瞳孔・虹彩・脈波のリアルタイム計測

瞳孔・虹彩・眼球運動の計測

カメラ: カメラ 0　露出指数: フレームレートに合わせる　カメラで開始　動画ファイルで開始　デモ動画で開始　停止　表示: 標準（縦 768 画素）　4K

校正 (C)　校正の解除 (X)　鏡像表示　可視化　負荷の大きい処理: 瞳孔推定（Mask R-CNN）　グラフの描画　分類スコアのしきい値: 0.90（著者の値カメラの水平画角 [deg]: 62　画面の保存

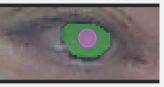
計測　計算の内訳　ヘルプ（説明）



灰の線: 眼裂の輪郭　緑の円: 虹彩（見かけの長径を直径とする円）　桃の円: 瞳孔（検出枠の幅を直径とする円。細線は古い結果を現在の虹彩に当てはめたもの）　矢印: 推定視線方向の投影　黄の線: 脈波に用いる皮膚領域

時刻 58.20 s（計測開始から）
頭部姿勢角（カメラ座標系）: ヨー +16.5°（正 = 被験者の左）　ピッチ +14.3°（正 = 上）　ロール +7.7°
カメラから顔（剛体点群の重心）までの距離: 727 mm（虹彩径 11.7 mm と画角を仮定した推定値）　頭部の回転角速さ: 1 deg/s
眼球回転角の基準: 未校正（眼球の光軸の推定値。視軸とは κ 角だけ異なる）
サッカード候補（Engbert & Kliegl の楕円閾値 λ = 6、判定遅延 0.25 s）: 直近: 55.32–55.41 s、振幅 8.2°、最大角速さ 60 deg/s
脈拍数（POS 法）: 74 bpm（スペクトルの最大ピーク）　SNR +1.2 dB　参考値

右眼（被験者から見て右。グラフでは橙）



眼球回転角（Fick 角）水平 +17.8°　垂直 -10.0°
虹彩の見かけの長径 27.1 px（中心 908, 301 px）
眼球角速さ 平滑化後 8 / 平滑化前 5 deg/s
EAR 0.25　eyeBlink 係数 0.18
瞬目 16 回（直近 56.26–56.53 s、269 ms）
瞳孔虹彩径比 0.363　瞳孔検出枠の幅 8.5 px
瞳孔径の換算値 4.25 mm（径比 × 11.7 mm）　分類スコア 0.93
推定の処理時間 2130

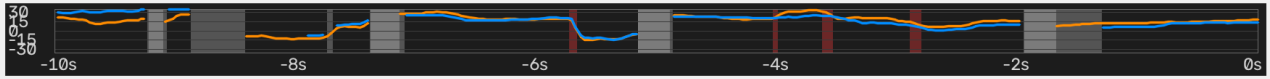
左眼（被験者から見て左。グラフでは青）



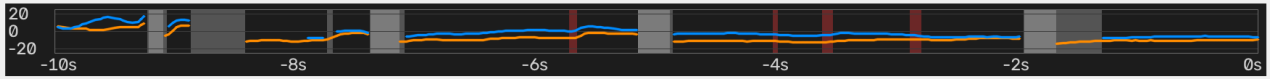
眼球回転角（Fick 角）水平 +13.2°　垂直 -6.7°

橙 = 右眼、青 = 左眼。灰の帯 = 瞬目、赤の帯 = サッカード候補。間隔 0.5 s 超の点は線で結ばない

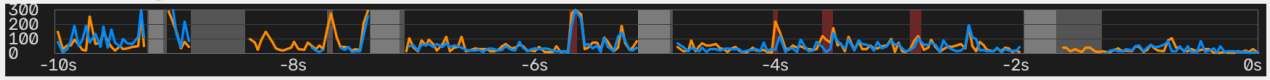
① 頭部に対する眼球の水平回転角 [deg]（Fick 角、平滑化後、正 = 被験者の左）



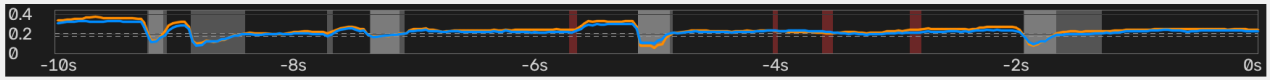
② 頭部に対する眼球の垂直回転角 [deg]（Fick 角、平滑化後、正 = 上）



