

주의 및 추가

연습문제 0. 표지 그림은 LCG (Linear Congruence Generator) 를 이용하여 만들어졌다. 즉, $x_1 = 1015568748$ 에서 시작하여

$$x_{n+1} \equiv ax_n + b \pmod{N}$$

을 이용하여 (보기 12.2.8의 표기법 참조), x_2, x_3, \dots 를 구한 후 모두 10-digit의 수로 나타낸 것이다. 따라서, 각 row에는 각각 5개의 10-digit의 수가 있다. 예를 들어, $x_2 = 1586005467$ 이고, $x_{21} = 0927463856$ 이다 (x_{21} 은 실제로는 9자리 수). **이때, 자연수 a, b 와 N 을 구하라.**

주의 1. 이 책에서 [최초의 1]은 항상 정의 1.2.2에 있는 의미로 사용된다. 따라서, 정리 4.4.4의 증명이나 보기 5.4.14 등의 [최초의 1을 포함하는 column]의 표현도 정의 1.2.2에 있는 의미로 받아들여야 한다. 예를 들어, 연습문제 1.2.1(나)항의 (4×7) -행렬에서 $(1, 2)$ -성분의 1은 [최초의 1]이 아니고, 따라서 이 행렬의 second column은 [최초의 1을 포함하는 column]이 아니다.

주의 2. 주의 3.2.5는 여전히 미묘하다. 이는 $\{a, b\} = \{a, a, b\}$ 이므로 생기는 피할 수 없는 문제이다. 우리가 “집합 S 가 일차종속(일차독립)”이라고 말할 때에는 S 의 한 원소를 두 번 이상 ‘쓰지’ 않는 것으로 이해해야 한다. 만약 이 원칙이 없다면 집합 S 의 일차종속(일차독립) 여부를 판정할 수 없을 것이다. 물론 집합을 원소나열법으로 나타낼 때는 주의 3.2.5의 원칙을 따른다.

추가 3. 정리 5.3.5(선형대수학의 기본정리)에서 함수 $\Phi_{\mathbb{C}}^{\otimes} : \mathfrak{M}_{m,n}(F) \rightarrow \mathfrak{L}(V, W)$ 가 well-defined되어 있는지 설명이 필요. 즉, $A \in \mathfrak{M}_{m,n}(F)$ 일 때, $\Phi_{\mathbb{C}}^{\otimes}(A) \in \mathfrak{L}(V, W)$ 인지 확인하여야 한다.

추가 4. §5.4에 **Rank Theorem**의 새 증명 추가: $A \in \mathfrak{M}_{m,n}(F)$ 일 때, $UA = R$ 을 A 의 row-reduced echelon form이라고 하자(단, $U \in \mathfrak{M}_{m,m}(F)$ 는 가역). 그러면, A 와 R 의 row rank는 같다(따름정리 4.4.7). 한편, L_U 는 isomorphism이므로, A 와 R 의 column rank도 같다(왜 그런가?). 이제 행 간소 사다리꼴의 row rank와 column rank는 당연히 같으므로, 증명 끝.

추가 5. 연습문제 5.5.9에 추가: $[\alpha_{\mathfrak{B}}^{\mathcal{E}} = L_P, \alpha_{\mathcal{F}}^{\mathcal{C}} = L_Q]$.

추가 6. §5.6에 **row-reduced echelon form**의 **uniqueness** 새 증명 추가: Elementary row operation은 row space를 변화시키지 않으므로, 아래 보조정리에 의해 당연.

보조정리 $R, S \in \mathfrak{M}_{m,n}(F)$ 가 row-reduced echelon form 이고, R 의 row space와 S 의 row space가 같으면, $R = S$.

증명: 우선, row-reduced echelon form의 일반적인 모습은 다음과 같다:

$$[L_A]_{\mathcal{C}}^{\mathcal{E}} = \begin{matrix} & k_1 & & k_2 & & k_3 & & & \\ & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & & \\ \begin{pmatrix} \mathbf{0} & 1 & * & 0 & * & 0 & * & \dots \\ \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 1 & * & 0 & * & \dots \\ \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 1 & * & \dots \\ \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & 0 & \mathbf{0} & \dots \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

위 행렬에서, 굵은 $\mathbf{0}$ 이나 $*$ 는 여러 column을 계속할 수도 있다는(없을 수도 있고) 뜻이고, $*$ 는 무언가(zero 이면 non-zero 이면) 있다는 뜻이다. 물론 k_1, \dots, k_r 은 [최초의 1]을 갖는 column의 위치를 나타낸다.

