

물리적 관점에서 정의한 색과 색 연산법에 관한 문제

KAIST 물리학과 학사과정 18학번 황승민
2019년 7월 6일

구성 순서

- Introduction
- Problem 1. 빛의 물리적 속성을 이용한 색 표현
- Problem 2. 보색이란? 보색법의 타당성 파악
- Problem 3. 빛의 혼합 연산
- Problem 4. 복잡한 파장 조성을 가진 빛과 동일(혹은 유사)한 신경 세포 신호를 만드는 간단한 파장 조합의 색 재구성 가능성 탐색
- Conclusion

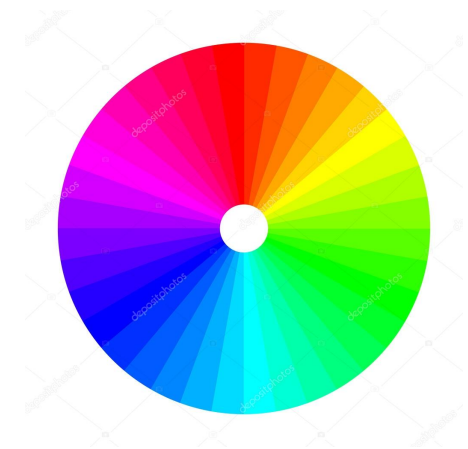
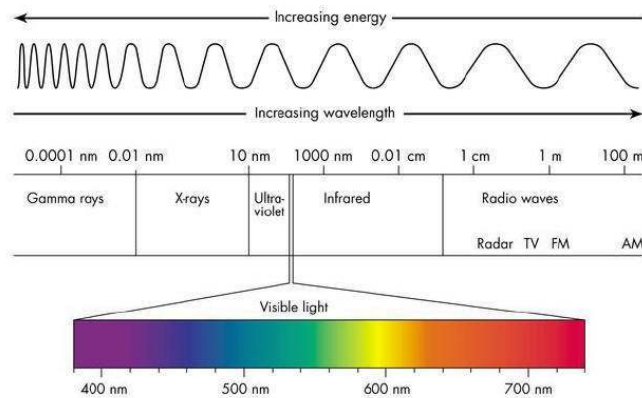
Introduction

색 현상이란 무엇인가?

- 지금까지 배운 내용 중 색에 대한 일관된 설명은 없었음
- 미술시간에 배운 색
 - 색상, 명도, 채도 : 정말로 빛의 물리적 속성과 깊은 연관이 있는지?
- 그냥 예술을 위한 추상적인 개념인가? 실재와 연결 시키려면 어떤 시도?

색상, 명도, 채도

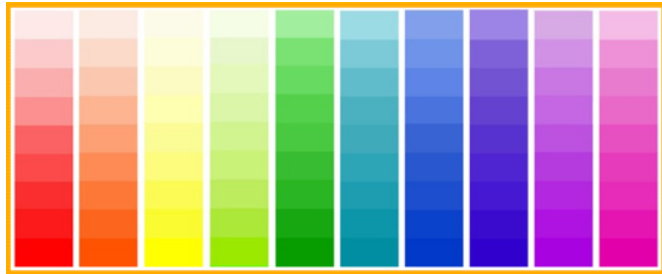
- 색상



가설 : 색상은 빛의 파장과 연관시켜 설명할 수 있는 개념일 것이다.

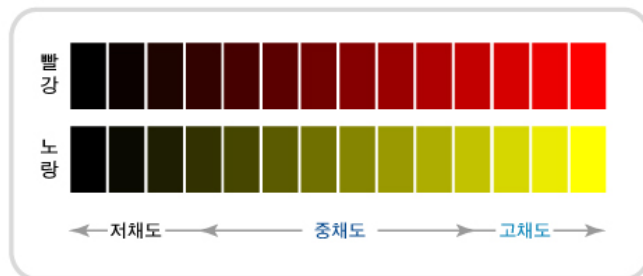
색상, 명도, 채도

<명도>



색의 밝은 정도
흰 색과 특정 색상을 내분해 명도 단계 설정?

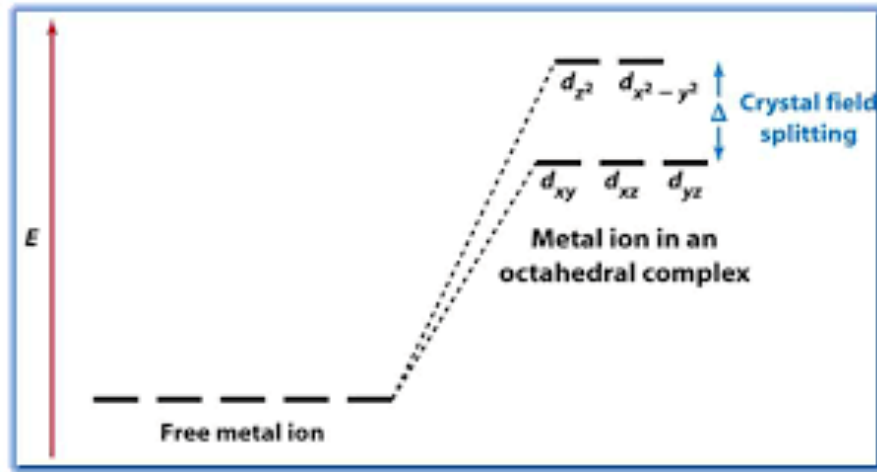
<채도>



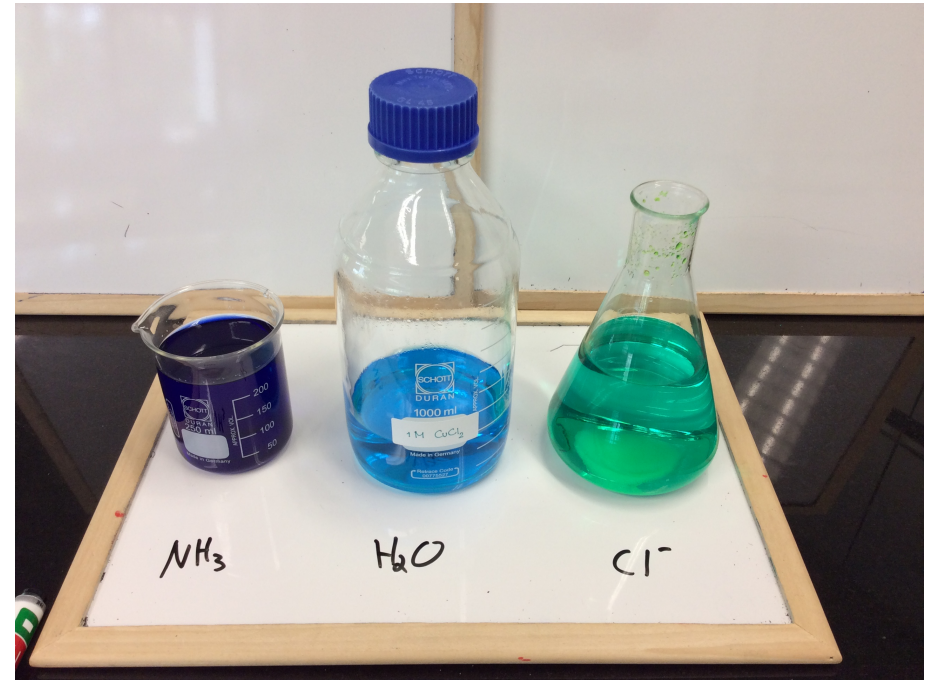
색의 탁한 정도(무채색과 가까운 정도)
무채색과 특정 색상을 내분해 명도 단계 설정?
무채색? 흰색과 검은색을 내분한 색 단계?
색상이 없는 색?

색은 흡수색의 보색?

착이온(Complex Ion)의 색상과 보색



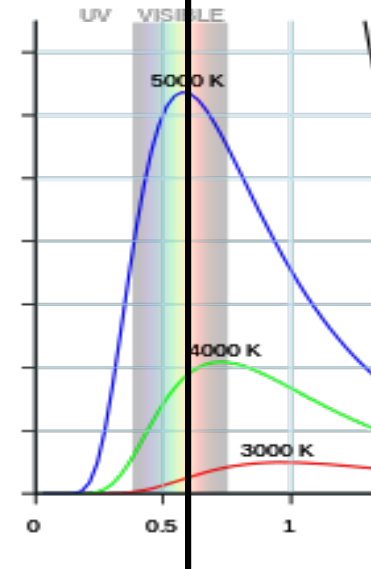
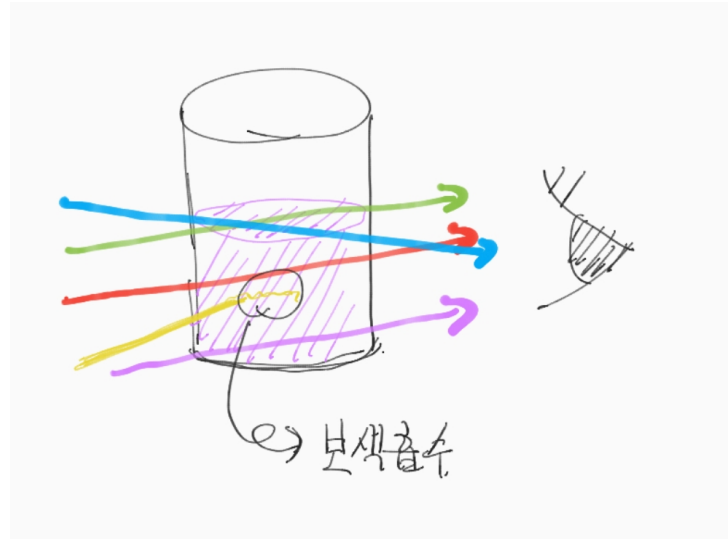
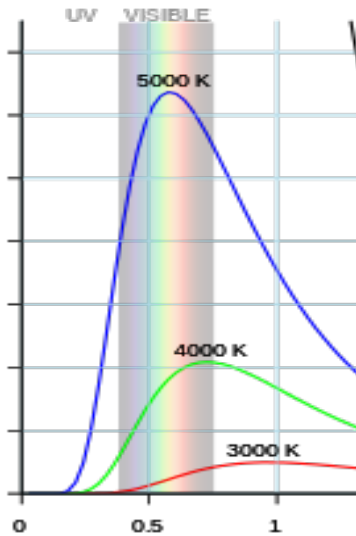
분리된 d-orbital 간의 에너지 틈이 가시광선과 비슷



흡수된 색의 “**보색**”에 해당하는 색을 인지하게 됨

색은 흡수색의 보색?

착이온(Complex Ion)의 색상과 보색

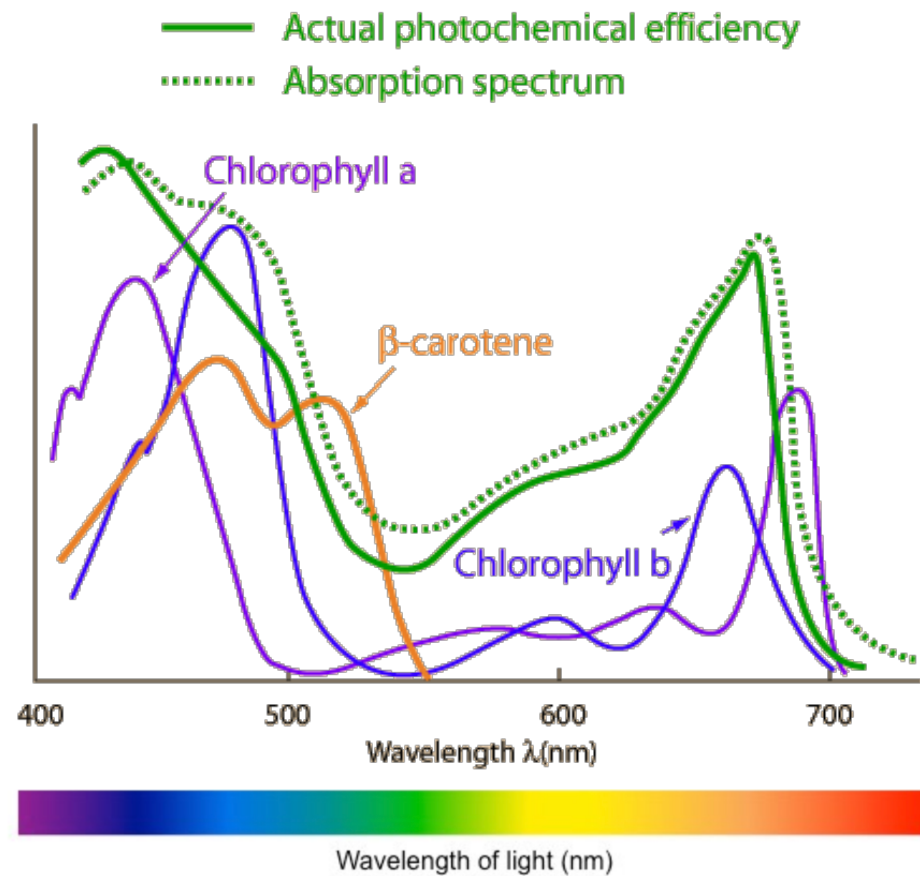


흡수선

그런데 과연 이것이 만들어내는 차이가 얼마나 클까??

색은 흡수 안 된 나머지 색?

나뭇잎의 광합성 및 보조색소 흡수 스펙트럼



쏟아져 나오는 의문점들

- Violet과 Red의 파장(혹은 진동수)은 물리적 속성이 매우 다른 빛 일수도 있는데, 잘 어울리면서 이어지는 느낌이 드는 것은?
- 흰 색의 정의? 백색광이란 무엇인가?
- 색과 보색 사이의 물리적 관계식은? 또, 그 이상의 특성은?
- 색에 있어서 내분 연산?은 어떤 물리적 현상을 말하는 것인가?
- 등 등...

논리전개

색을 결정하는 세 가지 요소(광원, 물체, 눈)

- 광원 : 빛의 종류에 따라 보이는 색은 다릅니다.



- 물체 : 색이 물체가 지닌 하나의 특성이라면 당연히 고려해야합니다.
- 눈 : 시각 현상을 만들어내는 첫 번째 감각기관입니다.

그래서...

다음 문제를 해결하려 합니다!

