

회전 기준틀에서의 실험 연구 (Experimental studies in rotating reference frames)

모든 물리 현상의 연구에서, 적절한 기준틀 (reference frame) 을 선택하는 것은 필수적이고 매우 중요한 단계이다. 대부분의 경우 그 선택이 너무 당연해서 언급조차 하지 않지만, 자신의 가정을 자각하는 것은 여전히 결정적으로 중요하다. 주된 이유는 다음과 같다:

물리 법칙은 관성 기준틀 (*inertial reference frame*) 에서 적용될 때 성립한다.

관성 기준틀의 정의 (뉴턴의 관성 법칙이 성립하는 틀) 가 다소 순환적으로 보이고 실제로 구현하기 어려워 보일 수 있지만, 매우 유용한 특징을 제공한다:

두 관성 기준틀의 상대 운동은 병진 (*translational*) 이며 등속 (*uniform*) 이어야 한다.

진짜 문제는 다른 종류의 기준틀 상대 운동을 고려할 때, 즉 적어도 하나가 비관성 (*non-inertial*) 일 때 발생한다. 비관성 틀을 연구할 때는 우리가 아는 형태의 물리 법칙을 그대로 적용할 수 없다. 그러면 다음 접근법 중 하나에 의존해야 한다: 관성 틀에서 추론한 뒤 그 결과를 원하는 비관성 틀로 변환하거나, 아니면 사용하는 법칙들의 집합을 미리 적절히 수정하여 비관성 틀에서 추론하는 것이다.

이 두 번째 접근법은 매우 신중하게 사용해야 한다 — 결국 물리 법칙을 수정하는 것은 아무나 할 수 있는 일이 아니다! 그러나 어떤 상황에서는 비관성 틀에서 추론하는 것이 그저 더 합리적이다. 예를 들어 자전하는 지구의 경우, 태양을 관성 틀로 가정한다면 지구 바람의 흐름을 태양에 대해 연구하는 것은 불필요하게 복잡한 일이 될 것이다. 익숙하지 않은 새로운 법칙 집합을 따라야 하더라도, 이 과정을 지구에 대해 연구하는 편을 선호할 것이다. 미리 알려두자면 (*Spoiler alert*): 이 과제의 끝에서 바로 이것을 하게 될 것이다!

관성 기준틀에 대해 균일하게 회전하는 기준틀의 간단한 경우를 고려하자. 회전 틀의 (고정 틀에 대한) 각속도를 $\vec{\omega}$ 라 하자. 회전 틀에서 위치 $\vec{r}$, 속도 $\vec{v}$, 가속도 $\vec{a}$ 로 움직이는 점질량 m 의 운동을 연구하자. 다른 물체들과 상호작용하는 알짜힘을 $\vec{F}$ 라 하자. 그러면 우리 점질량이 다음 운동 방정식을 따름을 보일 수 있다:

$$m(\vec{a} + 2\vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})) = \vec{F}$$

간단한 정리 후, 다음을 얻는다:

$$m\vec{a} = \vec{F} - 2m\vec{\omega} \times \vec{v} - m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (1)$$

이 표현이 원래의 뉴턴 제 2 법칙과 얼마나 비슷한지 주목하라. 우변의 둘째 항과 셋째 항을 우리 점질량에 작용하는 추가적인 힘으로 해석할 수 있다. 둘째 항을 코리올리 힘 (Coriolis force), 셋째 항을 원심력 (centrifugal force) 이라 부른다.

겉보기에 뉴턴 제 2 법칙을 “고치는” 이 해석은, 뉴턴 제 3 법칙을 고려할 때 혼란을 줄 수 있다 — 가상의 힘 (fictitious force, 즉 단지 수학적 기교) 인 코리올리 힘과 원심력은 그에 대응하는 크기가 같고 방향이 반대인 반작용을 가지지 않는다!

