

光学式PPGセンサーの 外光除去技術

2個電荷リザーバ方式の原理と実装

PPG測定における3つの主要な干渉成分

1. DC成分（直流オフセット）

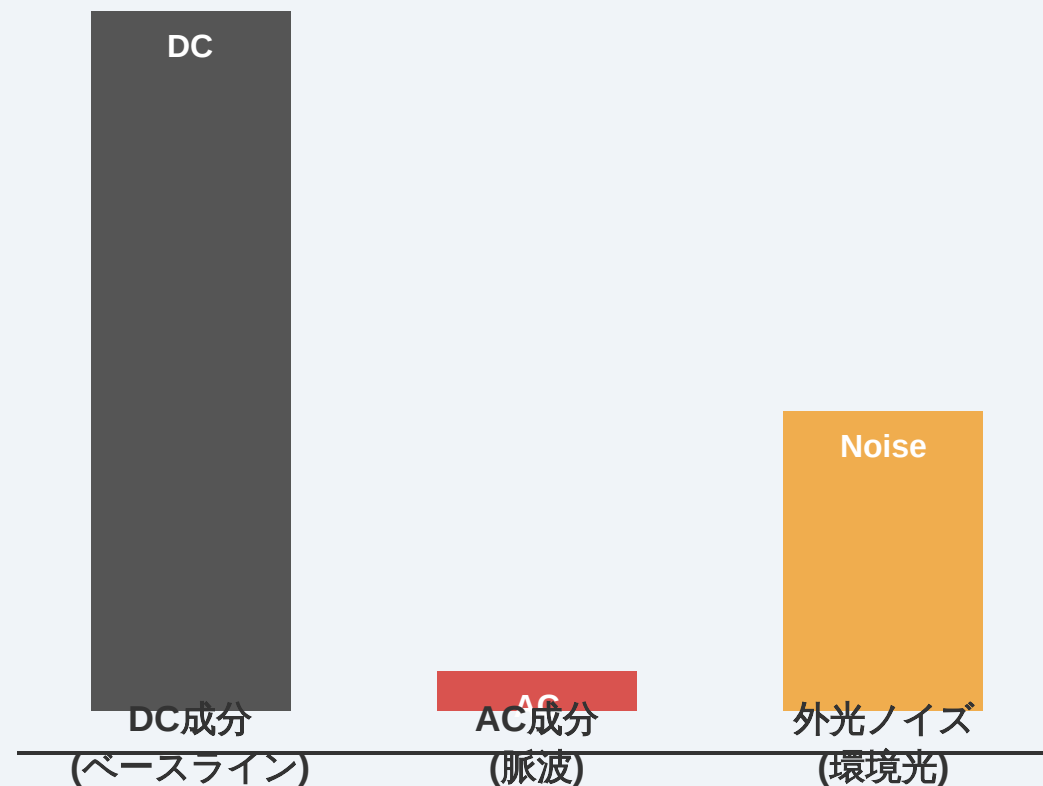
組織からの反射光ベースライン。脈波信号より100倍以上大きい。

2. AC成分（脈波信号）

心拍による血液量変化。測定したい微弱な信号。

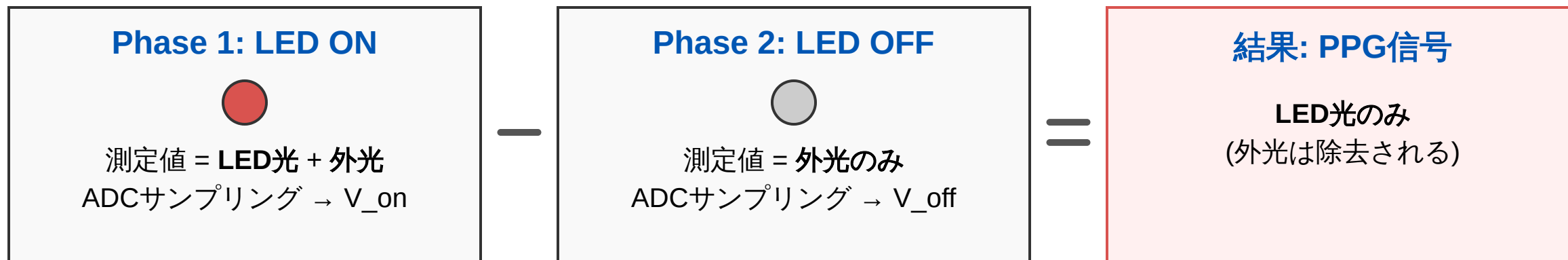
3. 外光ノイズ

環境光（蛍光灯、太陽光）。AC成分を大きく汚染する。



課題: 巨大なDCと外光ノイズの中から、
微小なAC成分を抽出する必要がある

従来のLED ON-OFF方式による外光除去



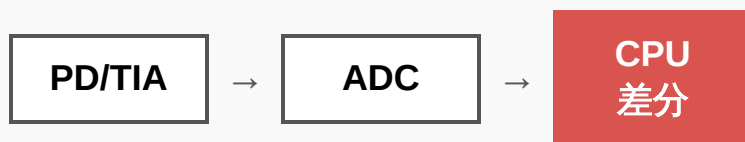
$$\text{PPG信号} = V_{\text{on}} - V_{\text{off}} = (\text{LED光} + \text{外光}) - \text{外光} = \text{LED光}$$

- 原理: 時間的な差分を取ることで外光成分をキャンセル
- 課題: デジタル演算が必要、ADCのダイナミックレンジが外光に占有される

アナログ領域での外光除去 - 2個電荷リザーバ方式