[Step 1] Row space가 같으면, 그의 dimension(즉, row rank)도 같다. 그리고 row-reduced echelon form의 row rank는 당연히 [최초의 1]의 개수와 같다. 이제 R, S 의 (공통의) row rank를 r 로 표기하자.¹

[Step 2] R, S 의 첫 번째 row의 [최초의 1]의 위치(즉, 위 행렬의 k_1)는 같다. 왜냐하면, k_1 은 R, S 의 row space에 속하는 vector들의 첫 번째 non-zero 좌표이기 때문이다.

[Step 3] 위 행렬에서 첫 번째 row를 제거해도 row-reduced echelon form이 남는다.² 뿐만 아니라, R, S 의 첫 번째 row를 제거한 두 행렬도 여전히 같은 row space를 갖는다. 이를 증명하려면, $2 \leq i \leq r$ 일 때, $[R]_i \in \langle [S]_2, \dots, [S]_r \rangle$ 임을 보이면 된다(왜 그런가?). 그런데

¹만약 $r = 0$ 이면, $R = S = 0$ 이므로, $r > 0$ 이라고 가정하자.
²물론 $m > 1$ 일 때.

$$[R]_i = a_1[S]_1 + a_2[S]_2 + \cdots + a_r[S]_r$$

인 $a_1, \dots, a_r \in F$ 가 존재하고, 이 식 양변의 k_1 -좌표를 비교하면, $0 = a_1$ 임을 알 수 있다. 앞 [Step 2]에 의해, $[R]_i$ 의 [최초의 1]의 위치는 k_1 보다 크기 때문이다. (따라서, 이제 r 에 관한(또는 m 에 관한) 귀납법이 가능하다.)

[Step 4] 앞 [Step 3]를 이용하는 귀납법과 [Step 2]에 의해, R, S 의 [최초의 1]의 위치 k_1, \dots, k_r 은 모두 같다.

[Step 5] $[R]_1 = [S]_1$ 이다. 이를 증명하기 위해

$$[R]_1 = b_1[S]_1 + b_2[S]_2 + \cdots + b_r[S]_r$$

이라고 하자(단, $b_1, \dots, b_r \in F$). 먼저 이 식 양변의 k_1 -좌표를 비교하면 $1 = b_1$ 임을 알 수 있다. 그리고, $1 < i \leq r$ 일 때, 이 식 양변의 k_i -좌표를 비교하면 — [Step 4]에 의해 $[R]_1$ 의 k_i -좌표는 0이므로 — $0 = b_i$ 인 것도 알 수 있다.

[Step 6] 이제 [Step 3]의 귀납법을 다시 사용하면, [Step 5]에 의해, $R = S$. \square

주의 7. 논리적으로는 정리 7.4.3 (minimal polynomial의 존재와 유일성)이 관찰 7.4.2보다 먼저 다루어져야 할 것이다.

추가 8. 연습문제 11.7.7(마)항 추가; $|x| = n$ 이면, $[x^a = x^b \text{ if and only if } a \equiv b \pmod{n}]$.

주의 9. 연습문제 12.3.23(나)항은 §12.5를 공부한 후에 풀 수 있다.

