

平成28年度 秋期 応用情報技術者試験 午後問7「組み込みシステム：脈拍計の設計」復習レポート

1. 本問題の戦略的重要性と学習の狙い

ヘルスケア・ウェアラブルデバイスの普及に伴い、光学センサを用いた非侵襲的な生体情報計測は、組み込みエンジニアにとって極めて身近かつ重要な技術領域となりました。本問題で扱う「脈拍計」の設計は、物理世界の曖昧なアナログ信号を、いかにして信頼に足るデジタルデータへと昇華させるかという、組み込みシステム開発の核心を突いています。本問の分析を通じて習得すべき重要概念は、以下の3点に集約されます。

- **ノイズ除去（外乱光対策）**：物理的な隙間から混入する不要信号を演算で相殺する設計。
- **フィードバック制御（輝度補正）**：個体差や装着状態に応じてハードウェア出力を動的に最適化するプロセス。
- **リアルタイム処理のタイミング設計**：サンプリング周期とデューティ比に基づいた厳密な時間制御。本問題の本質は、単なる仕様のトレースではなく、設計者として*「信号の信頼性をいかに担保するか」**という思想を読み解くことにあります。次セクションでは、この信頼性を支える物理構造と機能配分の妥当性を検討します。

2. 脈拍計システムの構造分析と計測メカニズム

本システムは、高度なロジックを司る「制御部」と、物理層の操作に特化した「測定部」で構成されています。**機能配分の評価（表1に基づく考察）** 表1を確認すると、輝度補正の判断や脈拍数の算出といった「動的なアルゴリズム処理」はすべて制御部に集約されています。測定部を「コマンドに従って点滅・測定し、値を返す」という受動的な構造に留めることで、ハードウェアの低コスト化を実現しつつ、ソフトウェアの更新だけで多様な皮膚特性や計測ロジックの改善に対応できる柔軟な設計となっています。**外乱光除去 $z = x - y$ の物理的根拠** 光学式脈拍計において、計測ヘッドと手首の「隙間」から入り込む室内光や太陽光（外乱光）は、有効信号（反射光）を覆い隠す致命的なノイズとなります。本システムでは以下の論理でこの問題を解決しています。

- **点灯時の測定値 x** ：皮膚からの反射光 + 隙間からの外乱光
- **消灯時の測定値 y** ：隙間からの外乱光のみ
- **抽出される反射光 $z = x - y$** ：\$(反射光 + 外乱光) - 外乱光 = 純粋な反射光\$この「引き算」によるノイズキャンセルは、ハードウェアの遮光限界をソフトウェアの知恵で補完する、組み込み開発の定石です。**重要仕様の整理** タイミング設計の前提となる仕様を、以下に引用します。
 - ・点滅の周波数は 50Hz とし、点灯時間と消灯時間の比は 6:4 とする。
 - ・測定部は、LED を点灯した後、センサの入射光を 1 回測定（測定値 x ）し、消灯した後、センサの入射光を 1 回測定（測定値 y ）する。この仕様に基づき、次は具体的な「時間」の制御ロジックを深掘りします。

3. タイミング設計と周波数解析（設問1の深掘り）

組み込みシステムの安定稼働は、正確なタイミング設計の上に成り立ちます。50Hzという周波数は、脈拍（通常1～3Hz程度）を捉えるためのサンプリング定理を満たしつつ、消費電力と処理負荷のバランスを考慮した現実的な設定です。**計算プロセスの提示**

- **1周期の算出** 周波数50Hzより、点滅の1サイクルに要する時間は以下の通りです。
 $\$1秒 \div 50Hz = 0.02秒 = 20ミリ秒\$$
- **点灯・消灯時間の分配（比率 6:4）** この20ミリ秒を6:4の比で分割します。
- **点灯時間** : $20ミリ秒 \times 0.6 = 12ミリ秒$
- **消灯時間** : $20ミリ秒 \times 0.4 = 8ミリ秒$ この設計により、12msの点灯中に x を、8msの消灯中に y を測定する厳密なタイムスロットが確定します。この周期が揺らぐと、脈拍数算出の基盤となる時間軸が歪み、最終的な計測精度を著しく損なうこととなります。時間の最小単位が定義されたところで、システム全体の動作フローへと視点を移します。

