aligned}$$

ולפי קריטריון קושי נקבל שיש לסדרה $\left\Vert \sum_{n=1}^{N}a_{n}A^{n}\right\Vert$ גבול. ■

אם $F(z)$ טור חזקות עם רדיוס התכנסות ρ ו־$G(z)$ עם רדיוס התכנסות σ, אז

$$\begin{aligned}(F+G)(A) &= F(A)+G(A)\\ (FG)(A) &= F(A)\cdot G(A)\end{aligned}$$

עבור A עם $\|A\| < \min\{\rho,\sigma\}$. אם $G(0)=0$ אז $F\circ G$ הוא טור חזקות, ועבור מטריצה A כך ש־$\|A\| < \sigma$ וגם $\|G(A)\| < \rho$ הטור

$$(F\circ G)(A) = F(G(A))$$

מתכנס.

הגדרה 1.2.2 (אקספוננט של מטריצה). עבור $z\in k$ נגדיר

$$\exp(z) \coloneqq \sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!}\cdot z^n$$

ועבור $z\in k$ עם $|z|<1$ נגדיר

$$\log(1+z) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{n}\cdot z^n .$$

מכאן, לכל מטריצה $X\in M$ ניתן להגדיר

$$\exp(X) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!}X$$

ועבור $X\in M$ עבורה $\|X-I\|<1$ נגדיר

$$\log(x) \coloneqq \log(1+(X-I)) .$$

מסקנה 1.2.3. *1. לכל מטריצה $X\in M$ מתקיים*

$$\exp(X)\cdot\exp(-X) = I$$

וגם $\exp(X)\in \mathrm{GL}_n(k)$.

2. כאשר $\|X-I\|<1$ מתקיים

$$\exp(\log(X)) = X .$$

3. עבור $X\in M$ המקיימת $\|X\|<\log 2$ מתקיים

$$\log(\exp(X)) = X .$$

אכן מתקיים

$$\begin{aligned}\|\exp(X)-I\| &= \left\|\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n!}X^n\right\|\\ &\le \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n!}\|X\|^n\\ &= \exp(\|X\|)-1\\ &< 2-1\\ &= 1\end{aligned} .$$

תרגיל 1. כאשר $XY=YX$ מתקיים

$$\exp(X)\cdot\exp(Y) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{n!}(X+Y)^n = \exp(X+Y) .$$

בפרט, עבור $t,s\in k$ מתקיים

$$\exp(tX)\cdot\exp(sX) = \exp((t+s)X) .$$

לכן

$$\begin{aligned}a_X\colon k &\to \mathrm{GL}_n(k)\\ t &\mapsto \exp(tX)\end{aligned}$$

הומומורפיזם של חבורות.

טענה 1.2.4. *1. a_x הוא הפתרון היחיד למשוואה*

$$\begin{aligned} a'(t) &= a(t) \cdot X \\ a(0) &= I \end{aligned}$$

או למשוואה

$$\begin{aligned} a'(t) &= X \cdot a(t) \\ a(0) &= I \end{aligned}$$

עבור

$$a\colon k \to \mathsf{GL}_n(k).$$

2. a_X הוא ההומומורפיזם החלק היחיד

$$a\colon k \to \mathsf{GL}_n(k)$$

שמקיים $a'(0) = X$.

הוכחה. 1. a_X פתרון למשוואה. מתקיים

$$\begin{aligned} \frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(a_X(t)\right) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(\frac{1}{n!}(tX)^n\right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{n-1}}{(n-1)!} X^n \\ &= \exp(tX) \cdot X \\ &= X \cdot \exp(tX) \end{aligned}.$$

יחידות נובעת ממשפט קיום ויחידות למד"ר.