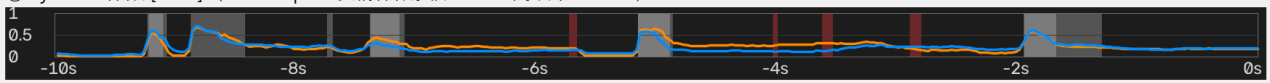
③ 眼球角速さ [deg/s]（片眼ごと、平滑化前、連続 2 フレームから。サッカード候補の判定値とは別）



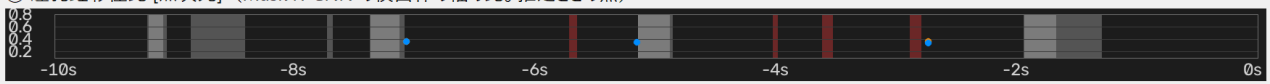
④ EAR（眼裂縦横比）[無次元]（点線 = 閉眼判定 0.18 / 開眼判定 0.207）



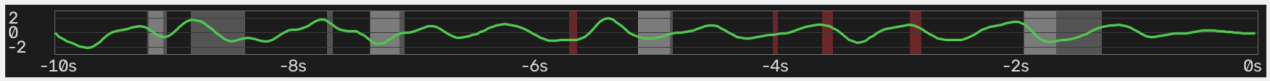
⑤ eyeBlink 係数 [0〜1]（MediaPipe の表情係数。較正された閉眼率ではない）