이 추가 항들은 (회전 기준틀에서 본) 움직이는 물체에 흥미롭고 비직관적인 효과를 일으킨다. 이 문제의 Part A에서는 회전 기준틀에서 찍은 영상을 분석하여 그 효과를 이해하려 시도한다. Part B에서는 앞서 얻은 지식을 사용하여 바람을 분석한다.

Part A 와 Part B 는 독립적이다. 어떤 순서로 풀어도 된다.

Part A

이 부분에서는 모든 과정을 어떤 관성 기준틀에 대해 각속력 $\vec{\omega} = \omega \hat{z}$ 로 회전하는 틀 $Oxyz$ 에서 고려한다. 회전축은 원점 O 를 지난다. 모든 답은 회전 틀에 대해 주어야 한다.

먼저, 질량 m 인 비상호작용 입자 ($\vec{F} = \vec{0}$) 의 간단한 경우를 다룬다. $t = 0$ 에서 이 점질량이 $x = 0$, $y = R$, $z = 0$ 에 위치하고 속도 $\vec{v}_0 = -v_0\hat{y}$ 를 가진다고 하자. 이 경우 운동 방정식은 다음 해를 가진다:

$$x(t) = -\omega R t \cos(\omega t) + (R - v_0 t) \sin(\omega t)$$

$$y(t) = (R - v_0 t) \cos(\omega t) + \omega R t \sin(\omega t)$$

A1	이 해가 식 (1) 을 만족함을 확인하라.	1 점
-----------	-------------------------	------------

운동 시작 부근의 작은 시간에서, 그리고 어떤 초기 속력 범위에서는, 두 가상의 힘 중 하나를 무시할 수 있어 궤적이 원이 된다.

A2	1. 원형 궤적을 얻기 위해 두 가상의 힘 중 어느 것을 무시해야 하는가? 2. 이 극한에서 위 두 표현이 원형 궤적으로 환원됨을 보이고, 그 반지름과 중심을 구하라. 3. 초기 속력의 어떤 값 범위 (고속 대 저속) 에서 이 근사가 적절한가?	2 점
-----------	---	------------

이제 이 지식을 사용하여 퍼즐을 풀 것이다.

회전 속력을 모르는 회전 기준틀에서 영상 (길이 1 s , 프레임률 240 fps) 을 찍을 수 있다. 카메라는 기준틀과 함께 회전한다. 이 영상의 길이 척도 (length scale) 도 알려져 있지 않다: 프레임에서 거리를 임의의 길이 단위 (a.u.l.) 로만 측정할 수 있다. 이 두 미지수를 구하기 위해 다음 실험을 수행할 수 있다: 좌표계 원점에서 거리 $R = 1\text{ a.u.l.}$ 인 고정점에서, 구슬 (영상에서 파란색) 을 원점을 향하는 속력 v_0 로 발사한다. 원점은 영상에서 빨간 점으로 표시되며, 회전축은 이미지 평면에 수직으로 그 점을 지난다.

두 대포 (cannon) 중 하나로 구슬을 발사할 수 있다. 대포 1 은 $[5, 30]\text{ cm/s}$ 범위에서 0.1 cm/s 단위로 조절 가능한 초기 속력 (cm/s 단위) 을 가진다. 대포 2 는 무작위의 알려지지 않은 속력으로 구슬을 쏘지만, 이 속력들은 대포 1 이 낼 수 있는 것보다 높은 범위에 있다 (이 속력들의 크기 정도는 150 cm/s 이다).

이 영상들을 얻기 위해 RMPH22 앱을 사용한다. 앱을 사용하려면 비밀번호 **Coriolis** 를 입력하라. 자세한 내용은 첨부된 기술 안내 (technical guide) 를 참조하라. 그런 다음 사용할 대포를 선택할 수 있다. 대포 1 을 사용하면 발사 속력도 선택하게 된다. 소수점 구분 기호로 십표가 아닌 점을 사용하도록 하라. 마지막으로 출력 파일의 이름을 선택하게 된다. 파일 이름에 확장자를 붙일 필요는 없으며, 앱이 자동으로 올바른 확장자로 저장한다.