2. אם a הוא הומומורפיזם כלשהו, כמו שנתון, מתקיים

$$\begin{aligned} a'(t) &= \left.\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}s}\left(a(t+s)\right)\right|_{s=0} \\ &= \left.\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}s}\left(a(t) \cdot a(s)\right)\right|_{s=0} \\ &= a(t) \cdot a'(0) \\ &= a(t) \cdot X \end{aligned}$$

ומ־1 נובע $a = a_X$. ■

דוגמה 1.2.5. נחשב אקספוננט של מטריצה אלכסונית. נקבל

$$\begin{aligned} \exp\begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}^k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \begin{pmatrix} \lambda_1^k & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n^k \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \exp(\lambda_1) & & \\ & \ddots & \\ & & \exp(\lambda_n) \end{pmatrix} \end{aligned}.$$

הגדרה 1.2.6 (אופרטור ההצמדה). בהינתן $a \in \mathsf{GL}_n(k)$ נגדיר את *אופרטור ההצמדה ב־a* על ידי

$$\begin{aligned} \mathsf{Ad}(a)\colon M &\to M \\ X &\mapsto aXa^{-1} \end{aligned}.$$

סימון 1.2.7. עבור מרחב וקטורי V נסמן ב־$\mathsf{End}\left(V\right)$ את מרחב ההעתקות הלינאריות מ־V לעצמו. זהו מרחב וקטורי איזומורפי ל־M_{n^2}.

סימון 1.2.8. עבור מרחב וקטורי V נסמן ב־$\mathsf{GL}\left(V\right)\subseteq\mathsf{End}\left(V\right)$ את האנדומורפיזמים ההפיכים של V. לעתים מסמנים זאת $\mathsf{Aut}\left(V\right)$.

הערה 1.2.9. מתקיים $\mathsf{Ad}\left(a\right)\in\mathsf{GL}\left(M\right)$ כיוון ש־

$$\mathsf{Ad}\left(a^{-1}\right)\left(\mathsf{Ad}\left(a\right)\left(X\right)\right)=X.$$

כמו כן, Ad הוא הומומורפיזם של חבורות $\mathsf{GL}_n\left(k\right)\to\mathsf{GL}\left(M\right)$ כיוון שמתקיים

$$\mathsf{Ad}\left(ab\right)\left(X\right)=abX\left(ab\right)^{-1}=a\left(bXb^{-1}\right)a^{-1}=\mathsf{Ad}\left(a\right)\circ\mathsf{Ad}\left(b\right)\left(X\right).$$

תרגיל 2. אם $f\left(z\right)=\sum_{k=0}^{\infty}a_kz^k$ טור חזקות, ו־$X\in M_n$ עבורה $f\left(X\right)$ מוגדרת, מתקיים

$$\mathsf{Ad}\left(a\right)\left(f\left(X\right)\right)=f\left(\mathsf{Ad}\left(a\right)\left(X\right)\right).$$

בפרט, מתקיים

$$\mathsf{Ad}\left(a\right)\left(\exp\left(X\right)\right)=\exp\left(\mathsf{Ad}\left(a\right)\left(X\right)\right).$$

מסקנה 1.2.10. *נניח כי V מרחב וקטורי עם בסיס B. יש זיהוי*

$$\begin{aligned}\mathsf{End}\left(V\right)&\cong M_n\\ T&\leftrightarrow\left[T\right]_B\end{aligned}.$$

לכן, עבור $X\in\mathsf{End}\left(V\right)$ אפשר להגדיר $\exp\left(X\right)\in\mathsf{GL}\left(V\right)$ כאופרטור שמקיים

$$\left[\exp\left(X\right)\right]_B=\exp\left(\left[X\right]_B\right)$$

ובנייה זאת לא תלויה בבחירת הבסיס B.

הגדרה 1.2.11 (הקומוטטור). עבור $X,Y\in M$ נגדיר

$$\left[X,Y\right]=XY-YX\ .$$

הגדרה 1.2.12. עבור $X\in M$ נגדיר

$$\begin{aligned}\mathsf{ad}\left(X\right):M&\to M\\ Y&\mapsto\left[X,Y\right]\end{aligned}.$$

טענה 1.2.13. *עבור $X\in M$ מתקיים*

$$\mathsf{Ad}\left(\exp\left(X\right)\right)=\exp\left(\mathsf{ad}\left(x\right)\right).$$

הוכחה. מתקיים

$$\mathsf{Ad}\left(\exp\left(X\right)\right)\left(Y\right)=\exp\left(X\right)\cdot Y\cdot\exp\left(-X\right)$$

ומצד שני

$$\exp\left(\mathsf{ad}\left(X\right)\right)\left(Y\right)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k!}\left(\mathsf{ad}\left(X\right)\right)^k\left(Y\right)\ .$$