- Problem 1. 빛의 물리적 속성을 이용한 색 표현
- Problem 2. 보색이란? 보색법의 타당성 파악
- Problem 3. 빛의 혼합 연산
- Problem 4. 복잡한 파장 구성을 가진 빛과 동일(혹은 유사)한 신경 세포 신호를 만드는 간단한 파장 조합의 색 재구성 가능성 탐색

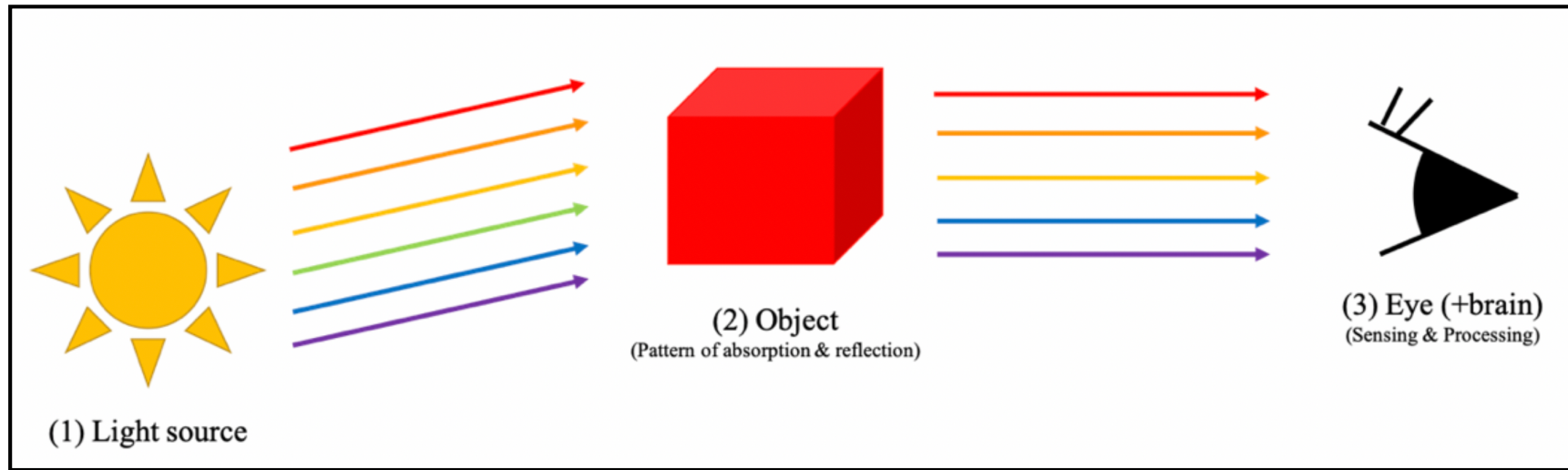
Problem 1

빛의 물리적 속성을 이용한 색 표현

- (1) 광원 모델링
- (2) 물체 모델링
- (3) 인간의 빛 신호 수용
- (4) 색 거리

Overview

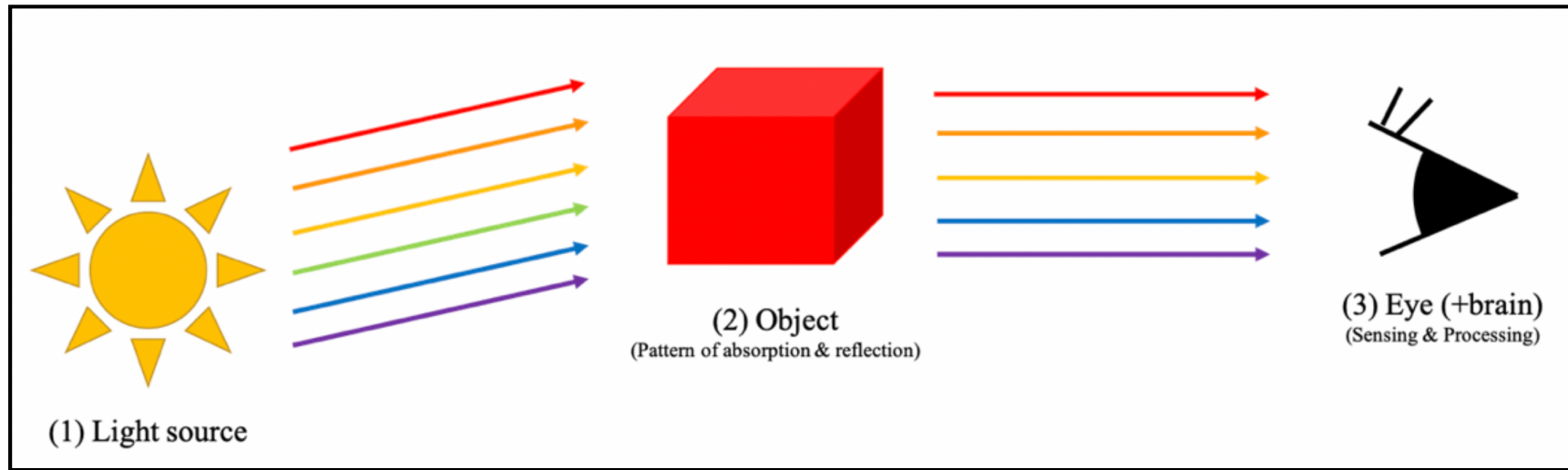
색을 물리적으로 나타내기



- 서로 다른 광원 아래서 물체의 색을 다르다고 인지.(백열등, 형광등)
- 물체는 특정 종류의 빛을 흡수, 그 외의 빛은 반사
 - + 비 가시광선은 시각 현상에 영향을 주지 않는다고 가정합시다
- 안구를 통해 들어온 빛이 신경세포 자극, 신호 발생 및 가공

Overview

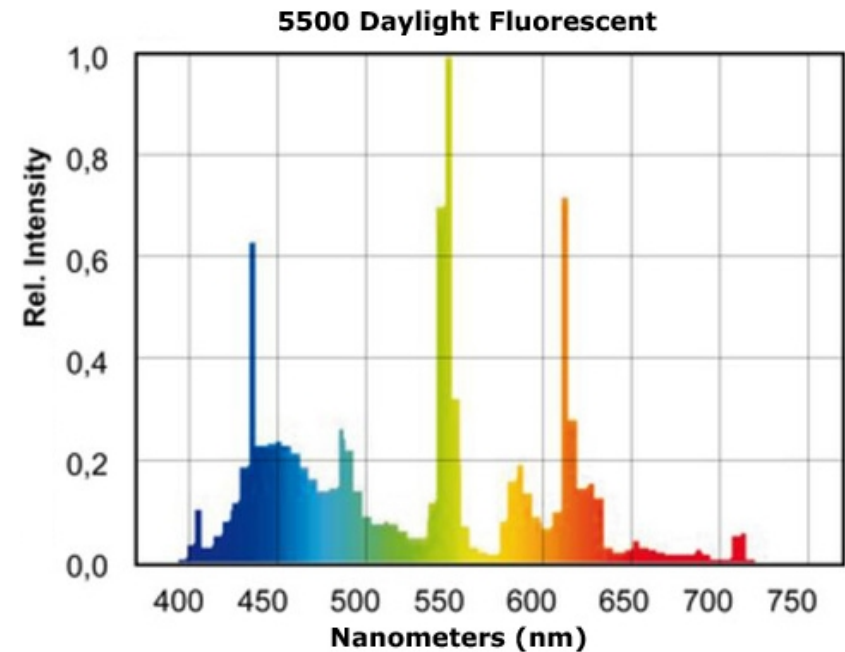
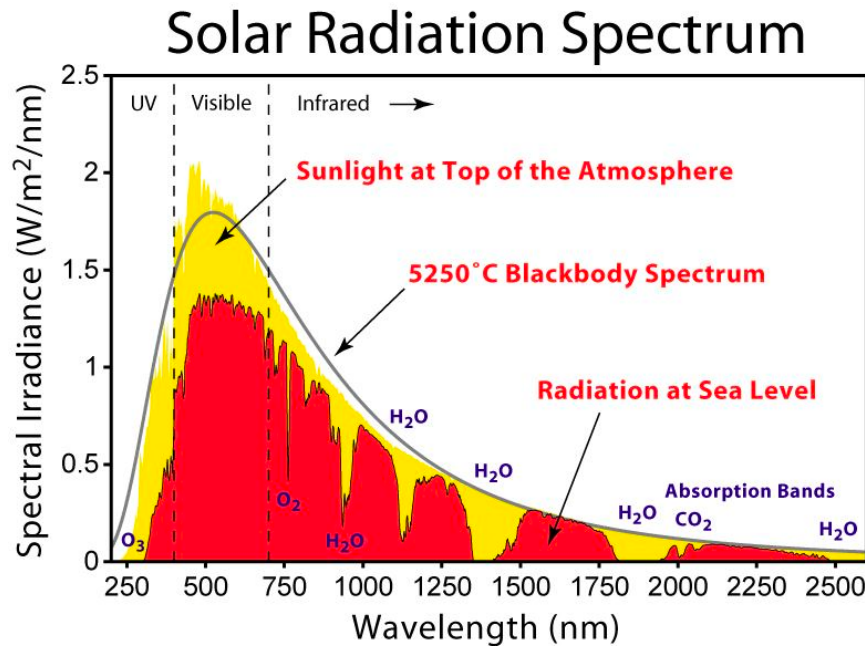
색을 물리적으로 나타내기



- 광원 모델링 : 이산적인 광자 다발로 이루어진 빛
- 물체 모델링 : 물체의 가시광선 흡수 패턴 작성
- 망막 모델링 : 인간의 빛 수용, 발생하는 신호 획득

(1) 광원 모델링

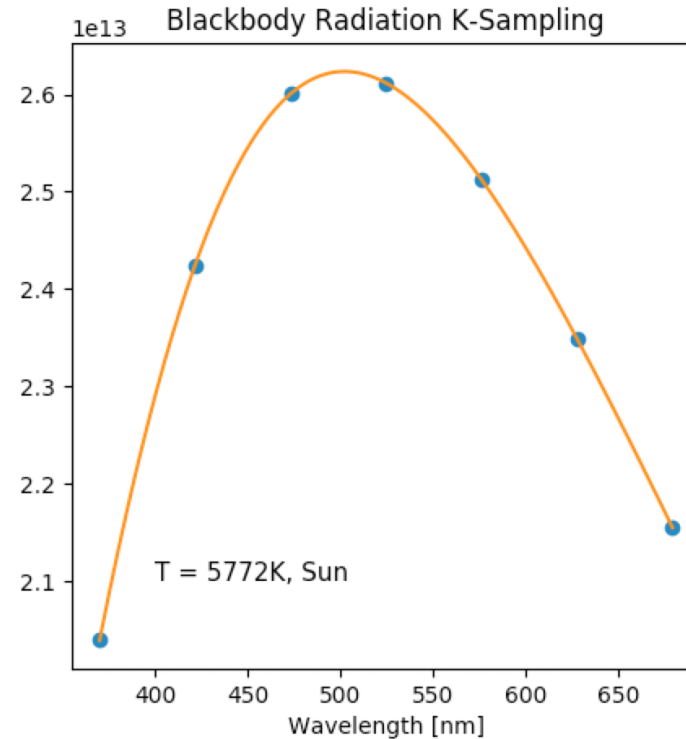
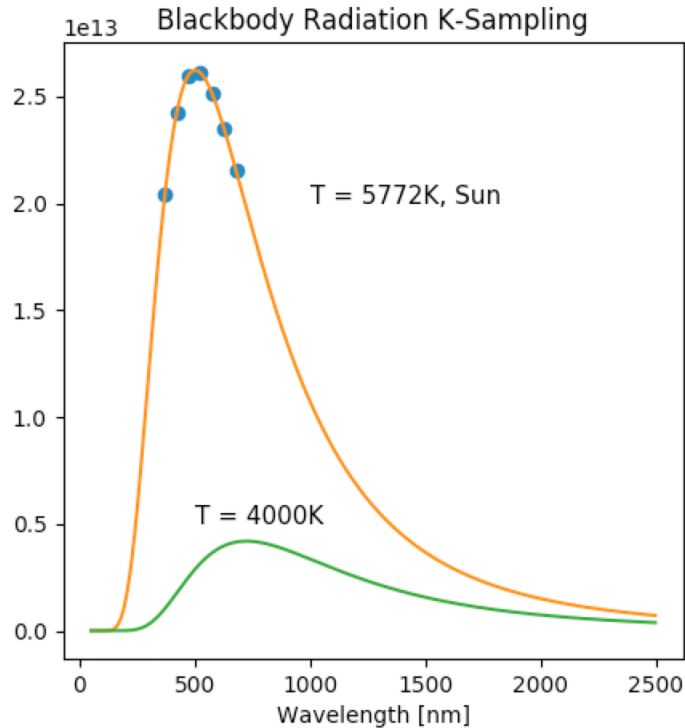
다양한 광원의 스펙트럼



다양한 스펙트럼 패턴을 가진 광원들을
가시광선 영역 내에서 K개의 샘플을 취하고,
각 샘플의 Intensity 합이 1이 되도록 normalize 해 광원 정보를 표현?