정오표

- p. 6, 1 행; $A \in \mathfrak{M}_{n,n}(F) \rightarrow A, B \in \mathfrak{M}_{n,n}(F)$.
- p. 40, 7 행; 모든 finite subset \rightarrow 모든 (non-empty) finite subset.
- p. 45, 밑 10 행; $(j = 1, \dots, n) \rightarrow (i = 1, \dots, n)$.
- p. 46, 12 행; $w_j = \sum_j \rightarrow w_j = \sum_i$.
- p. 101, 밑 12 행; 위 (다-ii)를 (나)항의 \rightarrow 위 (나-ii)를 (가)항의.
- p. 109, 6 행; $[(3) \Leftrightarrow (6)] \rightarrow [(6) \Leftrightarrow (9)]$.
- p. 122, 6 행, 밑 5 행, 밑 4 행; $Y_n \rightarrow Y_m$.
- p. 122, 밑 2 행; $(n - r) \rightarrow (m - r)$.
- p. 124, 12 행; $V \times \dots V \rightarrow V \times \dots \times V$.
- p. 126, 밑 4 행; $\mathbf{e}_3) \rightarrow \mathbf{e}_3|$.
- p. 133, 2 행; $S_n \rightarrow A_n$.
- p. 139, 4 행; matrix \rightarrow matrix.
- p. 147, 9 행; $\widehat{A}_{ik} \rightarrow \widehat{A}_{ij}$.
- p. 147, 12 행; $D^i(A) \rightarrow D_i(A)$.
- p. 151, 15 행; $x_i \rightarrow x_j$.
- p. 153, 註; $A\mathbf{e}_j = \sum_{i=j}^n a_{ij}\mathbf{e}_i \rightarrow A\mathbf{e}_j = \sum_{i=1}^j a_{ij}\mathbf{e}_i$.
- p. 161, 7 행; $0 \neq v \in F \rightarrow 0 \neq v \in V$.
- p. 165, 관찰 7.2.4; $[L]_{\mathfrak{B}}^{\mathfrak{B}}$ 가 diagonalizable $\rightarrow [L]_{\mathfrak{B}}^{\mathfrak{B}}$ 가 diagonal.
- p. 167, 2 행; 이 식의 계속 \rightarrow 이 식에 계속.
- p. 173, 밑 1 행; $0 \neq a \in F \rightarrow a \in F$.
- p. 174, 1 행; $m_A \rightarrow m_T$.
- p. 180, 4 행; $i = 1, \dots, k \rightarrow i = 1, \dots, k$.
- p. 201, 16 행; $\deg(m_A) \rightarrow \deg(m_T)$.
- p. 206, 밑 11 행; $p(t)^{r_{ij}} \rightarrow p_i(t)^{r_{ij}}$.
- p. 213, 밑 10 행; orthogonal \dots 부분공간들만 $\rightarrow S^\perp$ 를 생각할 때는 S 가 \mathbb{R}^n 의 부분공간인 경우만.
- p. 218, 13 행; 를 고정하면 \rightarrow 의 원소를 모두 고정하면.
- p. 224, 밑 7 행; $L \in \mathfrak{M}_{n,n}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathfrak{L}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$.
- p. 243, 밑 9 행; $\langle u, v \rangle + \langle u, w \rangle \rightarrow \langle u, w \rangle + \langle v, w \rangle$.
- p. 244, 밑 5 행; \mathbb{R}^2 의 새로운 $\rightarrow V$ 의 새로운.

- p. 250, 11 행; $n \rightarrow \dim V$.
- p. 273, 9 행 및 밑 4 행; 관찰 \rightarrow 명제.
- p. 274, 밑 6 행; 따라서, A 가 \rightarrow 따라서, $m \geq n$ 일 때, A 가.
- p. 287, 밑 5 행; 의 세가지 $\dots\dots$ 세번째 \rightarrow 을 비롯한 네가지 가능성뿐임을 알 수 있다 (지면 관계로 하나는 생략). 독자들은 두번째와 세번째 그리고 생략된 네번째.
- p. 303, 5 행; $n < \infty$ 일 $\rightarrow n$ (단, n 은 자연수) 일.
- p. 323, 4 행; $x, y \rightarrow x \neq y$.
- p. 326, 1 행; partition \rightarrow partition.
- p. 344, 6 행; φ 의 역함수 $\rightarrow \bar{\varphi}$ 의 역함수.
- p. 356, 9 행; (3×3) -행렬들에서 $\lambda_i \rightarrow *$.
- p. 356, 밑 7 행; $a_1 \rightarrow a_0$.
- p. 394, 11 행; $V^{**} \rightarrow V^*$.
- p. 405, 10 행; $\mathfrak{L}(V, V) \rightarrow \mathfrak{L}(V, W)$.
- p. 410,; 15.1.10 (가) \rightarrow 15.1.10.
- p. 417, 밑 2 행; 14.9.3 \rightarrow 14.9.4.
- p. 420, 밑 5 행 (두 곳); geomtery \rightarrow geometry.
- p. 425; 관찰 16.1.4 증명; B, H 를 \langle, \rangle 로 표기.
- p. 428, 밑 7 행; hyphothesis \rightarrow hypothesis.
- p. 429, 8 행; $D_n(F) \rightarrow D_n(\mathbb{C})$.