נגדיר

$$A\left(t\right)\coloneqq\mathsf{Ad}\left(\exp\left(tX\right)\right).$$

נחפש את $A\left(t\right)$. מתקיים

$$A\left(0\right)=\mathsf{Ad}\left(I\right)=\mathsf{id}$$

וגם

$$\begin{aligned}\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(A\left(t\right)\left(Y\right)\right)&=\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(\exp\left(tX\right)\cdot Y\cdot\exp\left(-tX\right)\right)\\ &=\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(\exp\left(tX\right)\right)Y\exp\left(-tX\right)+\exp\left(tX\right)Y\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(\exp\left(-tX\right)\right)\\ &=X\cdot A\left(t\right)\left(Y\right)+A\left(t\right)\left(Y\right)\cdot\left(-X\right)\\ &=\mathsf{ad}\left(X\right)\left(A\left(t\right)\left(Y\right)\right)\end{aligned}.$$

לכן

$$A'\left(t\right)=\mathsf{ad}\left(X\right)\cdot A\left(t\right).$$

ראינו שזה מחייב

$$A\left(t\right)=\exp\left(t\mathsf{ad}\left(X\right)\right).$$

לכן $A\left(1\right)$ מה שרצינו. ■

1.2.2 נוסחת Campbell-Baker-Hausdorff

ראינו שקיימות סביבה $U \subseteq M$ של 0 וסביבה $V \subseteq \mathsf{GL}_n(k)$ של I כך ש־$\exp\colon U \to V$ הוא הומאומורפיזם.
עבור $A, B \in V$ מספיק קרובות ל־I מתקיים $AB \in V$. כלומר, אם $A = \exp(X)$ ו־$B = \exp(Y)$ יש $Z \in V$ עבורה

$$\exp(Z) = \exp(X) \cdot \exp(Y) .$$

נחשוב על ההתאמה הזאת כפונקציה, $Z = C(X, Y)$, שמוגדרת לפחות עבור X, Y קרובים מספיק ל־0.
נרצה נוסחה עבור $C(X, Y)$, או לפחות תיאור כלשהו של C. ראינו שאם $XY = YX$ אז $C(X, Y) = X + Y$.

טענה 1.2.14 (נוסחת Campbell-Baker-Hausdorff). *באופן כללי מתקיים*

$$C(X, Y) = x + Y + \frac{1}{2}[X, Y] + \frac{1}{12}([X, [X, Y]] + [Y, [Y, X]]) + \ldots$$

כאשר שאר הביטויים הם קומוטטורים ארוכים יותר ב־X, Y.

הערה 1.2.15. מתקיים

$$C(tx, ty) = t(x + Y) + \frac{t^2}{2}[X, Y] + o\left(t^2\right).$$

הגדרה 1.2.16 (אלגברת לי של מטריצות). תת מרחב $\mathfrak{g} \leq M$ יקרא *אלגברת לי של מטריצות* אם הוא סגור תחת הקומוטטור.

מסקנה 1.2.17. *אם $X, Y \in \mathfrak{g}$ ו־$C(X, Y)$ מוגדרת, אז $C(X, Y) \in \mathfrak{g}$.*

תרגיל 3. לכל מטריצה $X \in M_n$ מתקיים

$$\det(\exp(X)) = e^{\mathrm{tr}(X)} .$$

נביט בטורי החזקות הבאים.

$$F(z) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n}{(n+1)!} z^n = \begin{cases} \frac{1-\exp(-z)}{z} & z \neq 0 \\ 1 & z = 0 \end{cases}$$

$$G(z) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{(-1)^n}{n+1} z^n = \begin{cases} \frac{\log(1+z)}{z} & z \neq 0 \\ 1 & z = 0 \end{cases}$$

כאשר G מוגדרת כשמתקיים $|z| < 1$. אז

$$G(\exp(z) - 1) \cdot \exp(z) \cdot F(z) = \frac{z}{\exp(z) - 1} \cdot \exp(z) \cdot \frac{1 - \exp(-z)}{z} = 1$$

למשל כאשר $|z| < \log(2)$.