⑥ 瞳孔虹彩径比 [無次元]（Mask R-CNN の検出枠の幅の比。推定ごとの点）

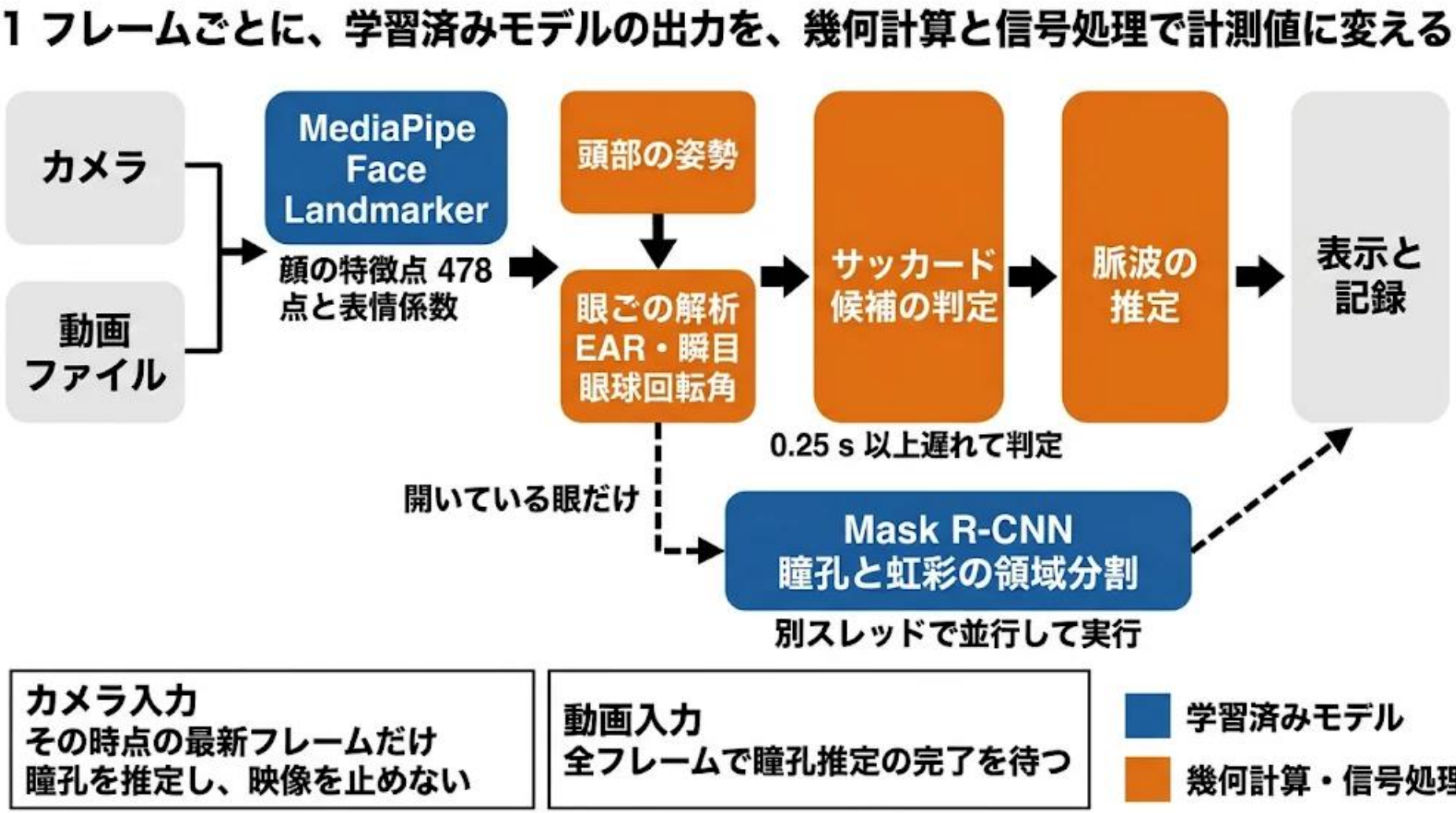


⑦ 脈波 [標準化、無次元]（POS 法 → 0.7〜3.5 Hz の帯域通過。緑 = 品質良、灰 = 品質低。参考値）



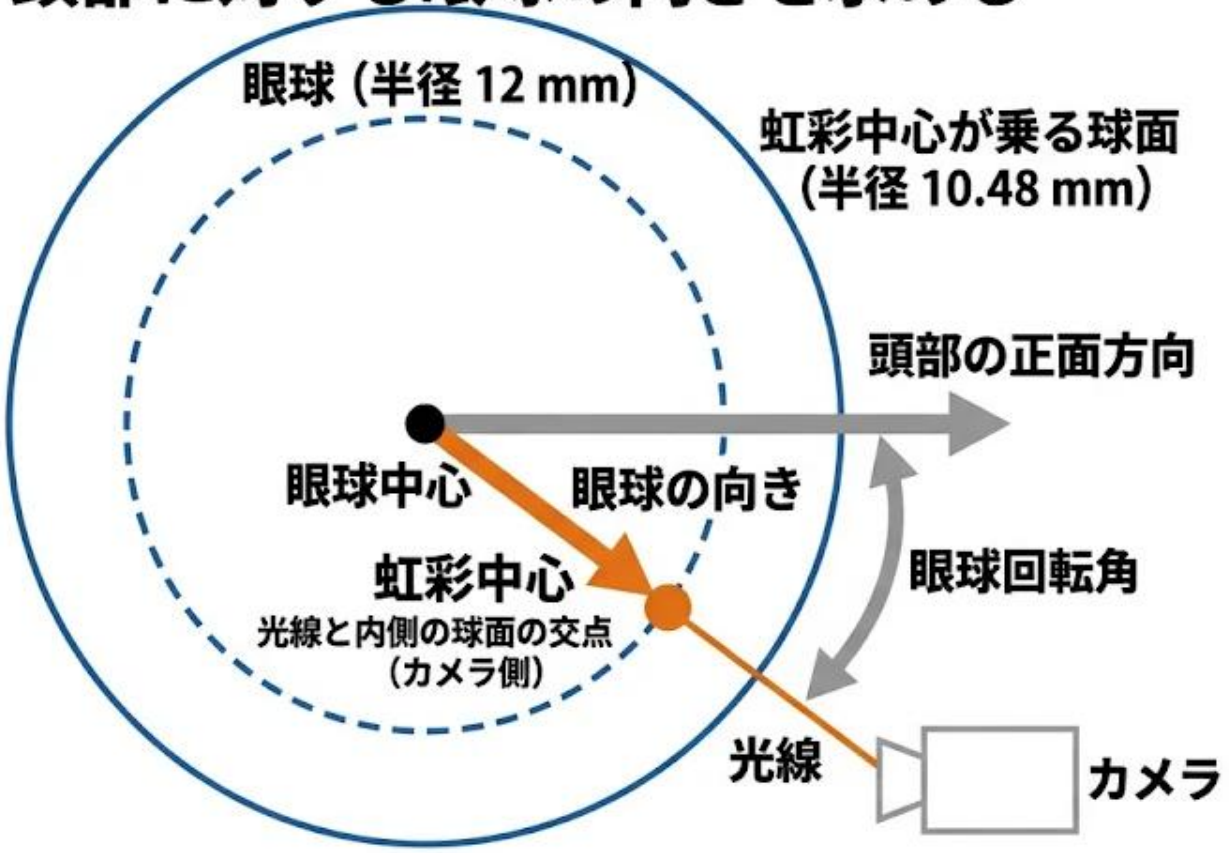
資料中の図などは Google Nano Banana 2 を用いて作成

処理の流れ（学習済みモデルと幾何計算・信号処理の分担）