原理は同じ（時間的差分）だが、**差分を取る場所**が異なる

従来: LED ON-OFF方式



外光を含んだままADC変換（ダイナミックレンジを浪費）

今回: 2個電荷リザーバ方式



外光を除去してからADC変換（微弱信号を高精度に測定）

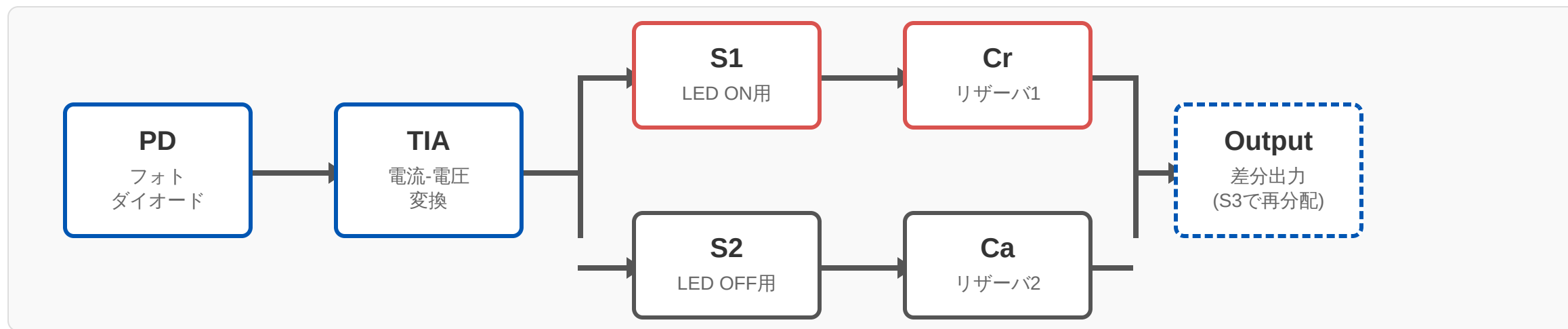
主な利点

⚡ **低消費電力** — デジタル演算不要
(26.4 μ W程度)

⚡ **高ダイナミックレンジ** — ADCレンジ
を信号に集中できる

🕒 **リアルタイム処理** — 遅延がほぼな
い、瞬時に除去完了

2個電荷リザーバ方式の回路構成



PD フォトダイオード。受光した光量に応じた電流を生成する。

S1/S2 サンプリングスイッチ。LEDの点灯タイミングに合わせて信号を振り分ける。

S3 再分配スイッチ（図中省略）。CrとCaを接続して差分を取る。

TIA トランスインピーダンスアンプ。微弱な電流を電圧信号に変換・増幅する。

Cr/Ca 電荷リザーバ（コンデンサ）。信号電荷を一時的に保存する。

Output 外光成分が除去された純粋なPPG信号が出力される。

Phase 1: LED ON時に信号をCrに保存

スイッチ状態

S1: ON (接続)