טענה 1.2.18 (נוסחת Duhamel). *תהי $x\colon \mathbb{R} \to M_n$ מסילה חלקה. מתקיים*

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \exp(x(t)) = \exp(x(t)) F(\mathrm{ad}(x(t))(x'(t))).$$

הוכחה. נגדיר

$$Y(s, t) \coloneqq \exp(-sx(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\exp(sx(t))).$$

אז

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\exp(x(t))) = \exp(x(t)) Y(1, t)$$

וגם

$$Y(0, t) = 0.$$

אז

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Y}{\partial s} &= \exp(-sx(t)) \cdot (-x(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\exp(sx(t))) + \exp(-sx(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(x(t)\exp(sx(t))) \\
&= \exp(-sx(t)) \cdot x'(t) \cdot \exp(sx(t)) \\
&= \mathrm{Ad}(\exp(-sx(t)))(x'(t)) \\
&= \exp(\mathrm{ad}(-sx(t)))(x'(t)) \\
&= \exp(-s\,\mathrm{ad}(x(t)))(x'(t))
\end{aligned}$$

ולכן

$$\begin{aligned}Y(1,t) &= \int_0^1 \frac{\partial Y}{\partial s}(s,t)\,\mathrm{d}s\\ &= \int_0^1 \sum_{n\in\mathbb{N}} \frac{(-1)^n s^n}{n!}(\mathrm{ad}(x(t)))^n (x'(t))\,\mathrm{d}s\\ &= \sum_{n\in\mathbb{N}} \int_0^1 \frac{(-1)^n s^n}{n!}(\mathrm{ad}(x(t)))^n (x'(t))\,\mathrm{d}s\\ &= \sum_{n\in\mathbb{N}} \frac{(-1)^n}{(n+1)!}(\mathrm{ad}(x(t)))^n (x'(t))\\ &= F(\mathrm{ad}(x(t)))(x'(t))\end{aligned}$$

כנדרש. ■

סימון 1.2.19. נסמן

$$.[X_1, X_2, \ldots, X_k] \coloneqq [X_1, \ldots, [X_{k+2}, [X_{k+1,X_k}]]]$$

תרגיל 4. אם $C(X,Y)$ מוגדר, גם $C(tX,tY)$ מוגדר לכל $t\in(0,1)$.

טענה 1.2.20 (נוסחת $Dynkin$ (1947)). *אם $C(X,Y)$ מוגדר אז*

$$.C(X,Y) = \sum_{k\in\mathbb{N}_+} \frac{(-1)^{k-1}}{k} \sum_{\substack{i_1,\ldots,i_k\in\mathbb{N}\\ j_1,\ldots,j_k\in\mathbb{N}\\ \forall n\in\mathbb{N}:\, i_n+j_n>0}} \frac{1}{(i_1+j_1)\cdot\ldots\cdot(i_k+j_k)\cdot i_1!j_1!\cdot\ldots\cdot i_k!j_k!}[\underbrace{X,\ldots,X}_{i_1},\underbrace{Y,\ldots,Y}_{j_1},\ldots,\underbrace{X,\ldots,X}_{i_k},\underbrace{Y,\ldots,Y}_{j_k}]$$

הוכחה. נגדיר

$$Z(t) = C(tX,tY)$$

עבור $t\in(0,1)$, ונגדיר $Z(0)=0$. אז

$$\exp Z(t) = \exp(tX)\cdot\exp(tY)$$

ולכן

$$\begin{aligned}\mathrm{Ad}(\exp Z(t)) &= \mathrm{Ad}(\exp(tX))\,\mathrm{Ad}(\exp(tY))\\ \exp(\mathrm{ad}\,Z(t)) &= \exp(\mathrm{ad}(tX))\exp(\mathrm{ad}(tY))\\ . \qquad &= \exp(t\,\mathrm{ad}(X))\exp(t\,\mathrm{ad}(Y))\end{aligned}$$

לכן מתקיים

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\exp Z(t)) = X\exp(Z(t)) + \exp(Z(t))\cdot Y$$

ומצד שני

$$.\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\exp Z(t)) = \exp(Z(t))\cdot F(\mathrm{ad}\,Z(t))(Z'(t))$$

לכן

$$X\exp(Z(t)) + \exp(Z(t))\cdot Y = \exp(Z(t))\cdot F(\mathrm{ad}\,Z(t))(Z'(t))$$

ולאחר פישוט נקבל

$$\begin{aligned}F(\mathrm{ad}\,Z(t))(Z'(t)) &= \mathrm{Ad}(\exp(-Z(t)))(X)+Y\\ &= \exp(-ad(Z(t)))(X)+Y\end{aligned}$$