球形眼球モデルによる眼球回転角

眼球を球とみなし、カメラから見た虹彩中心の位置から、頭部に対する眼球の向きを求める



眼球回転角（Fick 角）

水平：被験者の左が正

垂直：上が正

値を求めない主な場合

頭部の正面方向とカメラの光軸のなす角が 60° 以上

閉眼と判定された

虹彩が検出されない

光線が内側の球面と交わらない

視線の校正

レンズを見つめている間の眼球の向きのずれを測り、眼ごとに回転で補正する

校正（C キー）を押す	被験者はレンズを約 2 s 見つめる	補正の完了



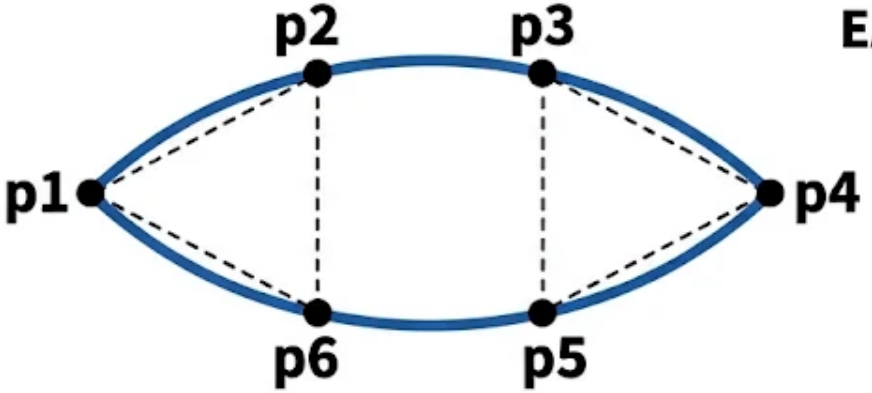
1 点だけの校正

注視方向によって変わる
る誤差は補正されない

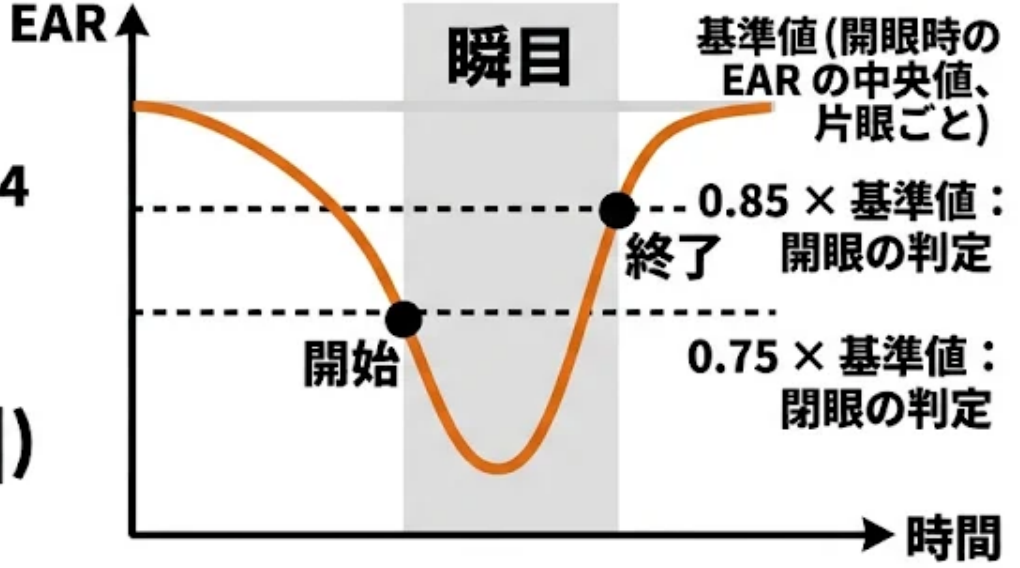
解除は X キー

EARと瞬目の判定

眼の縦と横の長さの比（EAR）で開き具合を表し、しきい値を横切った時刻で瞬目を区切る



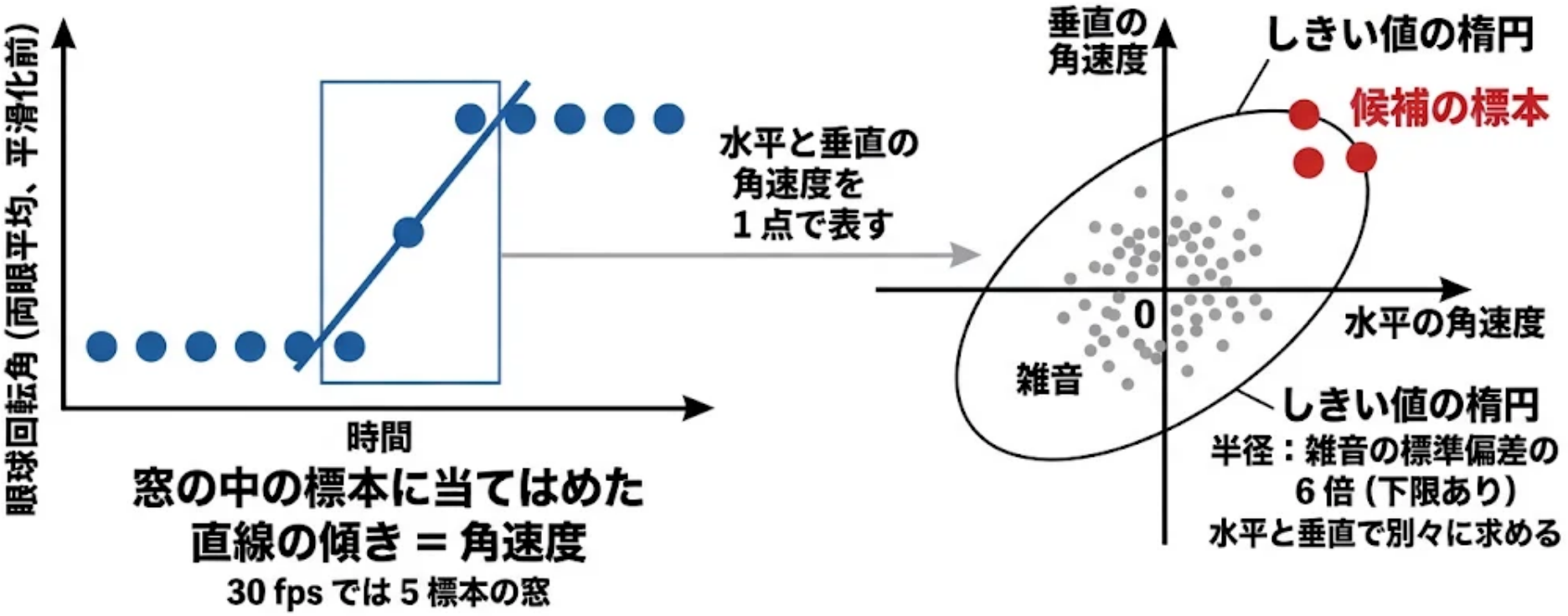
$$EAR = (|p2-p6| + |p3-p5|) \div (2 \times |p1-p4|)$$