S2: OFF (切断)

S3: OFF (切断)

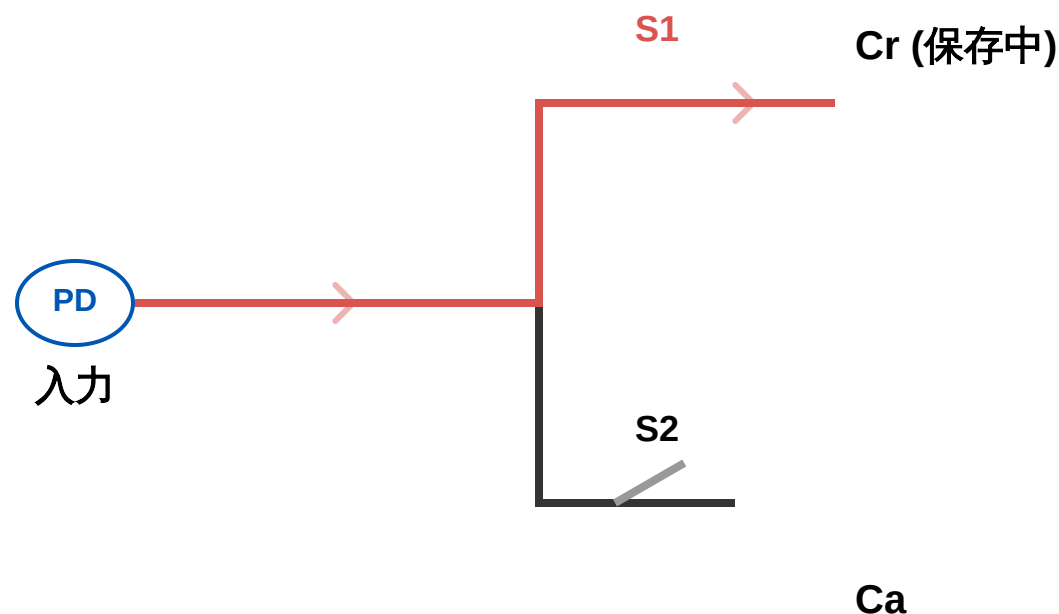
入力信号

LED: 点灯 (ON)

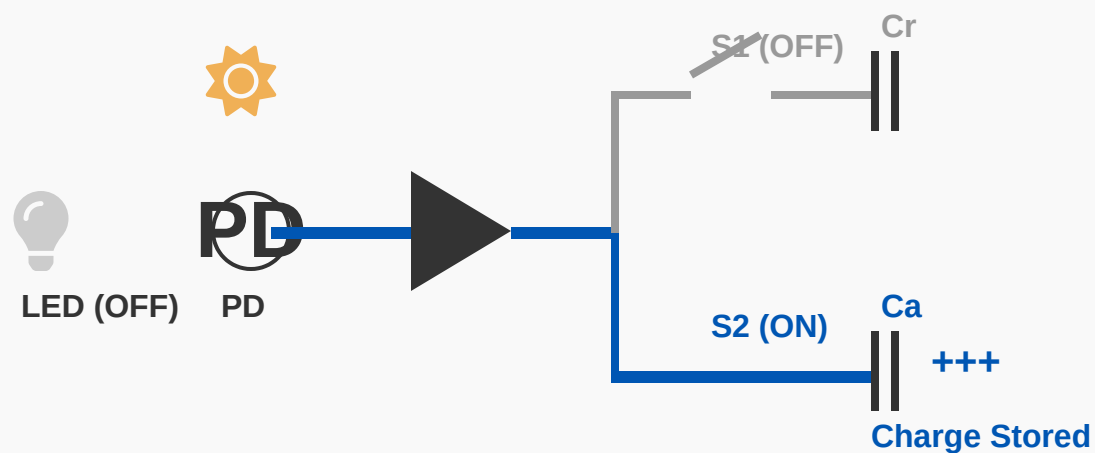
入力 = LED光 + 外光

$$Q_r = C_r \times (V_{LED} + V_{AL})$$

信号とノイズの両方が
リザーバCrに蓄積される



Phase 2: LED OFF時に信号をCaに保存



スイッチ状態

S1: 切断 (OFF)