לכן

$$\begin{aligned}Z'(t) &= (G(\exp(\mathrm{ad}(Z(t)))-I)\exp(\mathrm{ad}(Z(t))))(\exp(-ad(Z(t)))(X)+Y)\\ &= G(\exp(\mathrm{ad}(Z(t)))-I)(X+\exp(\mathrm{ad}\,Z(t))(Y))\\ &= \sum_{k\in\mathbb{N}} \frac{(-1)^k}{k+1}(\exp(t\,\mathrm{ad}\,X)\exp(t\,\mathrm{ad}\,Y)-I)^k (X+\exp(\mathrm{ad}(Z(t)))(Y))\end{aligned}$$

כאשר

$$\exp\left(t\,\mathrm{ad}\left(Y\right)\right)\left(Y\right)=\sum_{j\in\mathbb{N}}\frac{1}{j!}t^{j}\left(\mathrm{ad}\left(Y\right)\right)^{j}\left(Y\right)=Y$$

ולכן

$$\begin{aligned}Z'\left(t\right)&=\sum_{k\in\mathbb{N}}\frac{\left(-1\right)^{k}}{k+1}\left(\exp\left(t\,\mathrm{ad}\,X\right)\exp\left(t\,\mathrm{ad}\,Y\right)-I\right)^{k}\left(X+\exp\left(t\,\mathrm{ad}\left(X\right)\right)\left(Y\right)\right)\\&=\sum_{k\in\mathbb{N}}\frac{\left(-1\right)^{k}}{k+1}\sum_{n\in\mathbb{N}}t^{n}\left[\text{sums of commutators in } X \text{ and } Y\right]\end{aligned}.$$

אז

$$.C\left(X,Y\right)Z\left(1\right)=\int_{0}^{1}Z'\left(t\right)\mathrm{d}t$$

על ידי אינטגרציה איבר איבר בטור של Z' נגיע לנוסחה עבור $C\left(X,Y\right)$ ונקבל את הנדרש. ■

הערה 1.2.21. מתקיים

$$.C\left(X,Y\right)=\log\left(\exp\left(X\right)\cdot\exp\left(Y\right)\right)$$

פרק 2

אלגבראות לי

2.1 חבורות לי ואלגבראות לי

2.1.1 מאלגבראות לי לחבורות לי

לכל $V \leq M_n(\mathbb{R})$ נגדיר חבורת מטריצות

$$\Gamma(V) \coloneqq \{\exp(X_1) \cdot \ldots \cdot \exp(X_m) \mid x_1, \ldots, x_m \in V\} \leq \mathrm{GL}_n(k)$$

שהיא תת־חבורת מטריצות של $\mathrm{GL}_n(k)$.

2.1.2 מחבורות לי לאלגבראות לי

בכיוון ההפוך, עבור כל תת־חבורה $G \leq \mathrm{GL}_n(k)$ נגדיר את *המרחב המשיק* ל־G על ידי

$$\mathfrak{g} \coloneqq \mathrm{Lie}(G) = \left\{ X \in M_n \;\middle|\; \exists \gamma\colon (-\varepsilon, \varepsilon) \to G\colon \substack{\gamma \in \mathscr{C}^1 \\ \gamma(0) = I \\ \gamma'(0) = X} \right\}.$$

טענה 2.1.1. *1. $\mathfrak{g}$ מרחב וקטורי.*

2. עבור $X \in \mathfrak{g}$ ו־$a \in G$ מתקיים

$$\mathrm{Ad}(a)(X) \in \mathfrak{g}.$$

3. $\mathfrak{g}$ אלגברת לי.