(1) 광원 모델링

K-Sampling

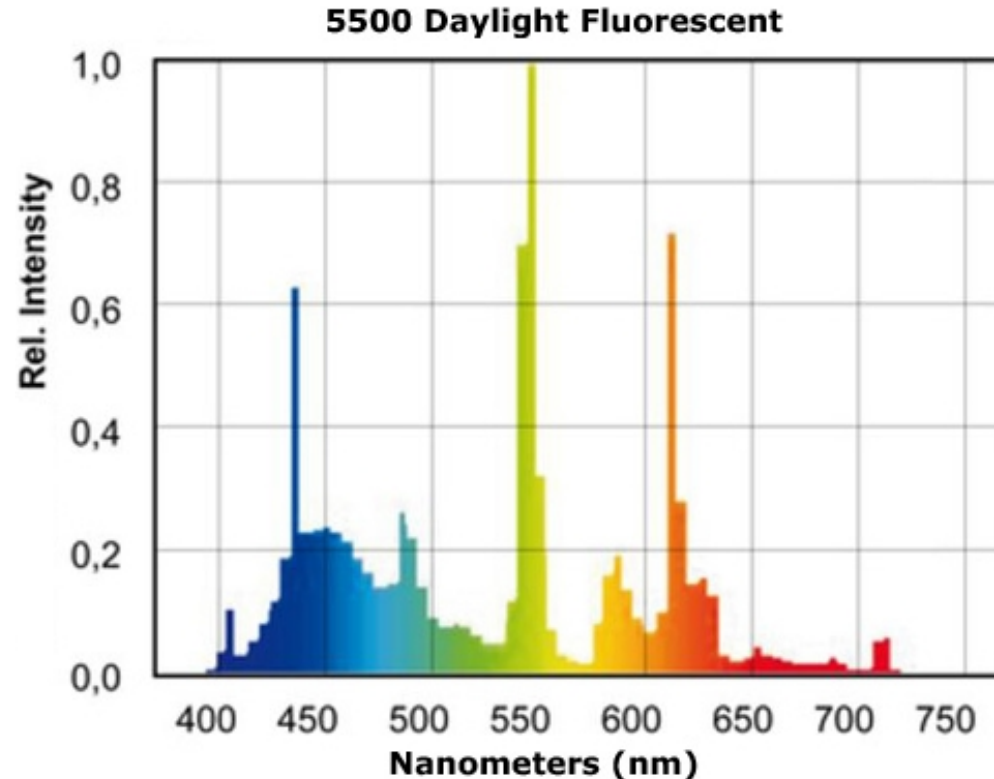


Sampling Result of $K = 7$

w.l.[nm]	370	421.5	473	524.5	576	627.5	679	sum(P)
P (w.l.)	0.12215	0.14525	0.15579	0.15645	0.15051	0.14072	0.12909	1

(1) 광원 모델링

K-Sampling



해석적인 식을 찾기 어려운 경우

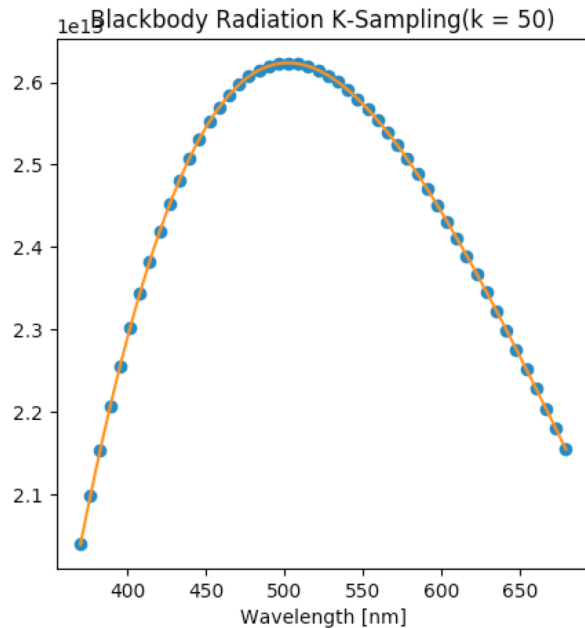
특정 파장의 Intensity가 두드러지게 강한 경우

빛의 속성을 측정해서 가장 먼저 얻는 값이 파장인 경우

K-Sampling은 좋은 자료 형태일 수 있음!

(1) 광원 모델링

Validity Test



$$P_{real}(\lambda) = \frac{\text{Intensity}(\lambda)}{\text{Area}}$$

$$\text{Area} = \int_{370nm}^{680nm} \text{Intensity}(\lambda) d\lambda = 7.568 \times 10^{15}$$

$$\text{error}(\lambda) = P_{real}(\lambda) - P_{sampling}(\lambda)$$

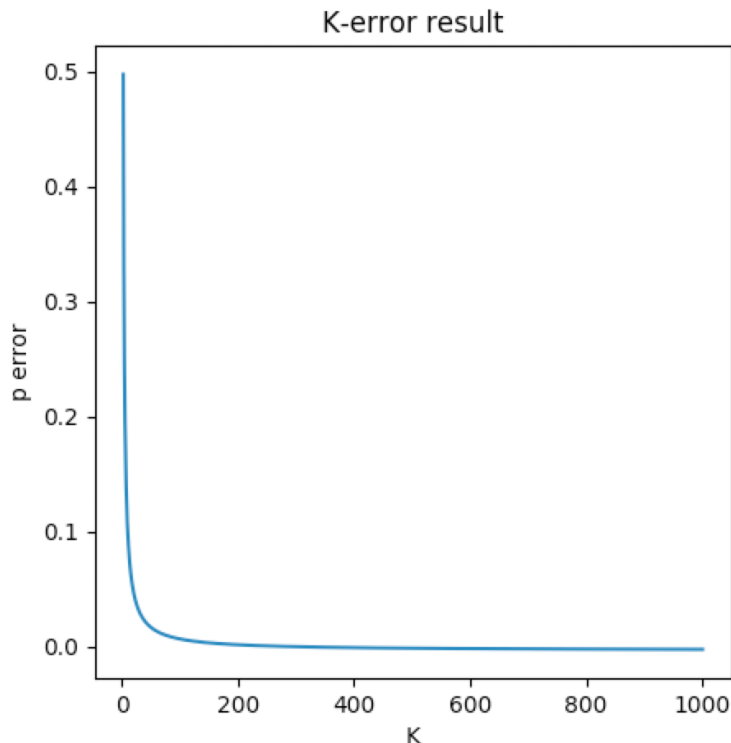
- 실제로, 해당 파장의 분율이 어떻게 나타나는지 P_{real} 을 통해 확인
- 총 K개의 $\text{error}(\lambda)$ 의 평균값을 통해 판단
- Error 가 충분히 작도록 K 값을 정해야 할 것!

(1) 광원 모델링

Validity Test

- [결과]

- $K = 2$ 일 때 0.497 의 값으로 최대,
- $K = 50$ 일 때 0.0167로 급격히 감소
- $K = 310$ 일 때 절대값 최소 (2.43×10^{-7})
- 이후로는 음의 편차 발생 (꾸준히 감소)
컴퓨터의 계산 정확도 문제로 추정
- 이후에서는 $K = 300$ 을 채택해 문제 해결



(1) 광원 모델링

빛 튜플과 빛 집합

- 빛 튜플
 - 광자 다발에서 어떤 파장 λ 를 가진 광자의 분율을 p 라고 할 때

$$\textit{Light tuple} := (p, \lambda)$$

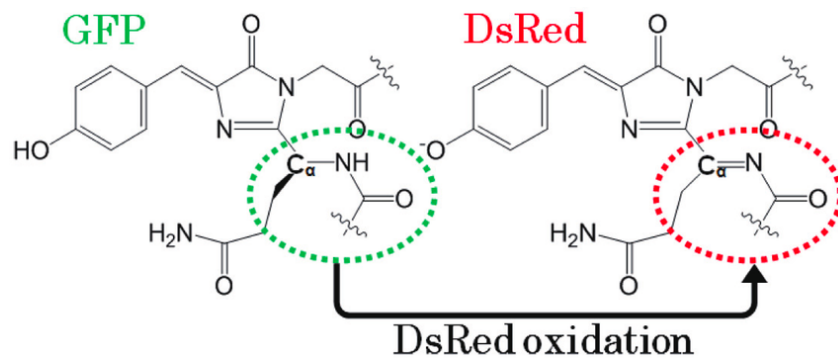
- 색 빛 집합(Color light Set)
 - 광자 다발 속에서 색에 영향을 주는 모든 빛 튜플과 Intensity 포함

$$\textit{Source light} = \{(\lambda_i, p_{\lambda_i}) \mid 1 \leq i \leq k, 370\text{nm} \leq \lambda_i \leq 680\text{nm}, 0 \leq p_{\lambda_i} \leq 1\} \cup \{\text{Intensity}(\text{relative})\}$$

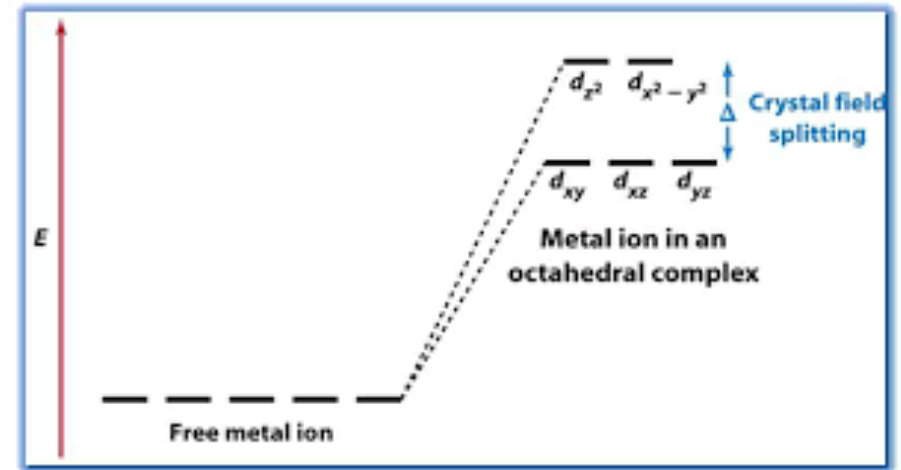
이제 색 현상에 기여하는 빛을
빛 집합을 이용해 나타낼 수 있습니다!

(2) 물체 모델링

물질이 가시광선을 흡수하는 법



탄소 이중-단일 결합 컨쥬게이션 계에 의한
가시광선 흡수



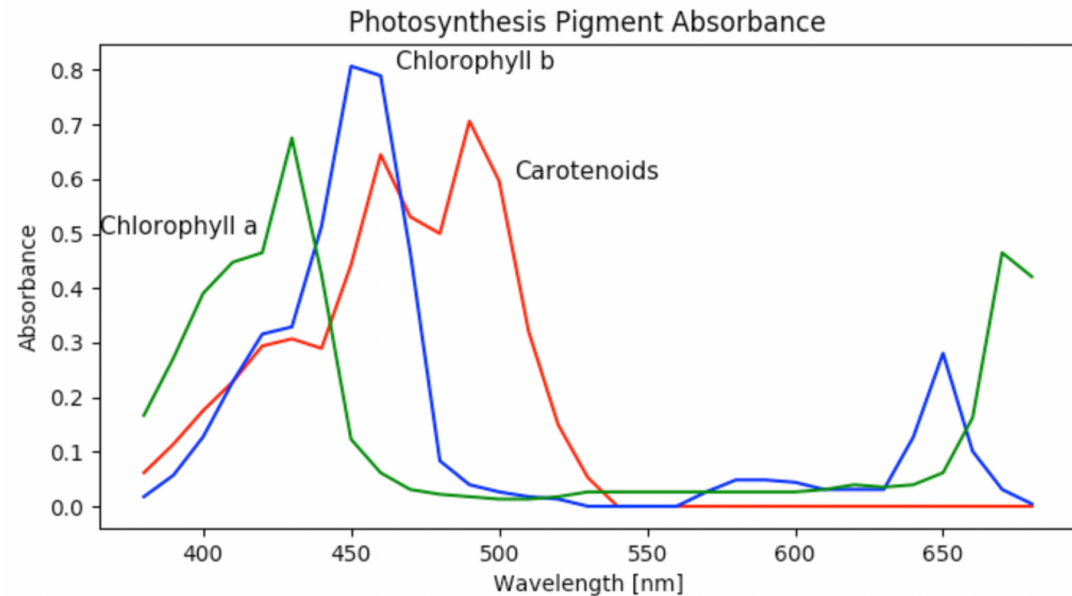
Complex ion의 d-orbital splitting에 의한
전자 전이와 가시광선 흡수, 방출

흡수하는 방식은 논외로 하자!

어떤 원인에 의해서 흡수된다고 하고,
흡수된 빛을 제외한 빛의 성분을 다시 반사한다고 가정!

(2) 물체 모델링

잎 색에 영향을 주는 색소?



“파장에 따른 빛의 흡수율”

이런 형태의 자료를 얻는다면 물체의 흡수 패턴을 알 수 있을 것입니다

(2) 물체 모델링

물체가 발생시키는 반사광의 계산

$$\text{Source light} = \{(\lambda_i, p_{\lambda_i}) \mid 1 \leq i \leq k, 370\text{nm} \leq \lambda_i \leq 680\text{nm}, 0 \leq p_{\lambda_i} \leq 1\}$$

(상대적 intensity만을 고려)

$\text{absorb}(\lambda) :=$ 물체의 파장 λ 빛을 흡수하는 정도, 완전흡수 : 1, 완전반사 0

$$\text{reflect}(\lambda) := 1 - \text{absorb}(\lambda)$$

Source light 내의 모든 light tuple 에 대해 다음 식을 적용

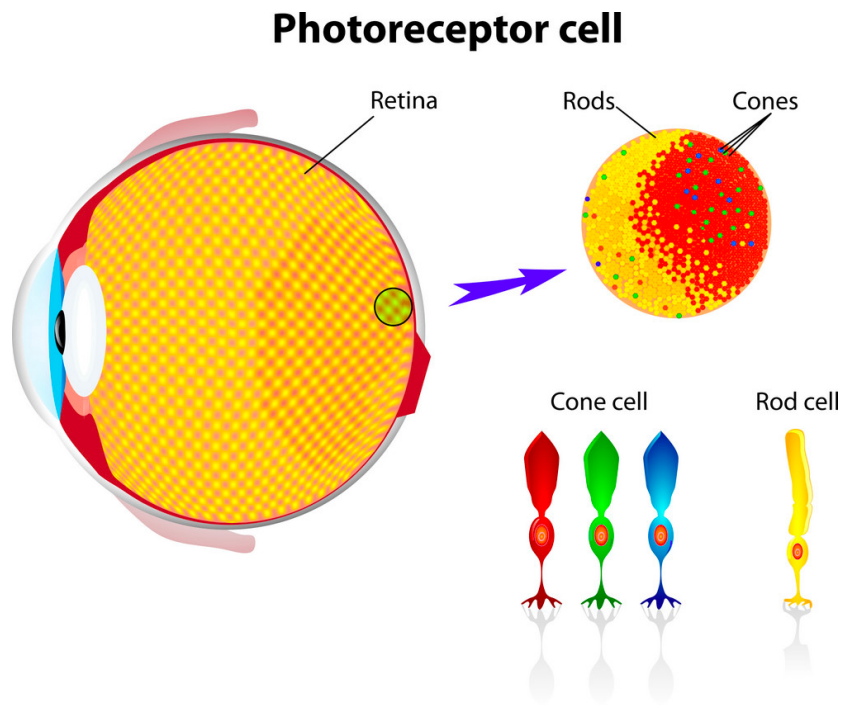
$$(\lambda'_i, p'_{\lambda'_i}) := (\lambda_i, p_{\lambda_i} \times \text{reflect}(\lambda_i))$$