4. 制御モードの変遷とアルゴリズムの整合性（設問2の深掘り）

図2のフローチャートは、システムが計測準備（輝度補正）から本計測へと移行する一連のシーケンスを示しています。**コマンド送信の論理的必要性**

- **空欄 a（輝度設定コマンドを送信）** : 輝度計算を行った直後に実行されます。これにより、制御部で算出した最新の補正值が即座に測定部へ反映され、次の計測サイクルでは適正な光量での測定が可能になります。
- **空欄 b（計測終了コマンドを送信）** : 計測完了時、または補正失敗時に送出されます。LEDの点滅を物理的に停止させ、バッテリー消費を最小限に抑えるための重要な「後始末」です。**所要時間の数学的証明** 1サイクル（点灯+消灯）を20ミリ秒として計算します。
- **最短所要時間（6秒）** : 輝度補正が1回目で成功（この1回分の時間は無視できる条件）し、直後に脈拍数計測を300回繰り返すケース。 $300回 \times 20ミリ秒 = 6,000ミリ秒 = 6秒$
- **最長所要時間（16秒）** : 輝度補正を上限の500回繰り返し、**その500回目で補正が成功**して脈拍数計測を300回行うケース。 $(500回 + 300回) \times 20ミリ秒 = 16,000ミリ秒 = 16秒$ ※なお、500回目でも補正に失敗した場合は10秒で終了するため、最長ケースはあくまで「補正成功」を前提とします。**So What?（組み込みエンジニアの視点）** 試験上は処理時間が無視されていますが、実務では制御部と測定部間の「シリアル通信遅延」がジッタ（Jitter）として顕在化します。コマンド a, b の送信オーバーヘッドが累積すると、特に500回の補正ループでは無視できない時間的乖離が生じ、リアルタイム性を損なうリスクがあることを意識すべきです。全体のフローを把握した上で、設計の「信頼性」を決定づける最後の仕様を検討します。

5. データ妥当性とノイズ低減の設計思想（設問3の深掘り）

本設計の優れた点は、輝度補正中の測定値を解析に用いないという「データの選別」にあります。**エンジニアリング観点からの考察** 輝度補正が必要な状態とは、反射光 z がセンサのダイナミックレンジから外れている、あるいは信号対雑音比（SNR）が極めて低い状態

を意味します。このような不安定なデータを解析対象に含めると、算出される脈拍数に大きな誤差（アーティファクト）が混入し、システム全体の信頼性を失墜させます。**試験解答の核心** 「輝度補正終了前までの z は適正範囲を外れており、脈拍数算出には不適切だから」という解答の核心は、**「不確かなデータなら、無い方がマシである」**という設計思想にあります。この仕様により、実際の製品では「装着し直した瞬間のデタラメな数値」による誤通知を防止でき、製品としての高いブランド価値（信頼性）を維持することが可能になります。

6. 総括：高信頼性組み込みシステム設計への教訓

本問題は、組み込みシステムにおける「ハードとソフトの共調設計」の理想形を提示しています。

- **物理特性の克服**：外乱光や皮膚状態といったハードウェア・物理環境の制約を、差分演算やフィードバックループといったソフトウェアの知恵でカバーする。
- **妥当性の検証**：計測データが「適正範囲」にあるかを常に監視し、信頼できない情報を遮断する機構を設ける。応用情報技術者試験の午後問題を、単なる「パズル」として解く段階は卒業しましょう。
- 「この数式はどの物理現象をキャンセルしているのか？」
- 「このタイミング設計は、通信遅延（ジッタ）に耐えられるか？」
- 「この制限仕様は、ユーザーのどのような不利益を防いでいるのか？」こうした「設計者の視点」を持って問題に接することこそが、実務で通用するエンジニアへの最短ルートです。技術的洞察を武器に、さらなる高みを目指してください。期待しています。# 平成28年度 秋期 応用情報技術者試験 午後問7「組み込みシステム：脈拍計の設計」復習レポート