הוכחה. 1. תהיינה $X, Y \in \mathfrak{g}$ ויהיו $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. נניח כי a, b מסילות ב־G עבורן

$$a(0) = b(0) = I$$
$$a'(0) = X$$
$$b'(0) = Y.$$

נגדיר

$$c(t) \coloneqq a(\alpha t) \cdot b(\beta(t)) \in G$$
$$c(0) = I.$$

אז

$$c'(0) = \alpha a'(0) b(0) + \beta a(0) b'(0) = \alpha X + \beta Y \in \mathfrak{g}.$$

2. תהי γ מסילה ב־G עם $\gamma(0) = I$ ו־$\gamma'(0) = X$. לכל t בתחום ההגדרה של γ מתקיים

$$\delta(t)\,\mathrm{Ad}(a)(\gamma(t)) \in G.$$

אז

$$\begin{aligned}
\delta(0) &= \mathrm{Ad}(a)(I) = I \\
\delta'(0) &= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(a\gamma(t)a^{-1}\right)\Big|_{t=0} \\
&= \mathrm{Ad}(a)(\gamma'(0)) \\
&= \mathrm{Ad}(a)(X)
\end{aligned}$$

כנדרש.

3. יהיו $X,Y\in\mathfrak{g}$ ו־a,b מסילות ב־G עבורן $a'(0)=X, b'(0)=Y$. יהי

$$I=a(t)\,a(t)^{-1}$$

ואז

$$0=a'(0)\cdot a(0)^{-1}+a(0)\,\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(a(t)^{-1}\right)\bigg|_{t=0}.$$

לכן

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(a(t)^{-1}\right)\bigg|_{t=0}=-a'(0)=-X\,.$$

אז

$$\gamma(t)=\mathrm{Ad}(a(t))(Y)\in\mathfrak{g}$$

ומתקיים

$$\begin{aligned}\gamma'(0)&=a'(0)\cdot Y\cdot a(0)^{-1}+a(0)\,Y\,\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(a(t)^{-1}\right)\bigg|_{t=0}\\&=X\cdot Y\cdot Y+I\cdot Y\cdot(-X)\\&=[X,Y]\end{aligned}$$

לכן

$$[X,Y]=\gamma'(0)\in\mathfrak{g}\,.$$

■

נרצה להראות שתחת תנאים מתאימים, ההעתקות Γ ,Lie הופכיות אחת לשנייה. כלומר, נרצה ליצור התאמה חח"ע בין חבורות מטריצות מסוימות לבין אלגבראות לי.

ליתר דיוק, נוכיח שלושה דברים מרכזיים.

1. לכל אלגברת לי $\mathfrak{g}\le M_n$ ממשית מתקיים
$\mathfrak{g}=\mathrm{Lie}(\Gamma(\mathfrak{g}))$.

2. עבור כל תת־חבורה $G\le \mathrm{GL}_n(k)$ מתקיים
$\Gamma(\mathrm{Lie}(G))\le G$.

3. נחפש תנאים על G עבורם
$\Gamma(\mathrm{Lie}(G))=G$.

חבורה G כזאת תיקרא בהמשך *קשירה*.

נוכיח את משפט התת־חבורה הסגורה: אם $G\le\mathrm{GL}_n(k)$ תת־חבורה סגורה וקשירה, מתקיים

$$\Gamma(\mathrm{Lie}(G))=G.$$

הערה 2.1.2. בנינו התאמה בין חבורות לי של מטריצות לאלגבראות לי של מטריצות. ניתן להתאים באופן כללי בין חבורות לי לאלגבראות לי (אבסטרקטיות).

קיים משפט שאומר שכל אלגברת לי כזאת איזומורפית לאלגברת לי של מטריצות, ונקבל מדיון זה שחבורת לי כללית היא חבורת כיסוי של חבורות לי של מטריצות.

דוגמה 2.1.3. החבורה $G\le\mathrm{GL}_n(k)$ של מטריצות אלכסוניות הפיכות איזומורפית ל־$(k^\times)^n$.

מתקיים

$$\mathrm{Lie}(G)=\left\{X\in M_n\;\middle|\;\substack{\exists\gamma\colon(-\varepsilon,\varepsilon)\to G\\ \gamma(0)=I\\ \gamma'(0)=X}\right\}.$$

במקרה זה $\mathrm{Lie}(G)$ אלגברת המטריצות האלכסוניות, שהאיזומורפית ל־k^n.