S2: 接続 (ON)

S3: 切断 (OFF)

測定内容

LED: 消灯

入力: 外光のみ (ノイズ)

保存先: 電荷リザーバ Ca

保存される電荷

$$Q_a = C_a \times V_{AL}$$

(V_{AL} : 外光電圧)

Phase 3: CrとCaを逆極性で接続し電荷再分配

スイッチ状態

S1: OFF (切断)

S2: OFF (切断)

S3: ON (接続)

逆極性接続 (Reverse Polarity)

[+ Cr -] \leftrightarrow [- Ca +]

CrとCaが逆向きに接続され、
電荷の差分が取られる

Step 1: 電荷再分配の基本式

$$V_{\text{out}} = (Q_r - Q_a) / (C_r + C_a)$$

Step 2: 保存された電荷を代入

$$V_{\text{out}} \propto (V_{\text{LED}} + V_{\text{AL}}) - V_{\text{AL}}$$

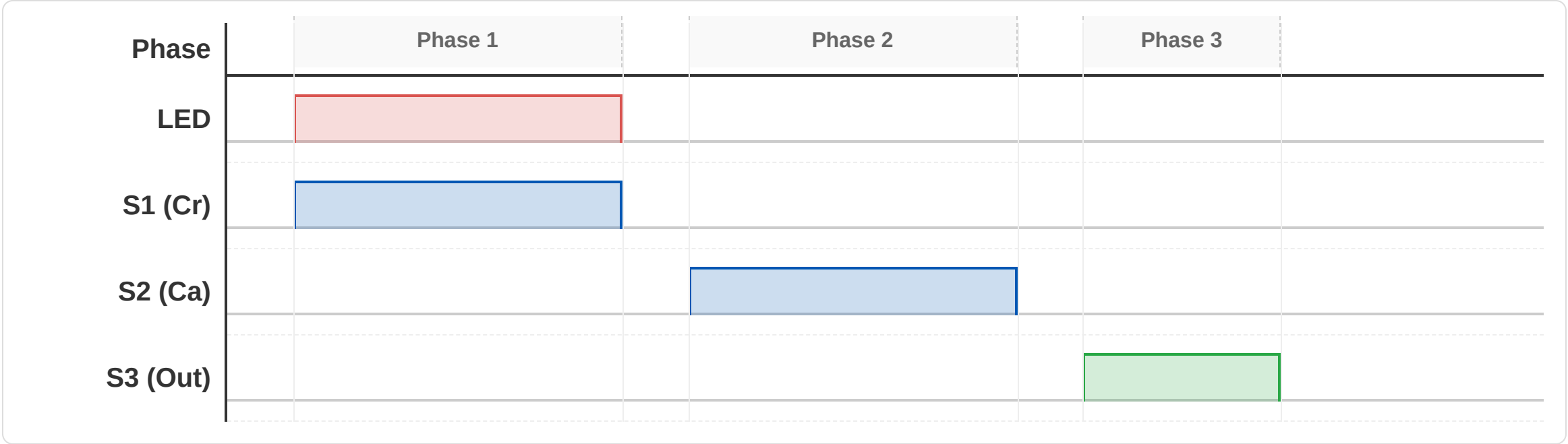
Step 3: 外光成分の相殺

$$V_{\text{out}} \propto V_{\text{LED}} + \cancel{V_{\text{AL}}} - \cancel{V_{\text{AL}}}$$

結果: $V_{\text{out}} = V_{\text{LED}} / 2$

外光ノイズが完全に除去され、
純粋なPPG信号のみが残る

完全なタイミング制御フロー



Phase 1: サンプルング (ON)

LED点灯。
S1を閉じて、信号+外光をCrに充電。
(約4ms)

Phase 2: サンプルング (OFF)

LED消灯。
S2を閉じて、外光のみをCaに充電。
(約4ms)

Phase 3: 電荷再分配・出力

S1, S2を開放。
S3を閉じてCrとCaを接続。
差分電圧を出力。

※ 全体のサイクル周波数: 約125Hz (周期8ms)