1. 本問題の戦略的重要性と学習の狙い

近年のヘルスケア市場の拡大に伴い、ウェアラブル端末における生体情報計測技術は、組み込みエンジニアにとって避けては通れない領域となっています。本問題で題材とされた「脈拍計」は、光学センサを用いた信号処理の典型例であり、限られたリソース内でいかに精度の高いデータを抽出するかという、組み込み開発の真髄が凝縮されています。本問を深く分析することで、実務に不可欠な以下の3つの重要概念を習得することができます。

- **ノイズ除去（外乱光対策）**：物理環境から混入する不要な信号を、算術演算によって論理的に排除する手法。
- **フィードバック制御（輝度補正）**：個体差や環境変化に応じ、システムの動作条件を動的に最適化するプロセス。
- **リアルタイム処理のタイミング設計**：サンプリング周期とデューティ比に基づき、ハードウェアの能力を最大限に引き出す時間制御。本問題の真のテーマは、単なる仕様の理解ではなく、設計者視点での**「信号の信頼性確保」**にあります。次セクションでは、この信頼性を支えるシステムの物理的・機能的な構成要素について詳しく見ていきます。

2. 脈拍計システムの構造分析と計測メカニズム

本システムは、高度な判断を担う「制御部」と、物理的なインターフェースを担う「測定部」の明確な役割分担によって成立しています。**システム構成の評価** 表1に基づく、輝度補正や測定値の解析・算出といった「論理的判断」を伴う処理はすべて制御部に集約されています。これは、測定部のハードウェア構成をシンプルに保ちつつ、ソフトウェアのアップデートやアルゴリズムの変更によって、皮膚の状態などの個体差に柔軟に対応しようとする設計の意図が読み取れます。**反射光測定の論理的根拠** 光学式脈拍計において最大の課題は、計測ヘッドと手首の「隙間」から入り込む室内光や太陽光などの「外乱光」の排除です。本システムでは、以下の数式を用いて純粋な反射光データ z を抽出しています。 $z = x - y$

- x : LED点灯時の測定値（皮膚からの反射光 + 隙間からの外乱光）
- y : LED消灯時の測定値（隙間からの外乱光のみ）この差分をとるロジックにより、物理的な遮光の限界をソフトウェアで補完し、環境光の影響をキャンセルして脈拍に伴う微小な光量変化を浮き彫りにしています。**重要仕様の整理** システムの計測サイクルを規定する重要な仕様を以下に引用します。
 - ・点滅の周波数は 50Hz とし、点灯時間と消灯時間の比は 6:4 とする。
 - ・測定部は、LED を点灯した後、センサの入射光を 1 回測定（測定値 x ）し、消灯した後、センサの入射光を 1 回測定（測定値 y ）する。この50Hzという周期が、システム全体のタイミング設計の最小単位となります。次は、この時間の制御ロジックをより詳細に計算し、設計の具体性を高めていきましょう。

3. タイミング設計と周波数解析（設問1の深掘り）

組み込み開発において、時間の設計ミスはシステムの破綻に直結します。本問の設問1では、周波数から具体的な制御時間を導き出す、基礎かつ重要な計算プロセスが問われています。**計算工程のステップバイステップ**

- **点滅周期の算出** 周波数が50Hzであるため、1回（1周期）の点滅に要する時間は次のように求められます。 $1\text{秒} \div 50\text{回} = 0.02\text{秒} = 20\text{ミリ秒}$
- **点灯時間と消灯時間の分配** 1周期20ミリ秒を、指定された比率（6:4）で分割します。
- **点灯時間** : $20\text{ミリ秒} \times \frac{6}{10} = 12\text{ミリ秒}$
- **消灯時間** : $20\text{ミリ秒} \times \frac{4}{10} = 8\text{ミリ秒}$ この設計により、12ミリ秒の点灯時間内に確実に反射光（ x ）を測定し、続く8ミリ秒の消灯時間内に外乱光（ y ）を測定するという、厳密なタイムスロットが確保されます。**タイミング設計のインパクト** 50Hzというサンプリング周波数は、脈拍信号（通常1～3Hz程度）を捉えるための十分な時間分解能を確保しつつ、CPUの処理負荷を抑えるためのバランスのとれた設計値です。周期が長すぎれば脈拍のピークを見逃し、短すぎればデータ処理の負荷が増大します。物理現象とリソースの最適解が、この「20ミリ秒」に現れています。時間の最小単位が確定したところで、次はこれらの計測がシステム全体としてどのようにフロー制御されているかを解析します。