זה נכון כי לכל $X=\mathrm{diag}(x_1,\ldots,x_n)$ נוכל להביט במסילה $\gamma(t)=\mathrm{diag}(1+tx_1,\ldots,1+tx_n)\in G$. מתקיים כאן

$$[X,Y]=0\,.$$

הגדרה 2.1.4. עבור $\mathfrak{g}\le M$ אלגברת לי, נגדיר

$$\Gamma(\mathfrak{g}):=\left\{\exp(X_1)\cdot\ldots\cdot\exp(X_t)\;\middle|\;(X_i)_{i\in[t]}\in\mathfrak{g}\right\}\le\mathrm{GL}_n(k).$$

דוגמה 2.1.5. אם $\mathfrak{g}$ האלגברה של מטריצות אלכסוניות נקבל

$$\Gamma\left(g\right)=\left\{ \mathsf{diag}\left(e^{\lambda_{1}},\ldots,e^{\lambda_{n}}\right)\;\middle|\;\left(\lambda_{i}\right)_{i\in[n]}\subseteq k\right\}$$

כי $e^{\lambda}e^{\mu}=e^{\lambda+\mu}$.

אם $k=\mathbb{C}\setminus\{0\}$, כל z ניתן לכתיבה כ־e^{a}. עבור $G=\left(k^{\times}\right)^{n}$ נקבל

$$\Gamma\left(\mathsf{Lie}\left(G\right)\right)=G.$$

אם $k=\mathbb{R}$ נקבל כי e^{a} מכסה את המספרים החיוביים אז

$$\Gamma\left(\mathsf{Lie}\left(G\right)\right)=\left\{ \mathsf{diag}\left(a_{1},\ldots,a_{n}\right)\mid\forall i\in[n]\colon a_{i}>0\right\} \cong\left(R_{>0}\right)^{n}.$$

אם נחשוב על הטופולוגיה של G נגלה שהיא לא קשירה וש־$\Gamma\left(\mathsf{Lie}\left(G\right)\right)$ רכיב קשירות של G.

נסמן $\mathfrak{g}=\mathsf{Lie}\left(G\right)$. ו־$k\in\{\mathbb{R},\mathbb{C}\}$. אז $\mathsf{exp}\colon\mathfrak{g}\to G$ הוא הומומורפיזם בין $\left(k^{n},+\right)\cong\left(\mathfrak{g},+\right)$ ל־G. כאשר $k=\mathbb{R}$ זה איזומורפיזם

$$\mathsf{exp}\colon\mathfrak{g}\xrightarrow{\sim}\Gamma\left(\mathsf{Lie}\left(G\right)\right).$$

אם $k=\mathbb{C}$, יהיה גרעין, כי $e^{2\pi ki}=1$ עבור k שלם. עבור $n=1$ למשל, נקבל העתקת כיסוי

$$\mathsf{exp}\colon\;\left(\mathbb{C},+\right)\to\left(\mathbb{C}^{\times},\cdot\right).$$

דוגמה 2.1.6. נחשוב האם $\left(k^{n},+\right)$ היא חבורת מטריצות, ואם כן מה אלגברת לי שלה.

התשובה היא כן, מתקיים

$$G=\left\{ \begin{pmatrix}1 & \cdots & 0 & \cdots & x_{1}\\ \vdots\\ 0 & & \ddots\\ \vdots & & & & x_{n}\\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}\;\middle|\;\left(x_{i}\right)_{i\in[n]}\subseteq k\right\} \le\mathsf{GL}_{n+1}\left(k\right).$$

דוגמה 2.1.7. מתקיים

$$\mathsf{Lie}\left(G\right)=\left\{ \begin{pmatrix}0 & \cdots & 0 & \cdots & x_{1}\\ \vdots\\ 0 & & \ddots\\ \vdots & & & & x_{n}\\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}\;\middle|\;\left(x_{i}\right)_{i\in[n]}\subseteq k\right\} \le\mathsf{GL}_{n+1}\left(k\right)$$

ו־$\mathsf{exp}\colon\;\left(\mathsf{Lie}\left(G\right),+\right)\xrightarrow{\sim}G$ איזומורפיזם.

נשים לב כי מתקיים

$$\mathsf{det}\left(\mathsf{exp}\left(X\right)\right)=e^{\mathsf{tr}\,X}$$

וניתן דוגמאות למשפחות של חבורות לי.

דוגמאות (דוגמאות למשפחות של חבורות לי).

1.

$$\mathsf{SL}_{n}\left(k\right)=\left\{ g\in\mathsf{GL}_{n}\left(k\right)\;\middle|\;\mathsf{det}\left(g\right)=1\right\}$$

עם אלגברת לי

$$*\mathfrak{sl}_{n}\left(k\right)=\left\{ X\in M_{n}\;\middle|\;\mathsf{tr}\left(X\right)=0\right\}$$

כפי ששנראה.