持続時間 0.04〜0.9 s → 瞬目	持続時間が 0.9 s を超える → 長い閉眼	直前の瞬目の終了から 0.12 s 以内に始まる → 数えない

サッカード候補（角速度と楕円のしきい値）

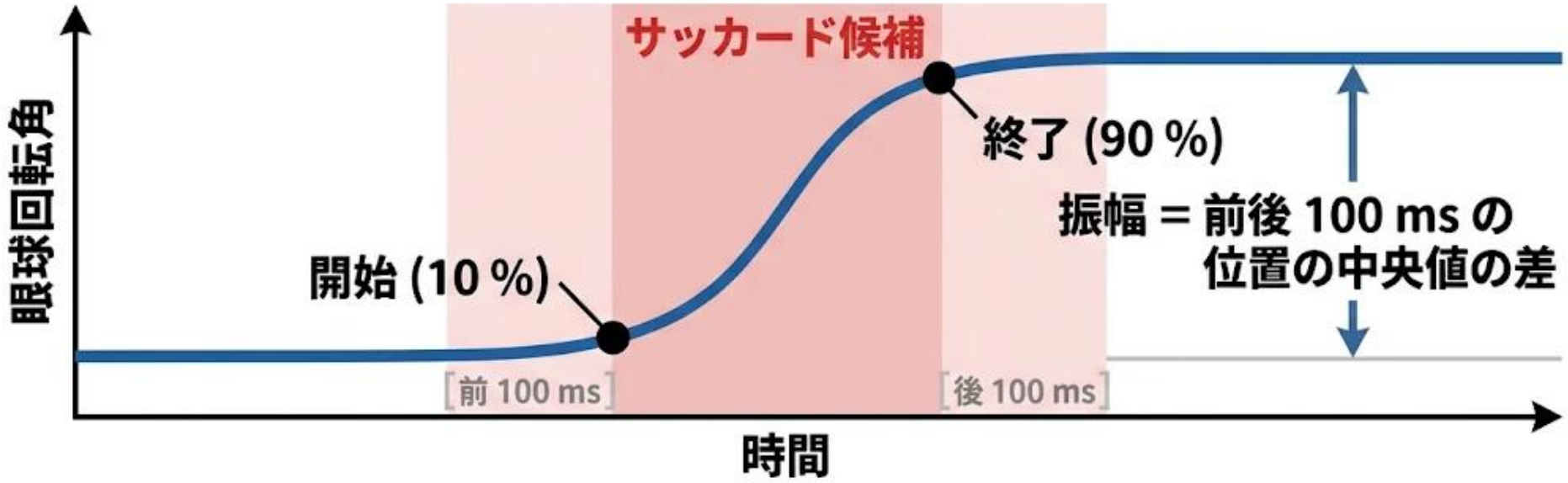
眼球回転角の変化の速さ (角速度) が楕円の外に出た標本を、
サッカード (急速な眼球運動) の候補の標本とする