(반사광의 light tuple)

$$\text{Color light} = \{(\lambda'_i, p'_{\lambda'_i})\}$$

(3) 인간의 빛 신호 수용

망막의 시신경세포



인간 망막(Retina)의 시신경 세포

Cone cell

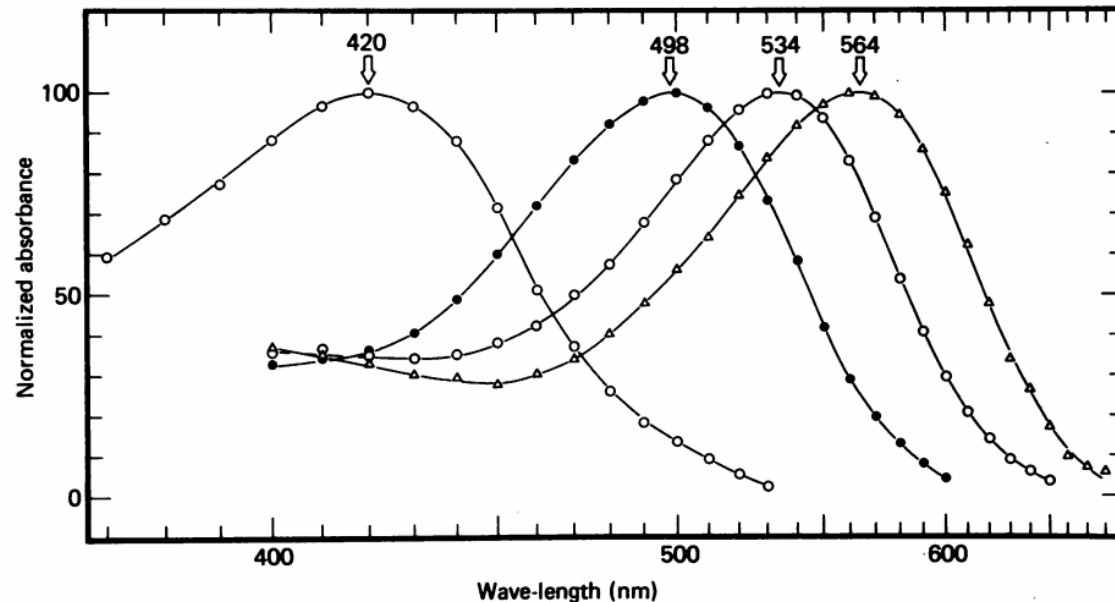
R, G, B cone cell, 색감지에 기여

Rod cell

주로 빛의 세기 감지에 기여

(3) 인간의 빛 신호 수용

망막 신경세포 자극 신호 모델링



- 파장에 따라 다른 세 종류의 Cone Cell 반응도 (Rod Cell 무시)
- 각 Cone Cell이 반응하는 정도를 $0 < r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda) < 1$ 로 표현
- 데이터가 없는 부분은 내분점을 구하는 방식으로 반응도 반환

(3) 인간의 빛 신호 수용

망막 신경세포 자극 신호 모델링

$$Color\ light = \{(\lambda_i, p_{\lambda_i}) \mid 1 \leq i \leq k, 370nm \leq \lambda_i \leq 680nm, 0 \leq p_{\lambda_i} \leq 1\}$$

$r(\lambda) :=$ Red Cone cell의 파장 λ 빛에 반응하는 정도, 최대반응 : 1, 최소(무)반응 0

$g(\lambda) :=$ Green Cone cell의 파장 λ 빛에 반응하는 정도, 최대반응 : 1, 최소(무)반응 0

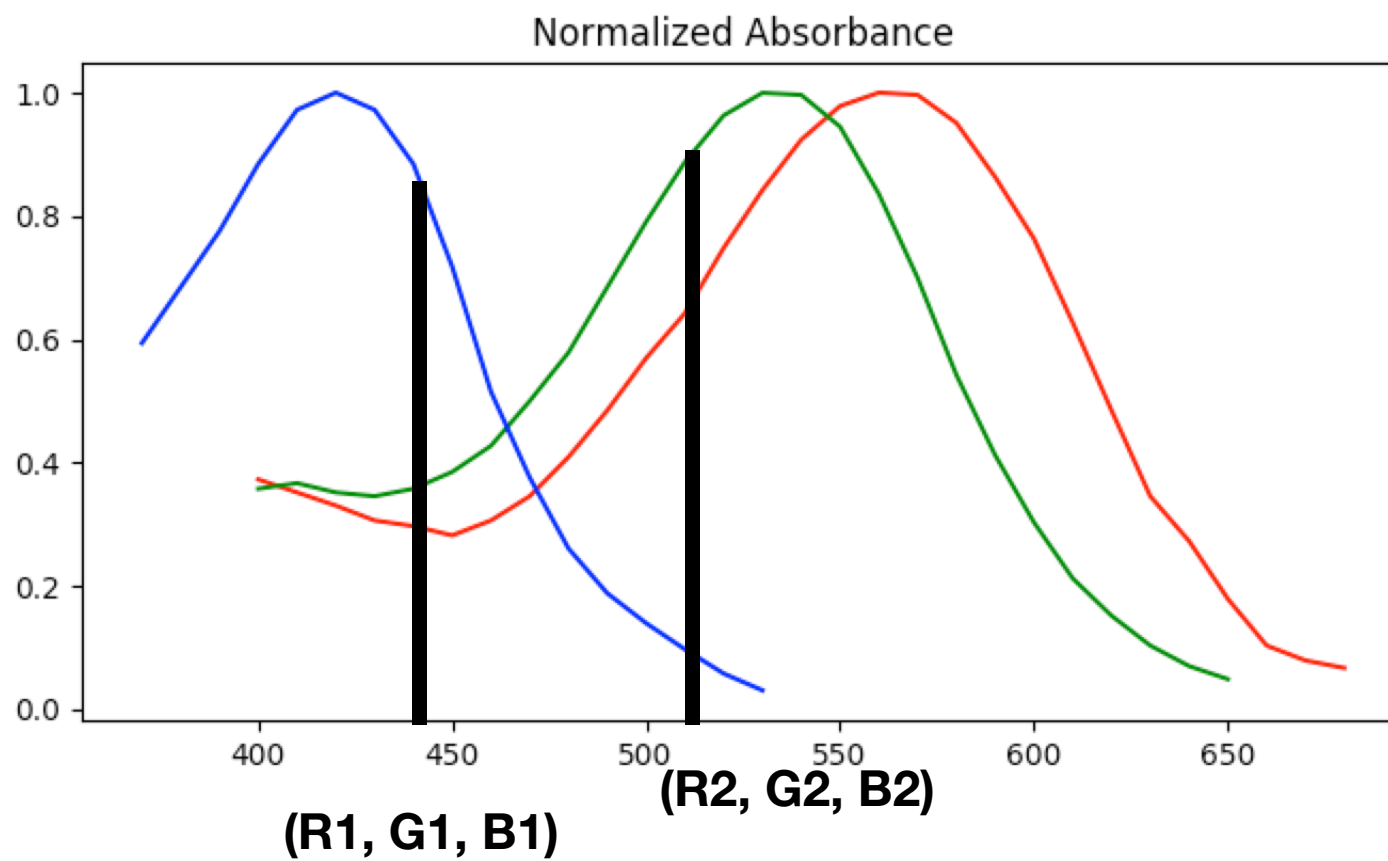
$b(\lambda) :=$ Blue Cone cell의 파장 λ 빛에 반응하는 정도, 최대반응 : 1, 최소(무)반응 0

Color light 내의 모든 light tuple 에 대해 다음 식을 적용

$$R := r(\lambda_i) \times p_{\lambda_i} \quad B := b(\lambda_i) \times p_{\lambda_i} \quad G := g(\lambda_i) \times p_{\lambda_i}$$

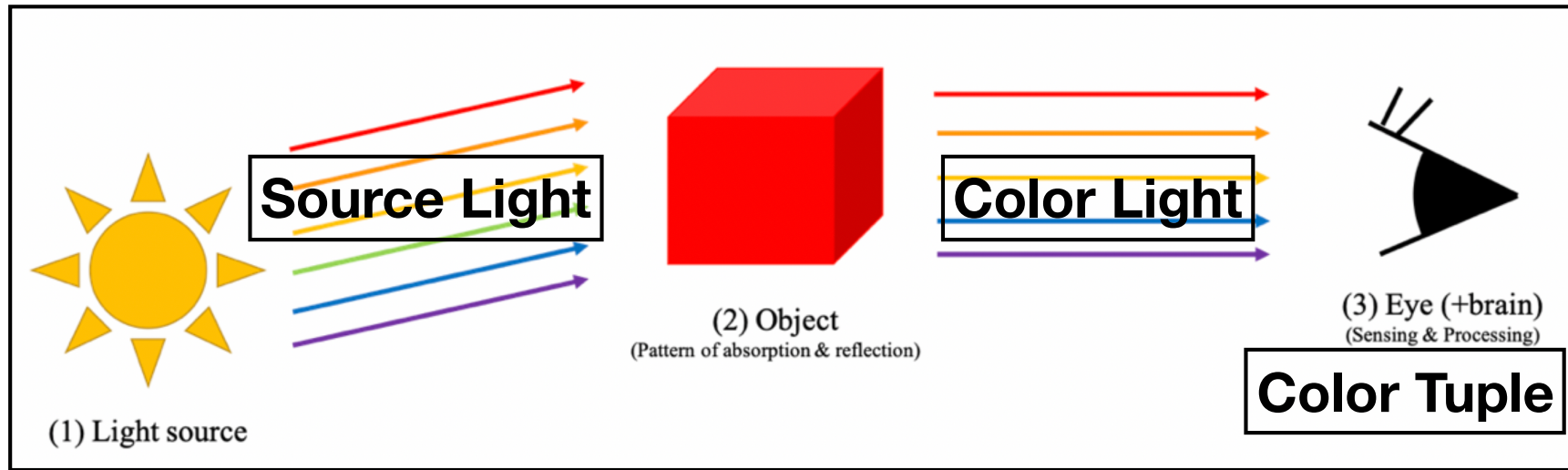
$$color\ tuple = (R, G, B)$$

Color tuple을 주어진 환경에서의 물체 색이라고 정의합니다



중간 정리

색을 물리적으로 나타내기



- 광원에서 빛 발생(Source Light)
- 물체는 흡수 필터를 거친 빛을 다시 반사(Color Light)
- 망막이 반사광에 반응해 발생한 R, G, B 신호가 곧 색이 된다.

(4) 색 거리

- 색에 대응되는 값으로 color tuple 이라는 개념을 도입했다.
- Color1 : (R1, G1, B1), Color2 : (R2, G2, B2) 라 할 때

$$0 < \text{color distance} = \sqrt{(R1 - R2)^2 + (G1 - G2)^2 + (B1 - B2)^2} < \sqrt{3}$$

- 이것으로 색의 멀고 가까운 정도를 상대적으로 비교할 수 있습니다.

Problem 1 Summary

- 색을 결정하는 3요소를 “광원”, “물체”, “눈” 으로 결정
- 광원 모델링 : K개의 Sample을 취해 p.m.f 작성. **빛 집합** 개념 도입
- 물체 모델링 : 파장에 따른 가시광선 흡수율 자료(필터의 개념)
- 망막 모델링 : 발생 신호를 이용한 색에 대응되는 색 튜플(R, G, B)
- 색거리 : RMSE

Problem 2

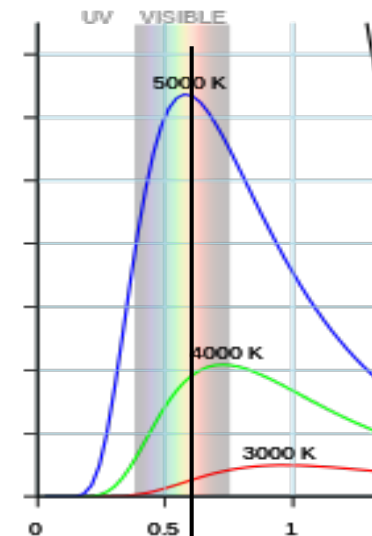
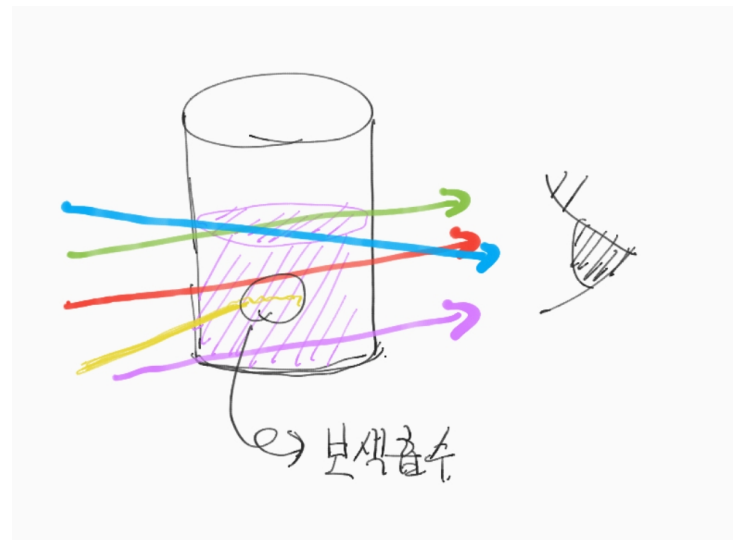
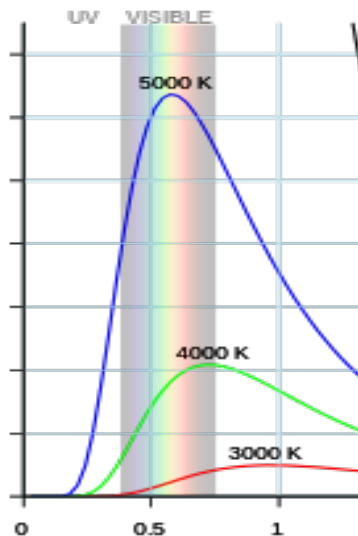
보색이란? 보색법의 타당성 파악

- (1) 보색 쌍인지 판단하는 방법들
- (2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색
- (3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

Overview

보색이란 뭡까요?

- 보색 (Complement)
- 어떤 물체의 색은 흡수한 색상의 보색?
- 흡수된 색상이 제거된 빛과 보색에 해당하는 빛이 만들어내는 빛은 얼마나 유사할까요??

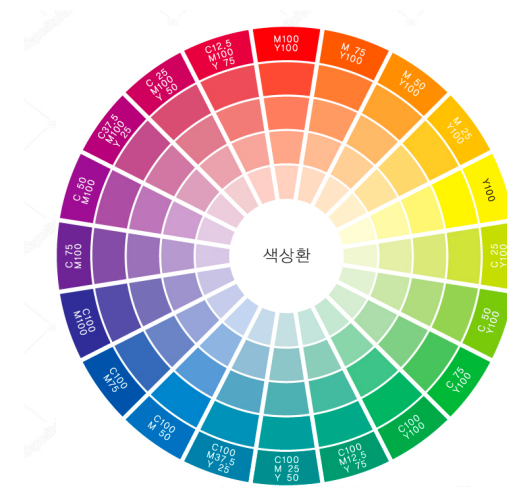
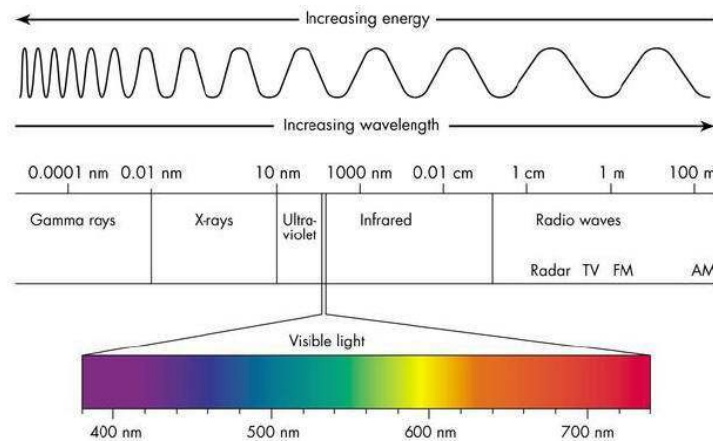


흡수선

Overview

보색이란 뭡까요?