실제 실험실 조건을 반영하기 위해, 앱은 각 실행마다 완료에 몇 분이 걸린다는 점에 유의하라. 인내심을 가지고, 앱이 스스로 닫히기 전에 출력 파일을 열지 마라.

영상을 분석하기 위해 Tracker 소프트웨어를 사용한다. 사용법을 이해하려면 첨부된 기술 안내를 주의 깊게 읽어라. 사용할 주요 기능은 물체 추적 (object tracking) 이다: Tracker 는 구슬을 프레임 단위로 따라가며 시간의 함수로서 구슬 위치를 알려준다. 그러면 (t, x, y) 데이터 집합을 추출하여 원하는 방법으로 추가 분석할 수 있다.

거의 원에 가까운 궤적부터 분석을 시작한다.

A3	1. 거의 원형인 궤적을 얻으려면 어느 대포를 사용해야 하는가? 정당화하라. 2. 이 대포로 구슬을 발사함으로써, 회전 틀의 각진동수 ω 를 구할 수 있는 데이터를 어떻게 수집할 수 있는지 설명하라. 부록 1(Appendix 1) 이 유용할 수 있다.	1.5 점
-----------	---	--------------

A4	5 가지 서로 다른 발사 속력을 사용하여 회전 틀의 각진동수 ω 를 구하라. 데이터 집합에서 유효한 값들과 분석의 중요한 단계들을 제시하라. ω 의 평균값과 오차 막대를 제시하라.	2 점
-----------	--	------------

실험 결과로 점수를 받으려면, 분석에서 참조하는 전체 데이터 집합을 제출해야 한다. 분석이 그래프나 도표를 만들면, 모눈종이로 그리거나 컴퓨터로 그릴 수 있다. 후자의 경우, 번호가 매겨지고 적절한 캡션이 달린 그래프를 담은 추가.pdf 파일을 제출하라. 분석에서는 그래프를 그 번호로 참조하라.

이제 a.u.l. 과 SI 길이 단위 사이의 변환을 구할 수 있는 대포를 선택하라.

A5	어느 대포를 선택할 것인가? 선택을 정당화하라.	0.5 점
-----------	----------------------------	--------------

올바른 대포를 선택하면, 주어진 시간 구간 동안 구슬 속력이 상당히 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 초기 구슬 속력을 a.u.l./s 로 측정하려 하면 매우 잡음이 많고 오차가 생기기 쉬우므로 권하지 않는다. 완전한 점수를 위해서는 더 정교한 방법이 필요하다. 힌트: 식 (1) 의 해가 유용할 수 있다.

A6	a.u.l./cm 변환율을 구할 수 있는 방법을 기술하라.	1 점
A7	5 가지 서로 다른 발사 속력을 사용하여 a.u.l. 과 cm 사이의 변환율을 구하라. 데이터 집합에서 유효한 값들과 분석의 중요한 단계들을 제시하라. 해당되면 그래프를 보여라. 결과의 평균값과 오차 막대를 제시하라.	2 점

Part B

바람 (wind) 은 하층 대기에서 일어나는 모든 공기 이동 운동에 붙는 일반적인 이름이다. 그 거동은 유체 역학을 열역학 방정식 및 보존 법칙과 결합하여 모형화할 수 있다. 그러나 어떤 경우에는 고전역학을 사용하여 간단한 바람을 모형화할 수 있다. 우리 연구에서는 공기 덩어리 (air parcel) 의 크기가 무관함에 유의하라. 이는 힘 대신 가속도를 사용하는 것이 더 쉬움을 의미한다. 이 부분에서는 다음이 참이라고 가정한다:

- 공기 흐름은 정상상태 (stationary, 시간에 따른 변화 없음) 이고 평면적이다 (연직 운동은 고려하지 않음);
- 우리 연구에서 관련 있는 힘은 네 가지이다:
 - 압력 기울기 힘 (Pressure-gradient force): 다음 가속도를 준다. $\vec{a}_p = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P$. 여기서 $\text{grad } P$ 는 압력 기울기이며, 어떤 점에서 대기압이 가장 빠르게 증가하는 선을 통해 기하학적으로 나타낼 수 있다. 압력이 반경 방향으로만 변하면 $\text{grad } P = \frac{dP}{dr} \hat{e}_r$ 이며, 여기서 $\hat{e}_r$ 은 반경 방향의 단위벡터이다.
 - 지표면과의 마찰력 (Friction force): 가속도 $\vec{a}_f = -k\vec{v}$ 를 준다.
 - 수평 원심력 (Horizontal centrifugal force): 가속도 $\vec{a}_{cf} = \omega^2 \vec{r}$ 를 주며, 여기서 ω 는 어떤 주어진 점에 대한 공기 덩어리의 각속도이고 $\vec{r}$ 는 그 점에 대한 위치벡터이다.
 - 코리올리 힘 (Coriolis force): 가속도 $\vec{a}_c = 2\vec{\Omega} \times \vec{v}_r$ 를 주며, 여기서 $\vec{\Omega}$ 는 지구의 각속도이고 $\vec{v}_r$ 는 지구에 대한 바람의 상대속도이다. 다음 과제들 전반에서, 이 힘을 쉽게 계산하기 위해 현상의 위도 방향 확장은 무시한다.

처음 과제들에서는 수평면에서 공기 덩어리의 회전을 고려하지 않으므로 원심력을 무시한다.

B1	정상상태 조건을 표현하고, 세 가속도의 방향을 보이는 개략도를 그려라.	1 점
B2	속도의 방향과 압력 기울기 힘의 방향 사이의 각 α 로, 마찰력과 코리올리 힘 사이의 관계를 유도하라. 이 관계로부터 마찰 계수 k 를 구하라.	1 점

Maps1 폴더에서 이용 가능한 지도는 등압선 (isobar, 대기압이 같은 선) 과 바람 (흰 선) 을 지표면 위 고도 0 에서 나타낸다. 두 등압선 사이의 압력 차는 $\Delta P = 2 \text{ mBar}$ 이다. 각 파일의 이름은 표시된 점에 해당하는 위도이다.

B3	Maps1 에 제공된 지도를 사용하여 지표면에서의 각 α 를 측정하고, 각 지도에 대해 계수 k 를 계산하라.	2 점
-----------	--	------------

참고: 각 이미지를 앞 과제에서 사용한 Tracker 소프트웨어로 불러와서 각도기 (protractor) 로 각을 측정하는 것이 쉽다. 이 소프트웨어 사용과 관련한 사항은 기술 안내를 참조하라.

위 지도 중 일부는 육지 영역 (인간 정주지가 표시된 곳) 을 묘사하고, 나머지는 바다나 대양을 묘사한다.

B4	조사한 이미지들로부터 육지 위와 물 위의 계수 사이의 관계에 대한 결론을 내려라.	0.5 점
-----------	---	--------------

이제 이러한 관찰을 통해 기상학자들이 명명한 보이스 발롯 법칙 (Buys Ballot's law) 을 도입하자. 바람을 등지고 서 있다고 상상하라 (바람이 당신을 앞으로 밀어내는 경향이 있다).

B5	고기압 영역은 당신 몸에 대해 어디에 위치하겠는가?	0.5 점
-----------	------------------------------	--------------

더 높은 고도에서, 지표면이 더 이상 대기 동역학에서 역할을 하지 않는 곳에서는, 직선형 등압선에 대해 압력 기울기 힘이 코리올리 힘과 균형을 이루어 공기 덩어리가 등압선에 평행하게 움직인다. 여기서 우리는 등압선의 곡률 반지름이 무한하다고 근사하는데, 이는 실제로는 등압선 사이 거리보다 훨씬 큰 거리에 걸쳐 평행하다고 간주할 수 있는 선들을 의미한다. 이 근사 아래에서 원심력을 무시할 수 있었다. 이 상황을 **지균풍 (geostrophic wind)** 이라 하며, 대기 물리학에서 가장 중요한 근사 중 하나이다.