候補の標本を 2 個以上含む区間を、サッカード候補とする

サッカード候補（開始・終了・振幅・棄却）

変位の 10 % と 90 % に達した時刻を開始と終了とし、振幅が小さい候補は棄却する



棄却する候補

振幅が 2° 未満

区間とその前後 100 ms で、頭部の回転角速さが 150 deg/s を超える

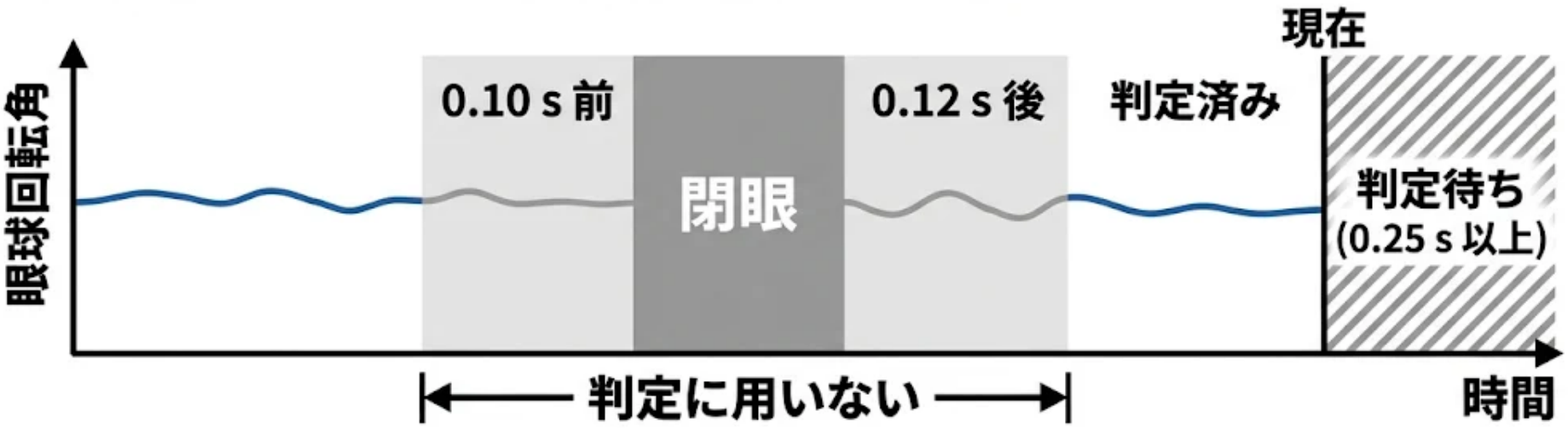
合成データでの再現率

30 fps、片眼ごとに独立な視線雑音（標準偏差 0.7°）



サッカード候補（判定に用いない区間と判定の遅れ）

閉眼の前後は判定に用いない。閉眼の手前を遡って除けるように、判定を遅らせて行う

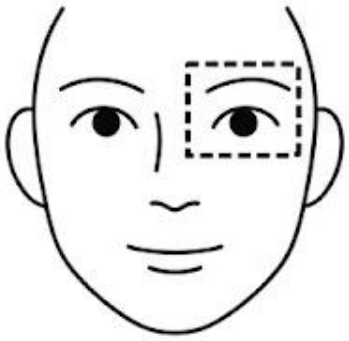


判定に用いない区間ができるフレーム
閉眼と判定された
虹彩が検出されない
顔が検出されない
eyeBlink 係数（MediaPipe の表情係数）が 0.5 以上

閉眼が始まる前の標本も除くため、判定を 0.25 s 以上遅らせる

瞳孔推定と瞳孔虹彩径比

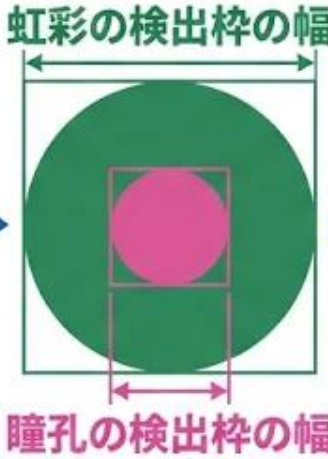
眼領域を切り出して領域分割し、瞳孔と虹彩の検出枠の幅の比を求める



眼領域を切り出す

Mask R-CNN

瞳孔と虹彩の
領域分割



瞳孔虹彩径比

＝瞳孔の検出枠の幅
÷虹彩の検出枠の幅

瞳孔径の換算値

＝瞳孔虹彩径比 × 11.7 mm
（可視虹彩径の仮定値）

採用の規則

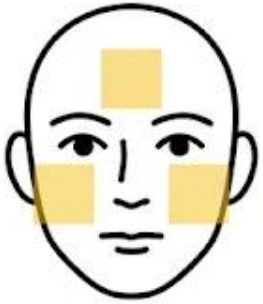
瞳孔と虹彩のそれぞれで、分類スコアが最高の検出を選ぶ
分類スコアがしきい値（既定 0.90）を超えた場合だけ採用
瞳孔虹彩径比は、瞳孔と虹彩の両方が採用された場合だけ求める