- 보색 관계에 있는 색을 찾을 때 색상환을 이용합니다.
- 근데 색상환이 가시광선 스펙트럼을 쭉 이어둔 것 같지 않나요?
- 그렇다면, 단파장광 - 보색광 평면에서 직선 관계가 나타날 것 같습니다...?



Overview

보색에 관해 살펴볼 문제들

- (1) 보색 쌍인지 판단하는 방법들
- (2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색
- (3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

(1) 보색 쌍인지 판단하는 방법들

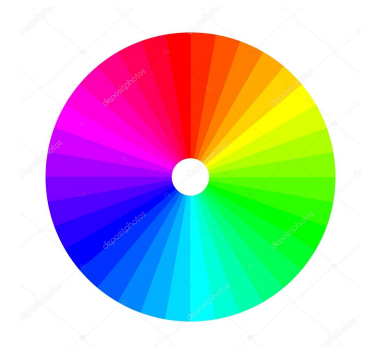
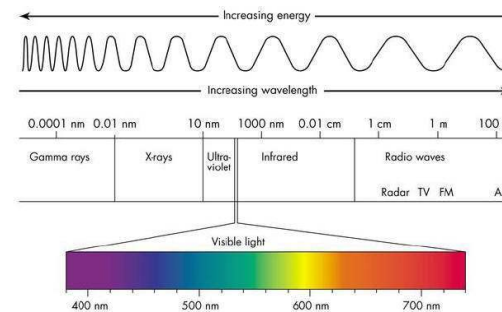
- 보색이란??
 - 감산혼합에서 보색은 섞여서 검정을 만드는 색의 쌍
 - 가산혼합에서 보색은 섞여서 흰색을 만드는 색의 쌍
- 우리가 정한 색 튜플에서
 - 감산혼합은 내분?
 - 가산혼합은 산술 합?
- 그렇다면 산술 합이 $(1, 1, 1)$ 을 만족하는 한 쌍이 보색 관계에 있다고 정의!

(1) 보색 쌍인지 판단하는 방법들

- 우리가 앞에서 많은 근사(K-Sampling, Cone Cell 반응정도 등)를 취했으며 또한 이 데이터의 100% 신뢰할 수 없다.
- 정확한 보색 쌍은 찾기 어렵겠지만 가장 가까운 보색 쌍을 탐색한다
- 두 가지 탐색 원리

- 최소 분산법

- 최소 평균 편차법

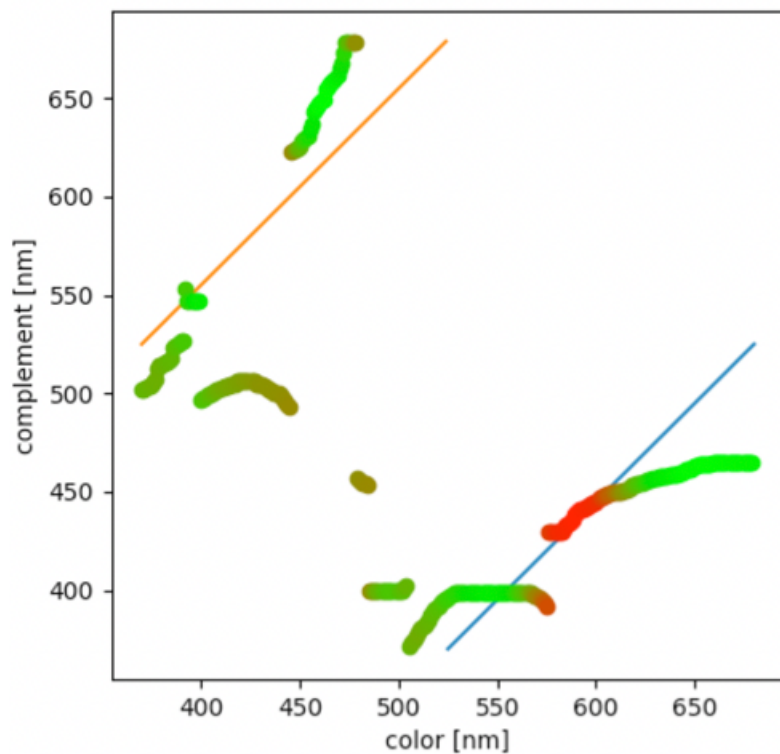


(2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색

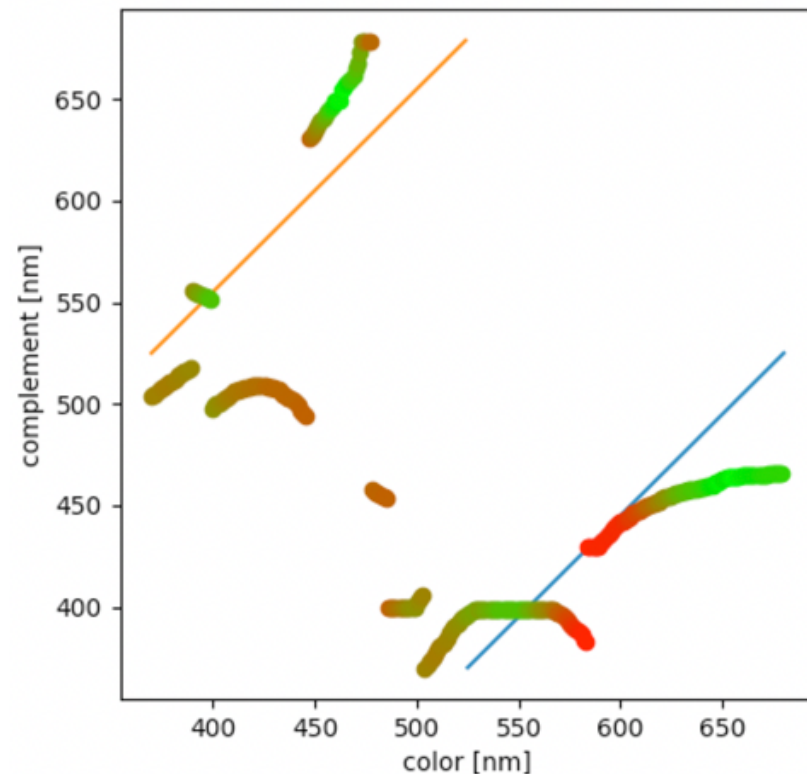
보색 탐색 방법

- 최소 분산법
 - $[R1 + R2, G1 + G2, B1 + B2]$ 와 $[1, 1, 1]$ 의 분산을 최소화
- 최소 평균 편차법
 - $[R1 + R2, G1 + G2, B1 + B2]$ 와 $[1, 1, 1]$ 의 평균편차를 최소화

(2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색 보색 대응 관계



최소 분산법으로 탐색한 보색 대응 관계



최소 평균 편차법으로 탐색한 보색 대응 관계

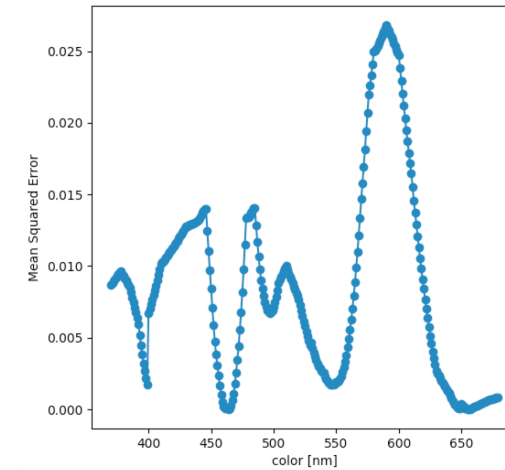
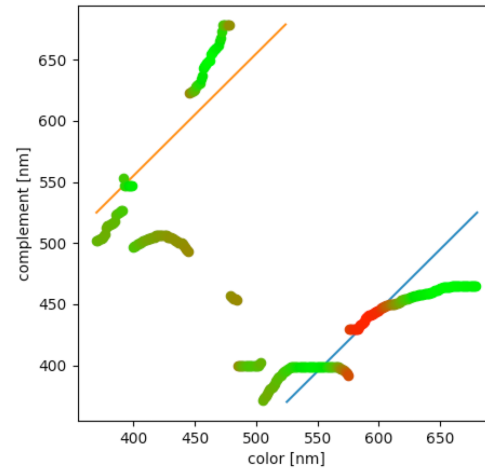
(2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색

보색 대응 관계

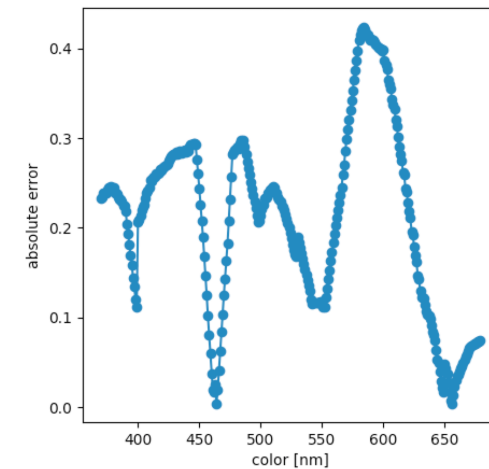
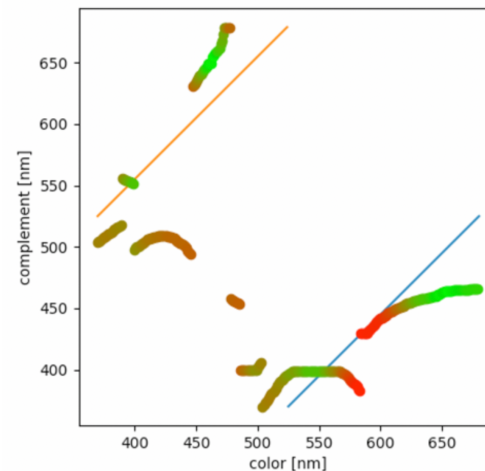
보색 대응 그래프

분산/평균편차

최소 분산법 결과

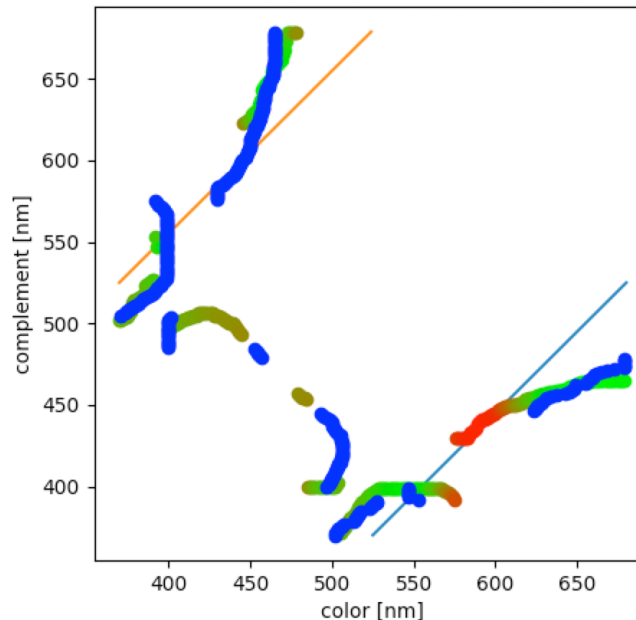


최소 평균편차법 결과



(2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색 보색의 전단사성 확인

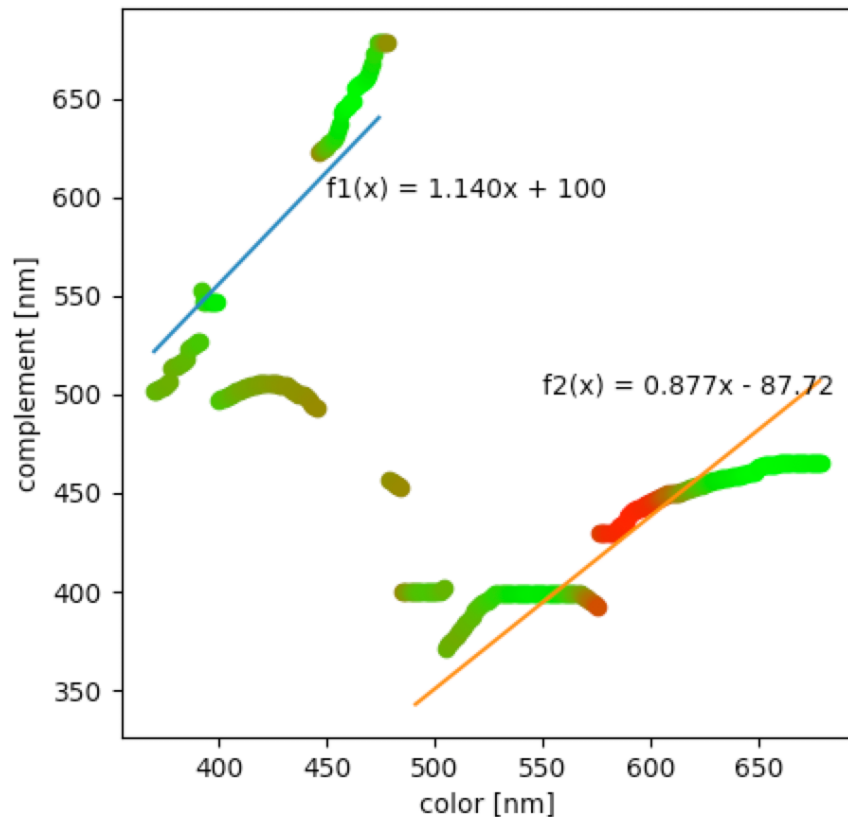
보색은 쌍을 이루기 때문에, 역대응도 되어야 한다. (전단사성 확인) $y=x$ 대칭 시키면 어떤 모양이??



- 놀랍게도, 분산이 작게 나타난 부분만 전단사를 보장하는 듯한 모습을 확인할 수 있었다.