תהי $X\in\mathfrak{sl}_{n}$. תהי $\gamma\left(t\right)=\mathsf{exp}\left(tX\right)\in\mathsf{SL}_{n}\left(k\right)$. אז $\gamma\left(0\right)=I$ ו־$\gamma'\left(0\right)=X$. מתקיים

$$\mathfrak{sl}_{n}\subseteq\mathsf{Lie}\left(\mathsf{SL}_{n}\left(k\right)\right)$$

ולמעשה יש שוויון: אם $\gamma\left(t\right)\in\mathsf{SL}_{n}\left(k\right)$ וגם $\gamma\left(0\right)=I,\gamma'\left(0\right)=X$ מתקיים

$$0\underset{[\gamma(t)\in\mathsf{SL}_{n}]}{=}\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}t}\left(\mathsf{det}\left(\gamma\left(t\right)\right)\right)_{t=0}=\mathsf{tr}\left(\gamma'\left(0\right)\right)=\mathsf{tr}\left(X\right)$$

ולכן באמת $\mathfrak{sl}_{n}=\mathsf{Lie}\left(\mathsf{SL}_{n}\left(k\right)\right)$.

2.

$$\mathcal{O}(n) = \left\{ g \in \mathsf{GL}_n(\mathbb{R}) \;\middle|\; g^t \cdot g = I \right\}$$

3.

$$SO(n) = \mathcal{O}(n) \cap \mathsf{SL}_n(\mathbb{R})$$

עם אלגברת לי

$$\mathfrak{so}_n = \left\{ X \in M_n(\mathbb{R}) \;\middle|\; X^t = -X \right\}.$$

4.

$$U(n) = \left\{ g \in \mathsf{GL}_n(\mathbb{C}) \;\middle|\; \bar{g}^t \cdot g = I \right\}$$

עם אלגברת לי

$$\mathfrak{u}_n = \left\{ X \in M_n(\mathbb{C}) \;\middle|\; \bar{X}^t = -X \right\}.$$

5.

$$\mathbb{SU}(n) = U(n) \cap \mathsf{SL}_n(\mathbb{C})$$

עם אלגברת לי

$$\mathfrak{su}_n = \mathfrak{u}_n \cap \mathfrak{sl}_n(\mathbb{C}).$$

טענה 2.1.8. *1. מתקיים*

$$\mathfrak{so}_n = \mathsf{Lie}(\mathsf{SO}(n)) = \mathsf{Lie}(\mathcal{O}(n)).$$

2. מתקיים

$$\mathfrak{su}_n = \mathsf{Lie}(\mathsf{SU}(n)).$$

הוכחה. 1. תהי

$$\gamma\colon (-\varepsilon, \varepsilon) \to \mathsf{SO}(n).$$

אז

$$\forall s \in (-\varepsilon, \varepsilon) :\ (\gamma(s))^t \gamma(s) = I.$$

נגזור את המשווה ונקבל

$$\frac{\mathsf{d}}{\mathsf{d}s}\left(\gamma(s)^t\right)_{s=0} \cdot \cancelto{I}{\gamma(0)} + \cancelto{I}{\gamma(0)^t} \cdot \gamma'(0) = 0.$$

שחלוף מתחלף עם נגזרת, לכן נקבל

$$\gamma'(0)^t + \gamma'(0) = 0.$$

לכן $\gamma'(0) \in \mathfrak{so}_n$.
להיפך, אם

$$\begin{aligned} \exp(sX)^t &= \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{1}{n!} s^n \left(X^t\right)^n \\ &= \exp\left(sX^t\right) \\ &= \exp(-sX) \\ &= \exp(sX)^{-1} \end{aligned}.$$

לכן $\exp(sX) \in \mathcal{O}(n)$. ראינו שאם $X \in \mathfrak{sl}_n$ אז $\exp(sX) \in \mathsf{SL}_n(\mathbb{R})$, לכן $\gamma(s) = \exp(sX) \in \mathsf{SO}(n)$. אכן מתקיים $\gamma(0) = I, \gamma'(0) = X$.

2. ההוכחה דומה. ■