B6	이 부분에서 논의한 모든 측면을 고려하여, 기상학자들이 때때로 지표면 위 (약 600 m) 에서 취한 데이터를 사용하는 이유를 설명해 보라.	0.5 점
-----------	--	--------------

위 근사의 정확도는 로스비 수 (Rossby number) 라는 매개변수로 수치적으로 기술할 수 있다. 이 수가 작을수록 지균 근사의 타당성이 특징지어진다. 이 수를 계산하는 식은 $Ro = \frac{U}{fL}$ 이다. 여기서 U 는 계의 특성 속도 척도로 바람 속력으로 대체하고, L 은 계의 특성 길이 척도로 주어진 점에서 등압선의 대략적인 곡률 반지름으로 대체하며, $f = 2\Omega \sin \phi$ 이다. 주어진 점에서 곡률 반지름을 계산하려면, 그 근방을 원형으로 근사하고 부록 1 의 방법을 적용하라. 또 다른 방법은 곡선에 대한 접선들을 고려하고 그에 대응하는 법선들을 곡률 중심에서 교차시키는 것이다. 지도에 표시된 거리를 사용하여 Tracker 에서 자 (ruler) 를 보정하라.

B7	Maps2 폴더에 제공된 지도와 아래 표의 정보를 사용하여, 표시된 점 (빨간 점) 에서의 흐름에 대한 로스비 수의 크기 정도를 평가하라. 지균 근사의 설명에 근거하여, 이 로스비 수들에 대해 그것이 타당한지 아닌지 추론하고, 지균 근사를 사용할 수 있는 로스비 수에 대한 일반 조건을 유도하라.	2 점
-----------	---	------------

파일 이름	u (m/s)	ϕ (°)
1	6	13.12
2	7	22.53

우리가 사용하는 것과 같은 기압도 (baric map) 에서, 고기압 영역은 H 로 표시되고 고기압 (anticyclone) 이라 불리며, 저기압 영역은 L 로 표시되고 저기압 (cyclone) 이라 불린다. 이 영역들은 산과 골짜기에 비유할 수 있으므로, 등압선이 지형도의 등고선과 비슷하게 저기압과 고기압 근방에서 닫힌 선이라고 상상할 수 있다.

B8	남반구에서 저기압에 대한 이 운동의 방향 (시계방향 또는 반시계방향) 을 정하라. 답을 설명하라!	0.5 점
-----------	--	--------------

열대 저기압 (tropical cyclone) 은 특히 기후 변화의 관점에서 가장 우려되는 대기 현상 중 하나이다. 지역에 따라 허리케인, 태풍 등으로 더 잘 알려져 있다. Maps3 폴더에서 허리케인이 나타난 지도를 찾을 수 있다. 폭풍에서 회전 중심은 “눈 (eye)” 으로 알려져 있다. 이 과제의 목적은 열대 저기압을 연구하는 데 지균 근사의 적절성을 분석하고, 필요하다면 더 적합한 근사로 대체하는 것이다.



2005 년 8 월 28 일 카트리나 (Katrina) 허리케인 위성 영상 (출처: NASA).

허리케인의 위도는 $\phi \approx 33^\circ$ 이다. 허리케인의 반지름을 측정하기 위해 근사를 사용한다. 약 650 km 로 알려진 히스파니올라 섬 (Hispaniola Island, 도미니카 공화국과 포르토프랭스가 위치한 섬) 의 너비 (가장 왼쪽 점에서 가장 오른쪽 점까지의 거리) 로 Tracker 에서 자를 보정하라.

B9	허리케인의 로스비 수를 추정하라. 속도 척도로는 이미지에 묘사된 속도를, 거리 척도로는 표시된 점에서 허리케인의 눈까지의 거리를 사용하라.	1 점
B10	허리케인의 로스비 수를 B6 에서 얻은 수들과 비교하고 지균 근사의 타당성에 대해 논평하라. 필요하다면, 로스비 수의 정의와 힘의 균형을 사용하여, 지표면과의 마찰을 무시할 만큼 충분히 높은 고도에서의 흐름에 대한 더 나은 근사를 구하라.	1 점

Part B 에서 사용한 지도는 Windy.com 에서 얻은 것이다.