(2) 단파장 광의 보색에 대응되는 단파장 광 탐색 보색 대응 관계 Linear Regression

- 전단사가 보장되는 것으로 볼 수 있는 일부 점을 모아 선형회귀분석



$$f_1(x) = mx + n$$

$$f_2(x) = \frac{1}{m}x - \frac{n}{m}$$

$$m = 1.14, \quad n = 100$$

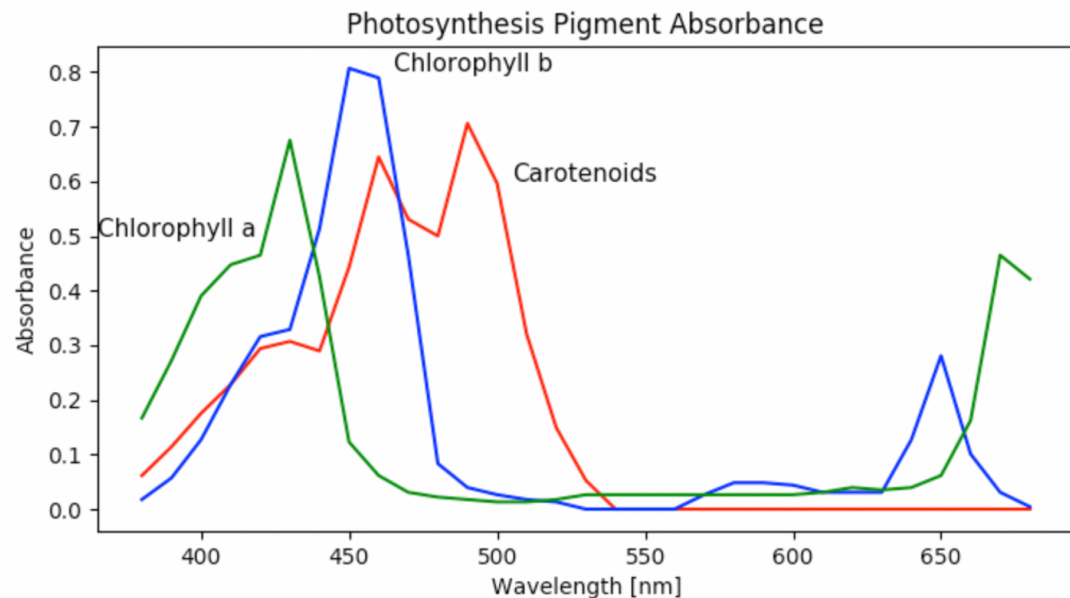
$$complement(\lambda(\text{nm})) = \begin{cases} 1.14x + 100 & (370 < \lambda < 480) \\ 0.877x - 87.72 & (480 < \lambda < 680) \end{cases} [\text{nm}]$$

$$\text{MSE} = 754.1, \text{SD} = 27.46$$

보색 변환 함수!

(3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

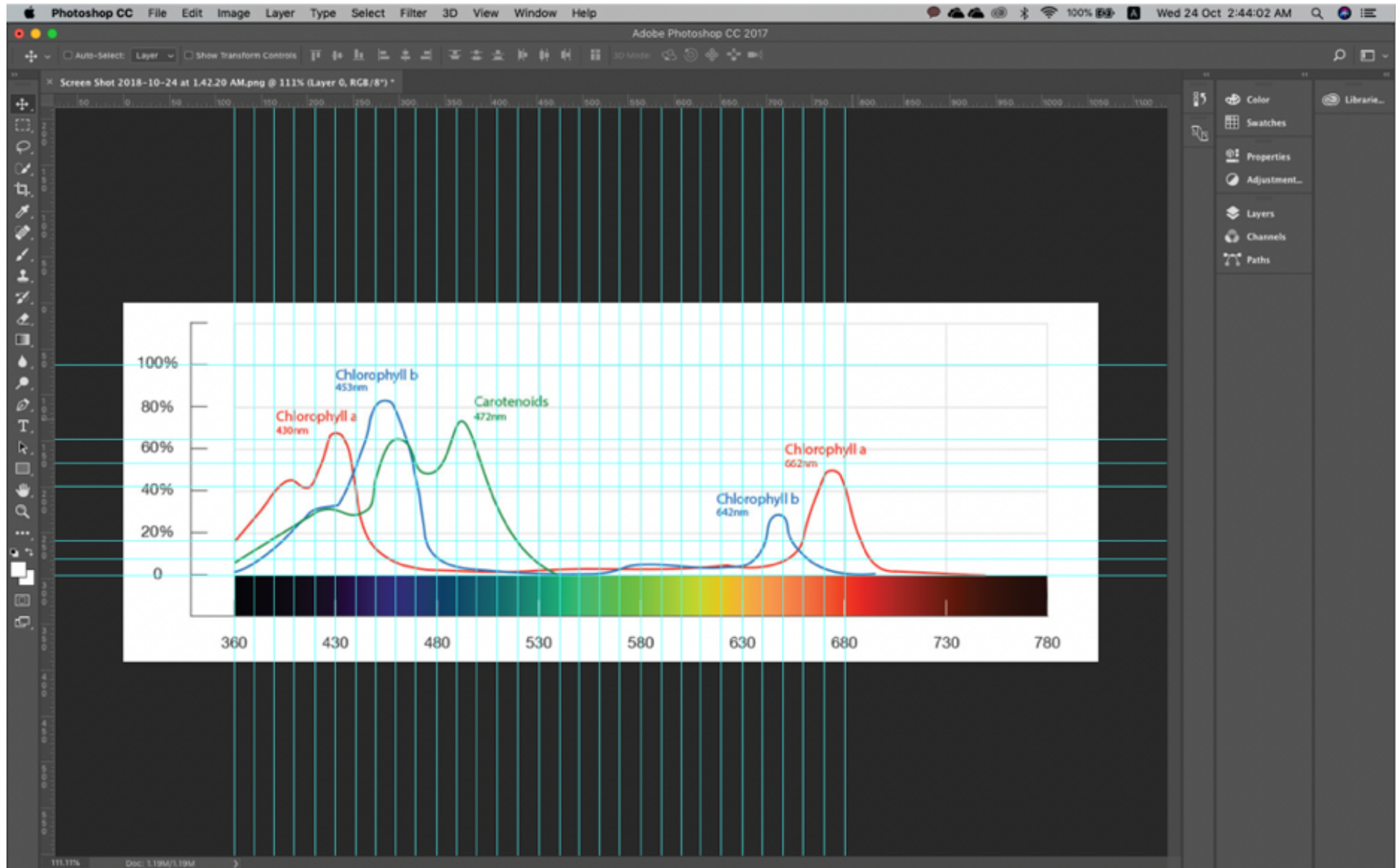
테스트 해 볼 물체 선정



- 나뭇잎의 색은 광합성 색소에 의해서만 결정된다고 가정(1:1:1)
 - 갈색 계열 나뭇잎이겠군요.....!!
- 10nm 간격으로 흡수율 데이터를 얻고, 나머지 지점은 내분 처리

(3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

데이터를 찾지 못해 일일이 구했습니다...



(3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

색을 만드는 두 가지 방법

- Color 1
 - 물체가 흡수한 빛의 보색에 해당하는 빛으로 구성된 색
- Color 2
 - 물체가 흡수한 빛을 제거한 빛으로 구성된 색

빨간색 물체가 있다고 하면,

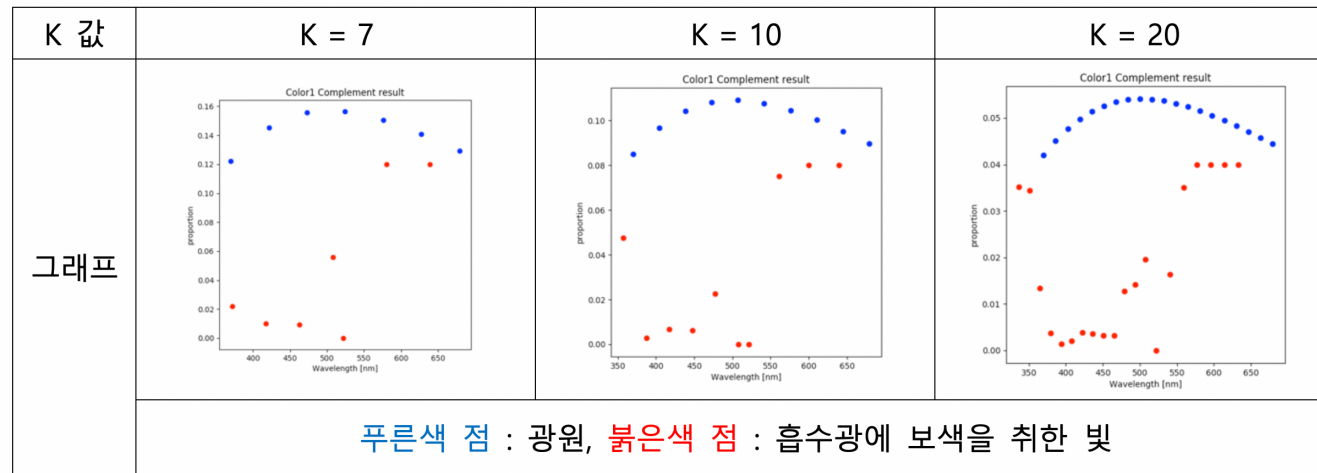
*** Color 1: 청록색?**

*** Color 2: 빨간색을 제외한 모든 색?**

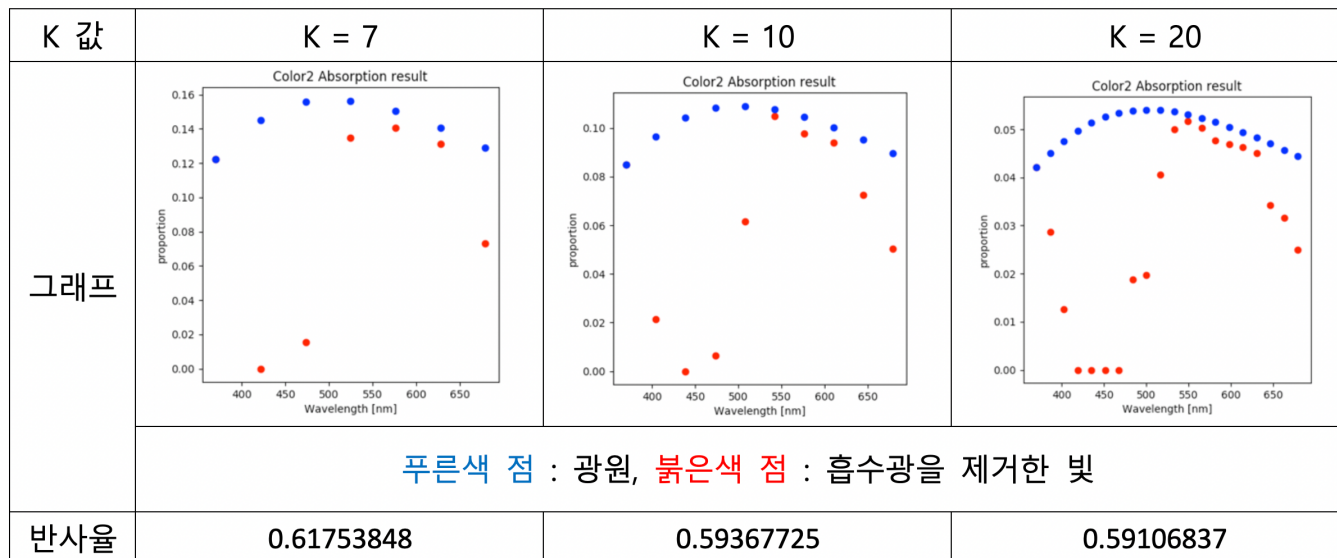
(3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

Source light와 두 개의 Color light

<Color 1>



<Color 2>



(3) 보색광이 만드는 색과 흡수광을 제거한 빛이 만드는 색은 비슷한가?

Color light에 의한 Color tuple

Color 1	K = 7	K = 10	K = 20
R1	0.5358	0.5242	0.5183
G1	0.3678	0.3643	0.3994
B1	0.0963	0.1114	0.0822

Color 2	K = 7	K = 10	K = 20
R2	0.4832	0.4919	0.5007
G2	0.3826	0.3865	0.3972
B2	0.1340	0.1215	0.1030

(색 거리)² 값

	K = 7	K = 10	K = 20
SS	4.407E-3	1.638E-3	7.472E-4

최대 색 거리(K = 7) 0.066 << sqrt(3)으로 두 색은 상당히 유사함
샘플링을 많이 할수록 정확해지는 경향성 있음

Problem 2 Summary

- 보색이란, 두 color tuple의 합이 $(1, 1, 1)$ 이 되는 색으로 정의
- 정의에 가장 부합하는 보색 쌍을 찾아보았으며, 보색으로 변환하는 분리형 선형 함수를 얻음
- 나뭇잎의 색을 두 가지 방법으로 처리해도 두 색이 그렇게 큰 차이를 보이지 않았음.

Problem 3

빛의 혼합 연산

- (1) 색의 혼합 연산 방법 탐색
- (2) 색의 혼합 연산 방법 적용

Overview

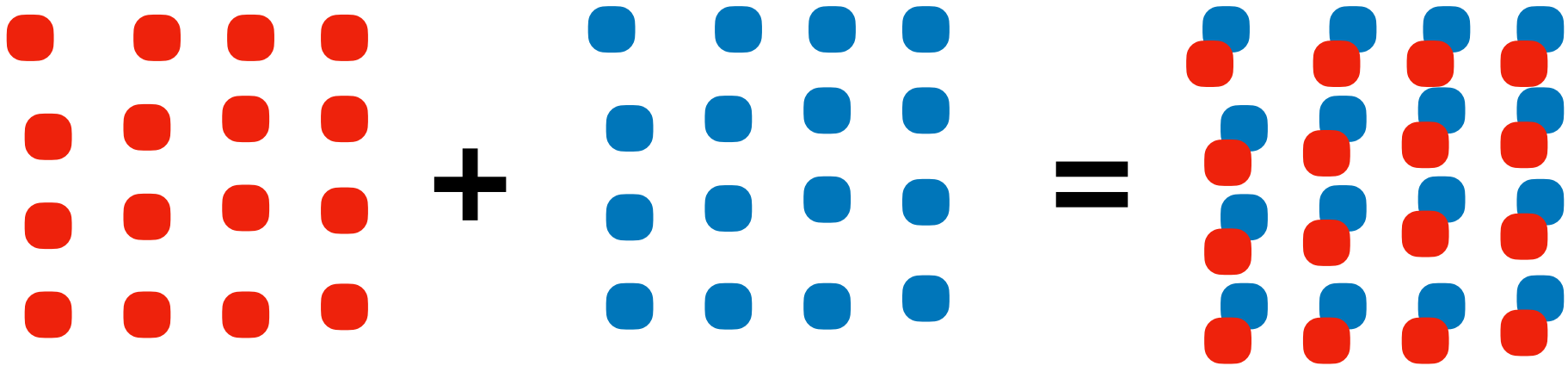
색을 섞기?