なぜ外光が除去されるのか？

Step 1 Phase 1: Crに信号とノイズを保存

$$Q_r = C_r \times (V_{LED} + V_{AL})$$

Step 2 Phase 2: Caにノイズのみを保存

$$Q_a = C_a \times V_{AL}$$

Step 3 逆極性接続による差分計算 ($C_r = C_a = C$ と仮定)

$$V_{out} = (Q_r - Q_a) / 2C$$

Step 4 展開と相殺

$$V_{out} = [C(V_{LED} + V_{AL}) - CV_{AL}] / 2C = V_{LED} / 2$$

結論: 外光成分 (V_{AL}) は両方のリザーバに等しく保存されるため、
逆極性接続により完全に相殺される

2つの外光除去方式の比較

比較項目	LED ON-OFF方式 (デジタル)	2個電荷リザーバ方式 (アナログ)
差分の場所	ADC変換後 (CPU演算)	ADC変換前 (回路動作)
ダイナミックレンジ	✕ 外光がADC範囲を消費	✓ 信号のみにADC範囲を使用
消費電力	中～高 (CPU負荷あり)	✓ 極めて低い (26.4 μW)
リアルタイム性	演算遅延あり	✓ 遅延ほぼなし (瞬時)
回路の複雑さ	✓ シンプル (ソフト処理)	中程度 (スイッチ・容量が必要)
精度要因	ADC分解能に依存	容量マッチング (Cr=Ca) に依存
実装コスト	✓ 低い (既存マイコンで可)	専用ICまたは回路設計が必要

結論: 性能重視ならアナログ方式、実装容易性重視ならデジタル方式

実装上の注意点

2個電荷リザーバ方式を成功させるための重要な技術要件

電荷リザーバのマッチング (最重要)

CrとCaの容量を事実上一致させる必要があります。許容差は $\pm 0.1\%$ 程度を目安にしてください。

スイッチのリーク電流

保存電荷の漏れは測定誤差を招きます。リークの小さいスイッチを選定してください。

タイミング精度

切替のデッドタイムを確保し、スイッチの同時ONを防止します。

温度安定性

温度係数の小さいコンデンサ（C0G/NP0 等）を選び、容量変動を抑えます。

ノイズ対策とシールド

微小電荷は外来ノイズに敏感です。グラウンドガードや金属シールドを推奨します。

※ アナログ方式は部品選定と基板設計で高い精度が求められます。

BloodFlowSignalプロジェクトでの外光除去の実装

⚠ 現状のハードウェア制約

使用予定の秋月電子モジュール (LED + PD) は、外光除去回路を内蔵していません。そのため、外部で外光除去機能を実装する必要があります。

方法1: デジタル差分

推奨・初期実装

🔌実装: Seeeduino XIAOで制御

🔧処理: LED ON/OFF時にADC計測し、ソフトウェアで減算

✅利点: 追加回路不要、実装が容易

⚡欠点: CPU負荷増、消費電力やや高

方法2: アナログ差分

高性能・将来検討

🔌実装: 外部スイッチ回路を追加

🔧処理: 電荷再分配で物理的に除去

⚡利点: 低消費電力、高ダイナミックレンジ

✂欠点: 回路設計・製作が複雑



結論: まずは「方法1 (デジタル差分)」で開発を進め、S/N比が不足する場合や省電力化が必要な段階で「方法2」を検討します。

まとめ

📌技術的要点

- ✓ アナログ領域での除去により、微弱なPPG信号を高精度に抽出可能。
- ✓ 逆極性接続を利用した電荷再分配が、外光キャンセルの核心原理。
- ✓ デジタル方式と比較して、**低消費電力かつ高ダイナミックレンジ**を実現。

🔄今後のアクションプラン

- ➡ まずはデジタル差分方式 (LED ON-OFF) を Seeeduino XIAO で実装する。
- ➡ 推奨周期 **8ms (125Hz)** でサンプリングを行い、外光ノイズの影響を評価する。
- ➡ S/N比が不十分な場合のみ、アナログ回路（2個電荷リザーバ方式）の導入を検討する。

💖段階的なアプローチで、信頼性の高い血流モニタリングシステムを構築しましょう