실험 과제 설계

Tudor-Gabriel MOCIOI, *Ecole Polytechnique, Paris*

Andrei MARIN, *University of Bucharest*

부록 1 (Appendix 1)

원 위에 놓인다고 가정되는 점들의 집합 (x_i, y_i) 가 주어졌을 때, 이 원의 반지름을 구하고자 한다. 두 가지 가능한 방법을 제안한다.

방법 1 – 기하학적 접근

평면에서 세 점이 주어지면, 다음과 같이 세 점을 모두 포함하는 원을 작도할 수 있다:

1. 세 점 중 한 쌍을 고른다. 두 점으로 결정되는 선분의 수직 이등분선을 작도한다.
2. 세 점 중 다른 한 쌍을 고른다. 그 수직 이등분선을 작도한다.
3. 이 수직 이등분선들의 교점을 찾는다. 이 점이 바로 원의 중심이 된다.
4. 마지막으로, 찾은 중심으로 세 점 중 아무 점이나 지나는 원을 작도한다.

분명히, 이 원의 반지름은 중심과 원 위 한 점 사이의 거리로 주어진다.

이 방법을 사용할 때 다음 명제가 유용할 수 있다: 서로 수직인 두 직선의 기울기의 곱은 -1 이다.

방법 2 – 미적분 기반

평면에서 곡선 $y(x)$ 가 주어졌을 때, 특정 점 x_0 에서의 곡률 반지름은 다음으로 주어진다:

$$R = \left| \frac{(1 + y'^2(x_0))^{3/2}}{y''(x_0)} \right|$$

이산적인 점 집합 (x_i, y_i) 로 기술되는 곡선에 대해서는, 1 계 및 2 계 도함수를 수치적으로 근사할 수 있다.

$$y'(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}$$

$$y''(x_i) \approx \frac{y'(x_{i+1}) - y'(x_{i-1}))}{x_{i+1} - x_{i-1}}$$

기술 안내 (Technical guidelines)

사전 요구사항: Windows 10, 64 비트, 8 GB RAM.

실험 과제를 성공적으로 수행하려면 세 가지 소프트웨어가 필요하다:

1. Tracker
2. ffmpeg
3. RMPH22

완전히 필수는 아니지만 매우 유용할 수 있는 또 다른 도구는 Microsoft Office 또는 Libre Office 이다. 추가로, 자신의 컴퓨터에 이미 설치되어 있고 익숙한 임의의 대체 그래프 작성/데이터 분석 도구 (Python, Jupyter, Matlab, Origin 등) 와 관련 문서를 사용할 수 있다.

받은 압축 파일에는 Tracker 설치 프로그램과, ffmpeg 및 RMPH22 의 바로 실행 가능한 실행 파일이 들어 있다. Tracker 와 RMPH22 는 직접 사용한다. ffmpeg 는 RMPH22 를 위한 사전 요구사항일 뿐이다.

시험 당일 지연을 피하기 위해 대회 전에 미리 설치 절차를 수행할 것을 권장한다.

알려진 위치에 압축 파일을 풀면서 시작하라.