- 우리가 다루는 색 체계는 “빛이 많이 들어오면 그만큼더 신호가 강해지는” 가산혼합형 색 체계입니다.
- 가산 혼합에서는 빛을 섞고 섞으면 백색광이 됩니다.
- 우리가 물감을 섞어 새로운 색을 만드는 것은 감산 혼합 과정입니다.
- (사실 색을 나타내는 빛보다 그 빛이 나타내는 색이 더 궁금합니다 ㅎㅎ)
- 그럼 감산혼합을 어떤 방법으로 다룰 수 있을까요?

Overview

색을 섞기?

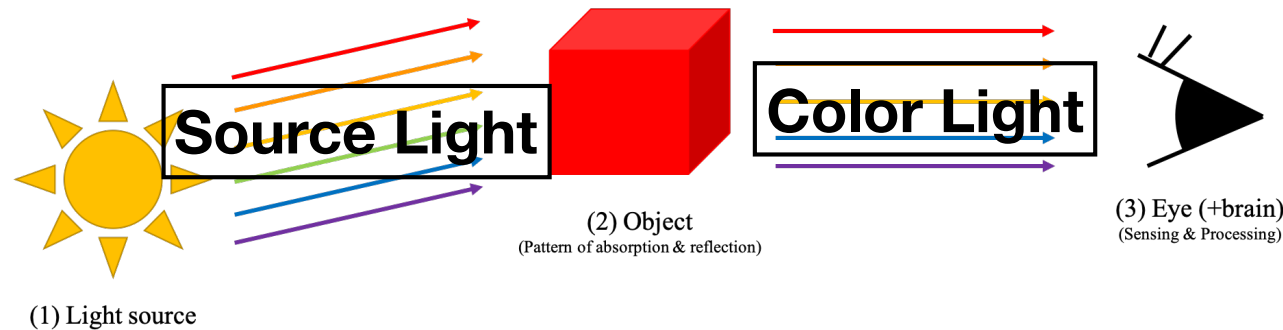
- 다음과 같은 상황으로 생각할 수 있지 않을까요?



충분히 더 큰 스케일에서 보면 보라색??

(1) 색의 혼합 연산 방법 탐색

문제 접근하기



$$color\ light = \{(\lambda_i, p_{\lambda_i}) \mid 1 \leq i \leq k, 370nm \leq \lambda_i \leq 680nm, 0 \leq p_{\lambda_i} \leq 1\} \cup \{Intensity(relative)\}$$

$$\sum_{i=1}^k p_{\lambda_i} = 1$$

- 색을 만드는 데 관여하는 color light를 나타내는 빛 집합(K-Sampling 처리됨)
- 서로 다른 두 color light 를 합쳐서 새로운 color light를 만들어 색의 혼합을 구현
- Intensity가 더 큰 빛의 기여도가 더 높도록 집합 재구성

(1) 색의 혼합 연산 방법 탐색

색의 혼합은 빛 집합의 내분으로!



$$color\ light = \{(\lambda_i, p_{\lambda_i}) \mid 1 \leq i \leq k, 370\text{nm} \leq \lambda_i \leq 680\text{nm}, 0 \leq p_{\lambda_i} \leq 1\} \cup \{\text{Intensity}(\text{relative})\}$$

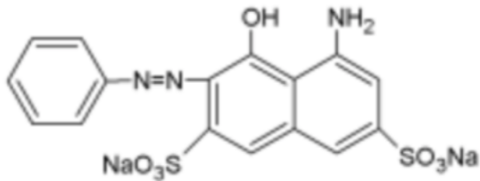
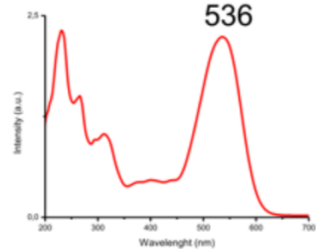
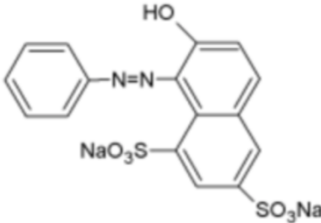
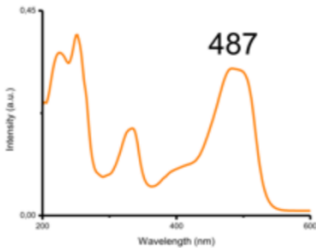
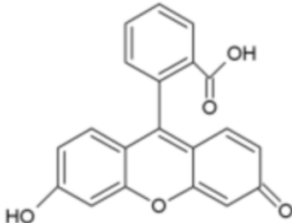
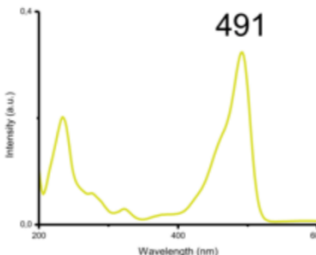
- Color light 1과 Color light 2를 더하는 상황을 생각해보자.
- 같은 K-Sample 환경에서 만들어진 Color light 들만 더할 수 있다고 제한
- 집합의 Intensity를 제외한 원소에 대해 같은 λ 를 가진 원소를 p 를 적절히 더 해주면 된다.

$$0 \leq p_{\lambda_i, new} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} p_{\lambda_i, 1} + \frac{I_2}{I_1 + I_2} p_{\lambda_i, 2} \leq 1$$

(2) 색의 혼합 연산 방법 적용

색 테스트 데이터 수집

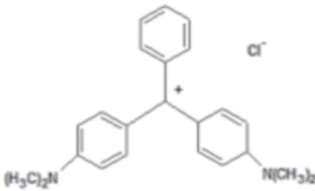
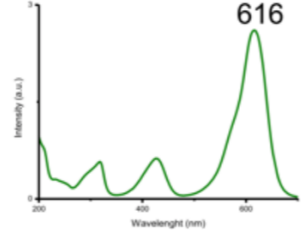
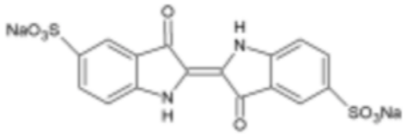
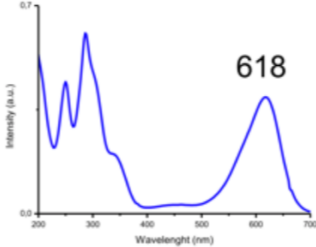
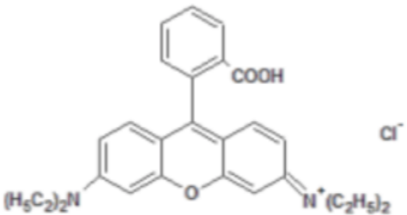
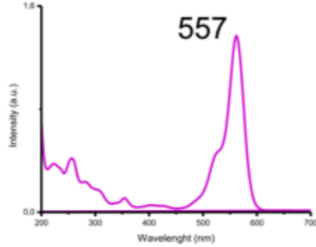
- 염료에 관한 연구에서 조사한 각 염료별 UV-Vis 흡수 스펙트럼 자료를 구했습니다.

Color	Molecular Structure	UV-Vis Spectrum
RED (CI 17200)		
ORANGE (CI 16230)		
YELLOW (CI 19140)		

(2) 색의 혼합 연산 방법 적용

색 테스트 데이터 수집

- 염료에 관한 연구에서 조사한 각 염료별 UV-Vis 흡수 스펙트럼 자료를 구했습니다.

GREEN (CI 42000)		
BLUE (CI 73015)		
VIOLET (CI 45170)		

(2) 색의 혼합 연산 방법 적용

물체의 흡수 필터 만들기

- 염료별로 주어진 UV-Vis 흡수 스펙트럼 자료를 10 nm 간격으로 측정하였습니다.
- 10nm 간격에 해당하는 점은 아니지만, 스펙트럼 그래프 모양에 결정적인 영향을 주는 peak는 따로 측정에 포함시켰습니다.
- 측정하지 않은 파장에서의 흡수율은 인접한 두 점의 흡수율의 내분점을 채택하였습니다.
- 시간이 더 있다면 Chroma Key 를 수행하는 프로그램을 작성해 자동으로 데이터를 세밀하게 얻을 수 있을 것이라 기대합니다.

(2) 색의 혼합 연산 방법 적용

몇 가지 색의 혼합 결과

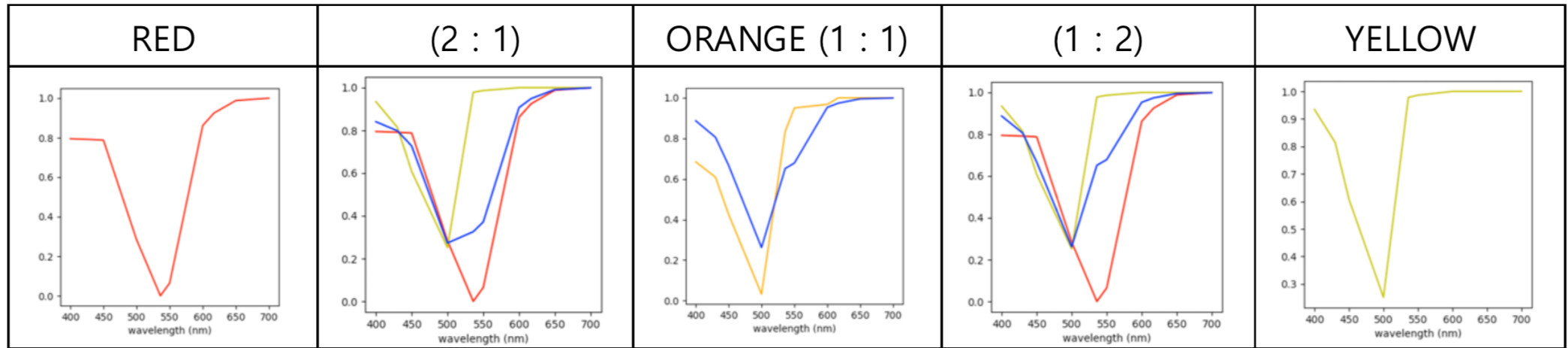


Figure 7 빨강 + 노랑 = 주황 color light 혼합 연산 (결과물은 파란색)

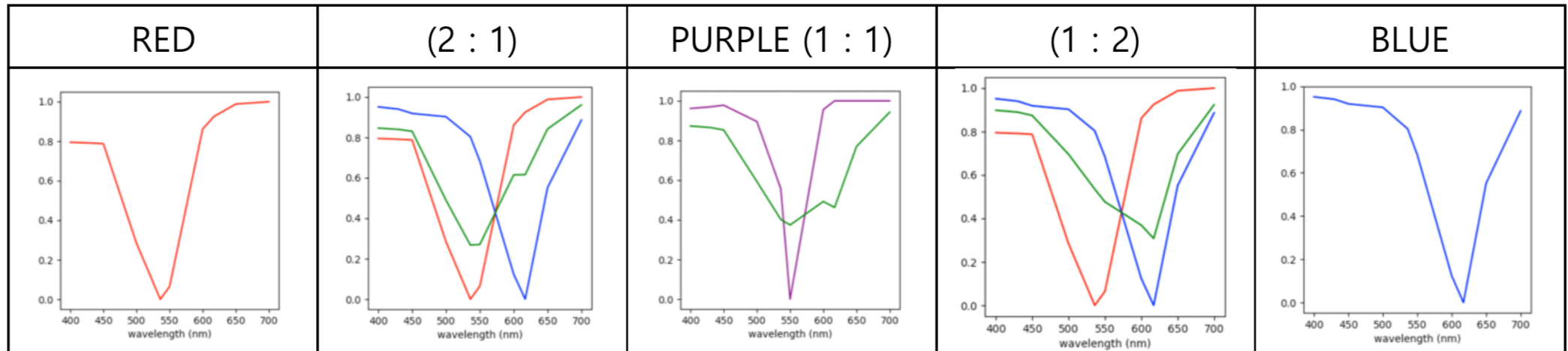


Figure 8 빨강 + 파랑 = 보라 color light 혼합 연산 (결과물은 초록색)

Problem 3 Summary

- 우리가 만든 색 체계에서 컬러튜플(R, G, B)의 값은 신경세포가 만드는 세기를 의미함. 클수록 빛의 세기가 강한 것.
- 이처럼 빛의 특성을 가지고 있는 자료이기에, 감산혼합을 위한 연산은 “내분”과 비슷한 속성을 가지고 있습니다.
- 몇몇 염료를 이용해 색의 혼합을 테스트 한 결과 흡수율 그래프 peak가 대체로 일치하는 모습을 확인할 수 있었음.
- 두 색을 섞은 것과 비교한 색이 실제로 일치하는지 알 수 없어 색 거리 분석은 하지 않았음.

Problem 4

복잡한 빛의 분해?

(1) 색 재현 능력이 가장 뛰어난 파장 조합

“빛을 컬러 튜플로 바꿔주는 인코더도 만들었는데,
컬러 튜플을 빛으로 바꿔주는 디코더도 만들어야지?”