瞳孔が検出されにくい場合に試す順

1. カメラに近づく
2. 顔を明るく照らす
3. 分類スコアのしきい値を下げる
（誤検出が増える）

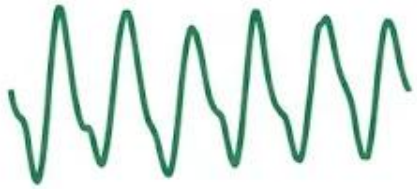
脈波の求め方

額と両類の色の変化から脈波を求め、パワースペクトルの最大ピークの周波数から脈拍数を求める（参考値）



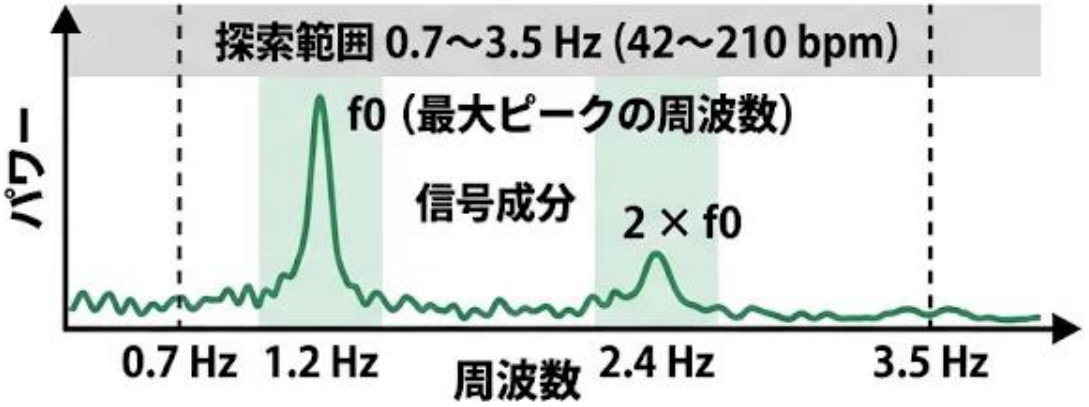
額と両類の RGB 平均

POS 法
肌色の時間変化から
脈波を取り出す



脈波

パワースペクトル（直近 12 s）



脈拍数 ＝ f0 × 60（例：f0 ＝ 1.2 Hz → 72 bpm）

信号品質が低いと表示する場合

SNR（信号成分とそれ以外の電力の比）が 0 dB 以下

最大ピークが探索範囲の端にある

顔が連続 8 s 以上検出されてから推定を始める

カメラの撮影モードと露出の決め方

実際にフレームを取得してフレームレートを実測し、フレームレートを優先して解像度を選ぶ

	1920×1080	1280×720	640×480
300 fps	1	2	3
120 fps	4	5	6
60 fps	7	8	9
30 fps	10	11	12

結果が明らかな組み合わせは省く

実測フレームレートが最高値の 90 % 以上のモードのうち、画素数が最大のものを選ぶ

確認には十数秒〜数十秒かかる

露光時間 ≈ 2^x s （x は露出指数）

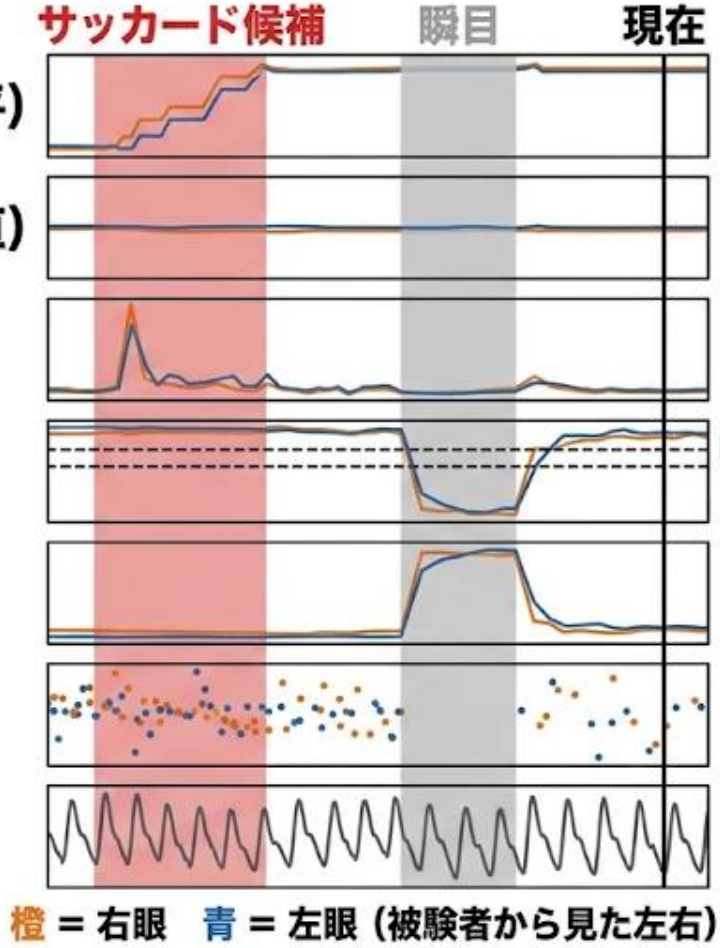


既定では、1 フレーム間隔に収まる最長の露光時間を選ぶ

自動露出は用いない（暗いとフレームレートが下がるため）
画像が暗い場合は、露出を長くせず照明を明るくする

表示

瞬目とサッカード候補の帯が全段に重なるので、各量の変化を同じ時刻で見比べられる



記録ファイル（eye_logs フォルダ）

フレームごとの値：eye_日時.csv

瞬目・サッカード候補：
eye_events_日時.csv

計測の条件：eye_meta_日時.txt