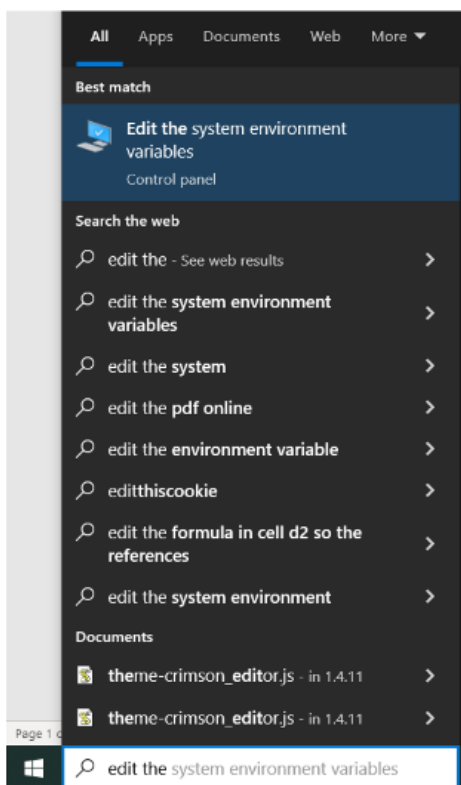
Tracker 설치

설치 프로그램을 실행하고 화면의 지시를 따른다. 문제 해결 (troubleshooting) 도 온라인에서 이용할 수 있다.

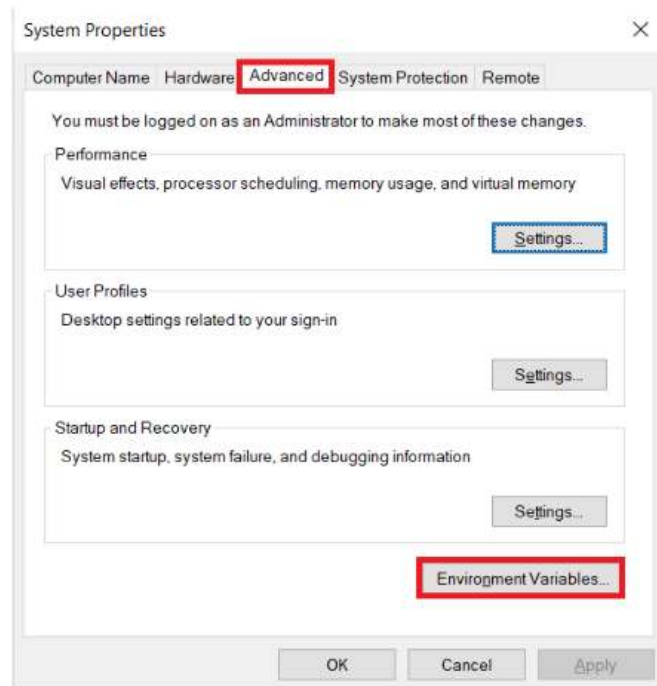
ffmpeg 설정

ffmpeg 는 설치가 필요 없지만, 환경 변수 path 에 추가해야 한다.

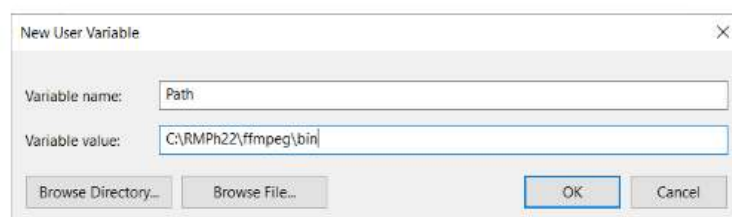
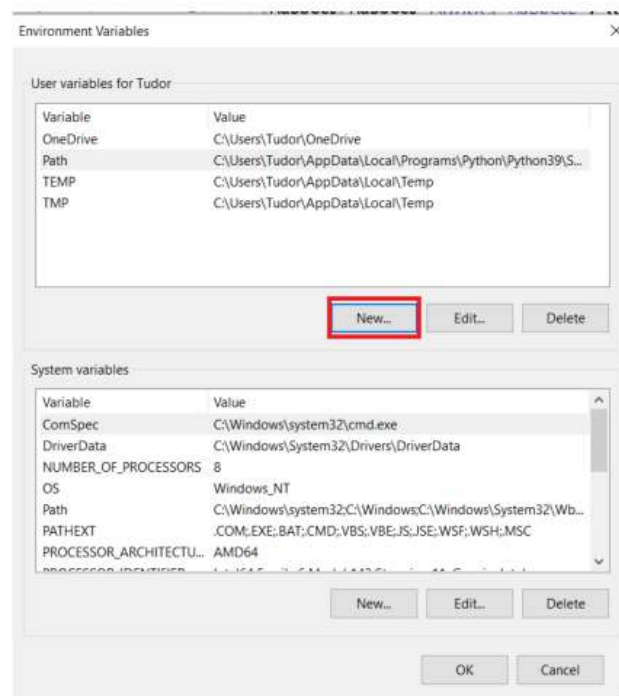
- 시작 메뉴 검색창에서 *Edit the system environment variables* 를 찾는다.