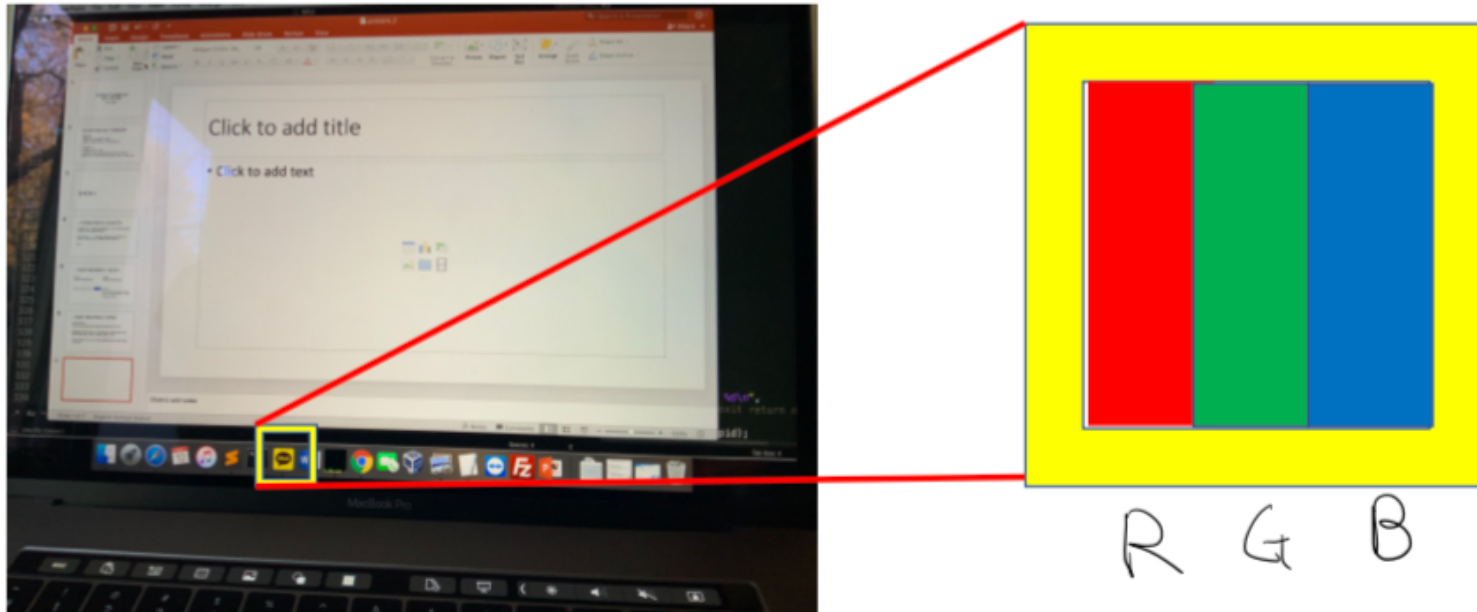
Overview

복잡한 빛을 분해하기

- 우리가 인지하는 색은 망막 신경세포가 발생시키는 (R, G, B)신호로 가정함
- 그렇다면, color light가 다르더라도 (R, G, B) 신호가 같으면 같은 색 인지?
- 어떤 색을 재현하기 위해 복잡한 파장 구성보다 간단한 파장 구성이 색을 재현하는 장비를 만들기도 쉽고,
색을 재현하기 위해 필요한 정보량도 획기적으로 줄일 수 있을 것이다.
- 어떤 색 ((R, G, B)값)이 주어졌을 때 k 개의 파장 조합으로 잘 재현하는 법?
- 어떤 k 가 주어졌을 때 색 재현에 성능이 좋은 최적 파장 조합은??

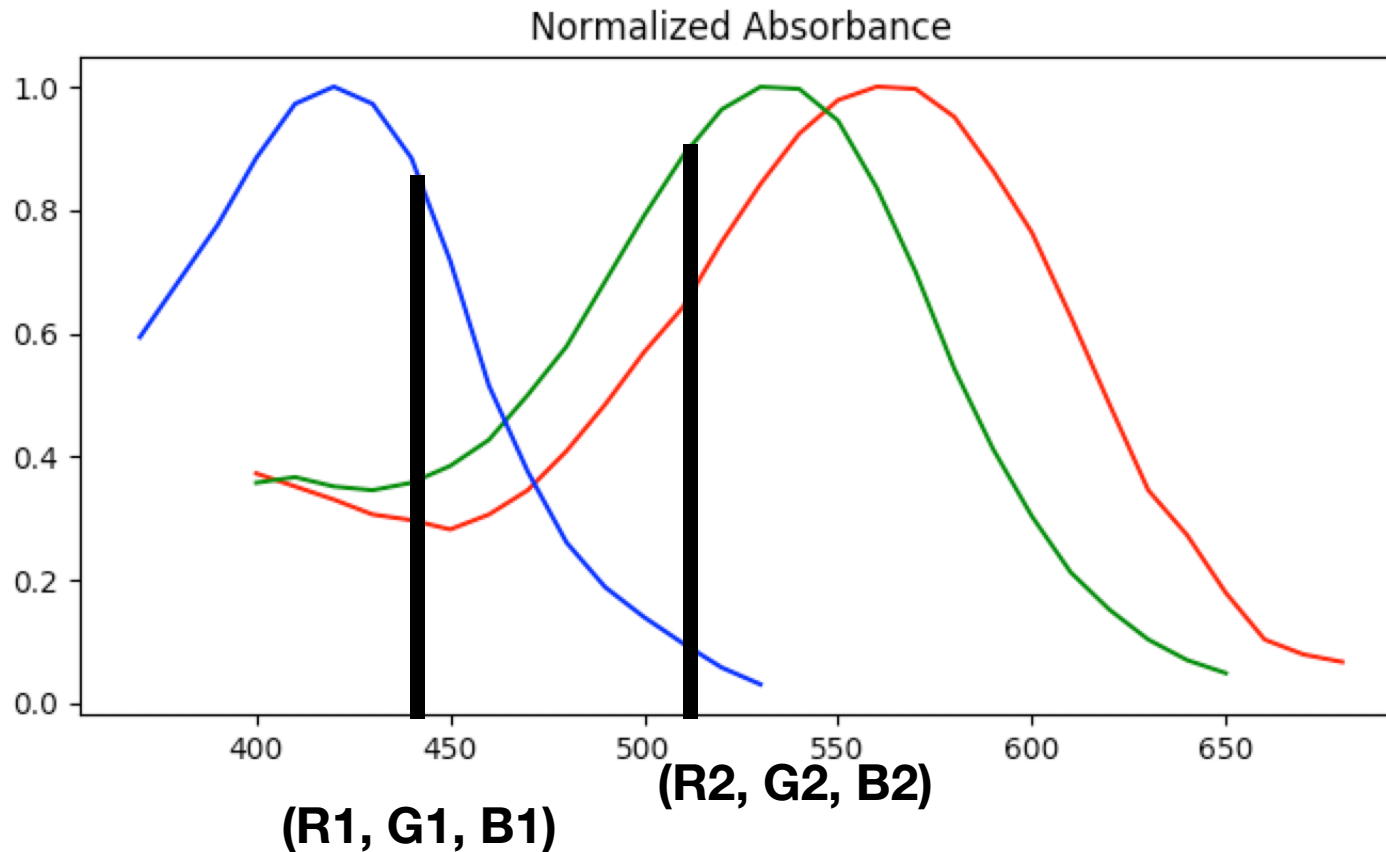
Overview

복잡한 빛을 분해하기



- 이미 디스플레이는 세 가지 파장 조합으로 다양한 색을 나타내고 있군요!

(1) 색 재현 능력이 가장 뛰어난 파장 조합 문제 살펴보기



(1) 색 재현 능력이 가장 뛰어난 파장 조합

이 문제를 부분적으로 해결해보았습니다.

- 문제 해결 방법
- (R, G, B) 컬러튜플 1000개 조합에 대해
- 임의의 세 파장을 선택해서, Intensity 조절으로 1000개의 색 각각에 대해 얼마나 가까운 색을 재현해낼 수 있는지? (가까운 정도는 색 거리가 얼마나 작은지로 판단합니다)
- 1nm 간격(약 300여개 파장)으로 모든 파장 조합을 고려하면 2일 가량 걸리는 거대한 계산..! 그래서 104개의 샘플 조합을 취함

(1) 색 재현 능력이 가장 뛰어난 파장 조합

탐색 결과

항목	원래 색 - 재현 색	파장 1	파장 2	파장 3
최고 성적(1/104)	0.402975	418 nm	515 nm	562 nm
최저 성적(104/104)	0.593256	497 nm	525 nm	647 nm

- 총 104개 조합의 파장에 대해 테스트
(파장 1, 2, 3 모두 각각 20단계의 Intensity 조절으로 색 재현 시도)
- 1000개의 색과, 각각에 대한 재현색의 평균 색 거리를 획득
- 최고 성적을 보인 조합과, 최저 성적을 보인 조합을 표로 나타냄

(1) 색 재현 능력이 가장 뛰어난 파장 조합

왜 R G B 인가?

항목	신경세포 최대 활성 파장에 대한 표준편차
상위 10 퍼센트	18.524834 (nm)
하위 10 퍼센트	60.41106743 (nm)

- 앞에서 진행했던 테스트에서 상위 및 하위 10퍼센트 그룹
- 파장이 작은 순서대로 하나씩 매칭시킨 후, 표준편차를 구한 값
- 색을 잘 재현해낸 그룹은 사람 눈 신경세포 최대 활성과 더 가까움
- 디스플레이 등의 장치에서 R, G, B 세 개의 색 조합을 사용하는 이유가 될 수 있음.

Problem 4 Summary

- 1000가지의 색을 가장 잘 표현할 수 있는 3개 단파장 광을 찾아봄
- 우수한 성적을 보인 단파장 광 조합은 Cone Cell의 최대 활성 파장과 가까운 경향을 보임.
- 최적 K 파장으로 빠르게 수렴하는 알고리즘을 찾을 수 있다면 더욱 좋을 것.

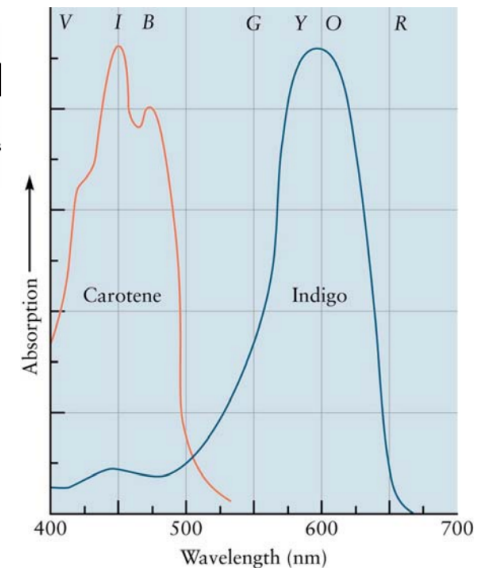
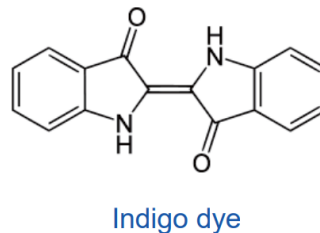
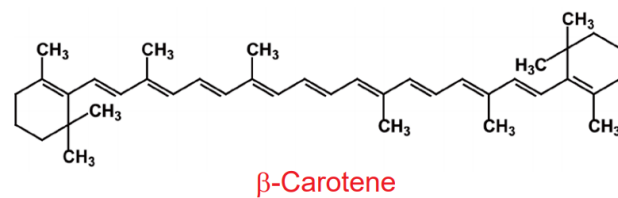
Conclusion

“그래서, 이걸 왜 하는거죠?”

– ??? : 물리적 관점에서 색을 정의해 본 사람

이 색 체계의 특징

- 신경세포 활성화도를 기반으로 한 새로운 (R, G, B) 색 체계
- 색 측정, 색 저장, 색 재현 모두 기존 체계의 의존 없이 수행 가능
- UV-Vis Spectrophotometer를 활용한 Color의 정량적 측정 및 재구성 가능



한 때 이슈가 되었던 문제

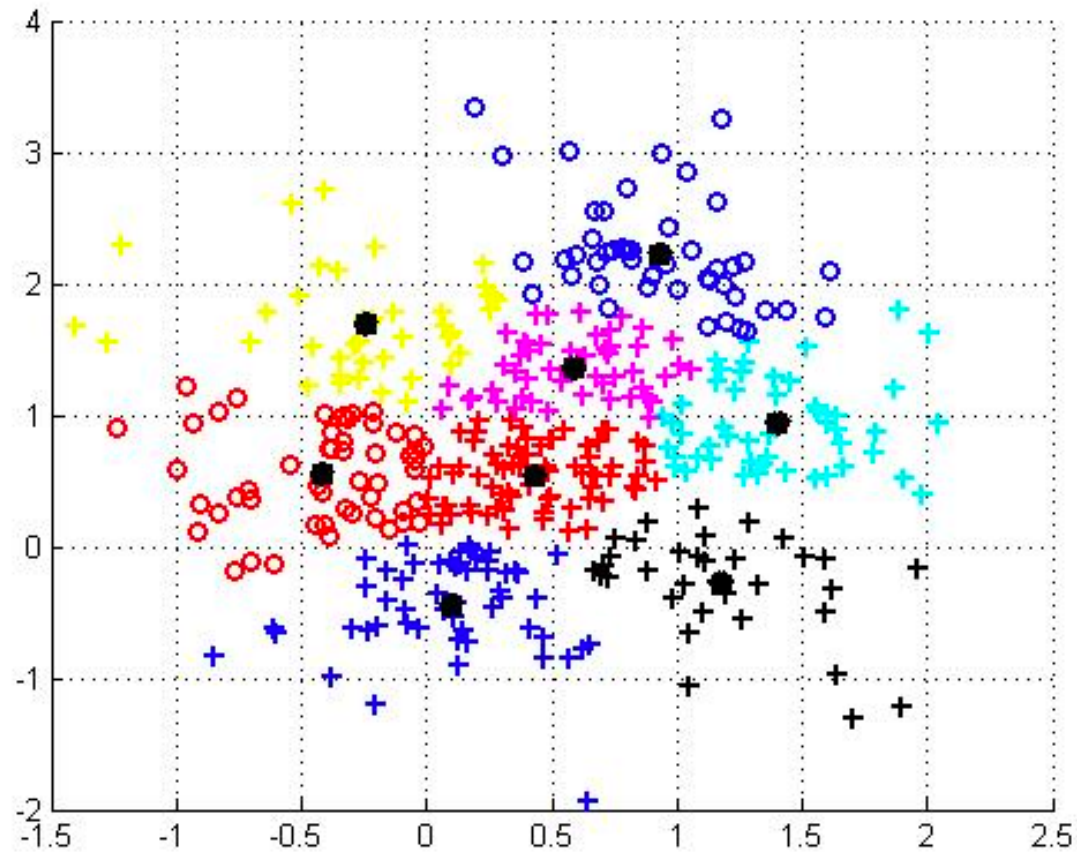


흰금 VS 파검



핑크 VS 민트

왜 그럴까?



사람마다 색을 Clustering 하는 방식이 달라서 그럴 가능성도 있다!

왜 그럴까?

- 뿐만 아니라, 맨 처음 언급 했던 것처럼 주변 광원의 상태에 따라 다른 색이 보일 수도 있다.
- 사람마다 망막의 R, G, B Cone Cell의 구성 비율이 다를 수도 있고, 활성화 비율까지 다를 수 있다.

색의 표준화

- 우리는 색의 존재와 색의 구분법을 스스로 깨우쳤습니다.
- 그런데 이걸 가르쳐 보면 어떨까요?

Standard Light Source



Questions?

- 혹시 질문이 있나요?
- 아니면 새로운 아이디어도 좋고, 함께 이야기 해 볼 거리도 좋아요!

감사합니다!