- 그것을 열고 *Advanced* 탭으로 가서 *Environment variables* 를 클릭한다.



- 열린 창에서 위쪽 절반의 *New* 를 클릭한다. 그런 다음 *Variable name* 항목에 *Path* 를 입력하고, *Variable value* 항목에 *ffmpeg* 바이너리 경로를 입력한다. 보통 이 경로는 파일을 쉰 경로에 *\ffmpeg\bin* 을 추가하여 얻는다. 예를 들어 파일을 폴더 *C:\RMPH22* 에 풀었다면, *Variable value* 는 *C:\RMPH22\ffmpeg\bin* 이 된다.



- 변경 사항을 저장하려면 모든 창에서 *OK* 를 클릭한다.

Tracker 사용법

Tracker의 전체 문서에 접근할 수 있다. 여기서는 시험 중 유용할 수 있는 주요 기능을 간략히 소개한다. 먼저, 추적하려는 영상 파일을 Tracker로 열어야 한다.



- 빨간 사각형으로 강조된 버튼을 클릭하면 보정 막대 (calibration stick)를 설정할 수 있다. 이 보정 막대는 길이 측정의 기준으로 사용된다. 보정 막대의 양 끝을 수동으로 설정하고 그 길이의 수치값을 줄 수 있다.
- 파란 사각형으로 강조된 버튼을 클릭하면 사용할 좌표계의 원점과 좌표축을 옮길 수 있다.
- 초록 사각형은 추적 인터페이스를 여는 버튼을 나타낸다. 열린 팝업 창에서 *New*를 클릭한 다음 *Point mass*를 선택한다. Ctrl+Shift를 누른 채로, 운동을 추적하려는 물체를 클릭한다. 새로 열린 팝업 창에서 *Search*를 클릭한다.
- 데이터 표가 나타난다. 데이터 표를 내보내려면 File→Export→Data를 클릭한다. 데이터 구분 기호로 쉼표 (comma)를 선택할 것을 권장한다. 그런 다음 출력 파일의 확장자를.csv로 바꾸고 Excel/Libre Office로 열어 분석을 계속할 수 있다.

몇몇 이미지를 열어 그 위에서 측정도 해야 한다.

- 보라색으로 강조된 버튼을 클릭하면 측정 도구를 사용할 수 있다. 여기서 자 (ruler)나 각도기 (protractor)를 삽입하도록 선택할 수 있다. 실용적인 조언으로, 화면에서 잘 보이지 않으면 삽입한 도구를 오른쪽 클릭하여 색을 바꾸거나 굵게 하기를 권한다. 예를 들어 어떤 색조의 초록색은 매우 잘 구별된다. 필요한 만큼 도구를 확대할 수도 있다.

RMPH22 사용법

- 프로그램을 실행한다. 검은 터미널 창이 열린다. 한 개의 창이 더 열릴 때까지 몇 초 기다린다.
- 창이 비밀번호를 묻는다. 시험 문제에 언급된 비밀번호를 입력하고 *OK*를 클릭한다.
- 원하는 실험 매개변수를 입력하고 계속한다.
- 터미널 창이 닫힐 때까지 기다린다 (몇 분이 걸릴 수 있다!). 그런 다음 영상을 Tracker로 열어 분석한다.

지도 자료 (Maps)

Maps1 (B3 — 지표면 바람과 등압선)



Maps2 (B7 — 로스비 수 평가)



Maps3 (B9 — 허리케인)