4. 制御モードの変遷とアルゴリズムの整合性（設問2の深掘り）

図2のフローチャートは、システムが「輝度補正モード」から「脈拍数計測モード」へと移行するフィードバックループを表現しています。**コマンド送信の必要不可欠なタイミング**

- **空欄 a（輝度設定コマンドを送信）**：反射光 z が適正範囲外であった場合、輝度を再計算した直後にこのコマンドが必要です。これにより、次のサンプリングから即座に新しい輝度が適用され、フィードバック制御が完結します。
- **空欄 b（計測終了コマンドを送信）**：規定回数の計測（または補正の失敗）が終わった際、LEDの無駄な点灯を止めて消費電力を抑えるために不可欠な「終了手続き」です。**所要時間の数学的証明** 1サイクルを20ミリ秒として計算します。
- **最短所要時間：6秒** 輝度補正が1回目で成功（この1回分の時間は無視できる）し、直後に脈拍数計測モードで300回繰り返す場合。 $300回 \times 20ミリ秒 = 6,000ミリ秒 = 6秒$
- **最長所要時間：16秒** 輝度補正を上限の500回繰り返し、その 500回目でようやく成功して、その後に脈拍数計測を300回行う場合。 $(500回 + 300回) \times 20ミリ秒 = 16,000ミリ秒 = 16秒$ ※補正に500回失敗した場合は10秒で終了するため、最長は「成功」ケースを指します。**So What?（組み込みエンジニアの視点）** 試験上は処理時間が無視されていますが、実環境では制御部と測定部を繋ぐシリアル通信等の「通信遅延」がジッタ（Jitter）として累積します。コマンド \$a\$ や \$b\$ を送信する際の通信オーバーヘッドが繰り返されることで、実時間は計算値から乖離し、サンプリング間隔の揺らぎ（ゆらぎ）となって脈拍数算出精度を低下させるリスクがあることを意識すべきです。全体のフローを把握した上で、最後にこの設計の「信頼性」を決定づける仕様について検討します。

5. データ妥当性とノイズ低減の設計思想（設問3の深掘り）

本設計において特筆すべきは、「輝度補正中の測定値 z を脈拍数解析に使用しない」という厳格な仕様です。**エンジニアリング観点からの考察** 輝度補正中の z は、装着の緩み等により、意図したダイナミックレンジに収まっていない不安定なデータです。このような「適正範囲外のデータ」を解析対象に含めると、脈拍数の算出結果に大きな誤差（アーティファクト）が生じ、最悪の場合は誤判定を招きます。**試験解答の核心解説** 公式の解答例にある「輝度補正終了前までの z は適正範囲を外れており、脈拍数算出には不適切だから」という記述は、データの**「妥当性（Validity）」**を説いています。信頼できないデータをフィルタリングして捨てる勇気は、計測システム設計における基本原則です。**製品的価値の評価** この仕様は、ユーザーへの「誤通知防止」に寄与します。不安定な初期数値をあえて表示させないことで、製品としての信頼性を維持し、ユーザーに不安を与えないという製品的価値を生んでいます。

6. 総括：高信頼性組み込みシステム設計への教訓

本問題の分析を通じて得られた、組み込みシステム設計における普遍的なベストプラクティスをまとめます。

- **ハードとソフトの共調設計**：外乱光という物理的な弱点を、差分演算というソフトウェアの知恵でカバーする組み込み開発の醍醐味。

- **フィードバックによる自律最適化**：固定値に頼らず、環境に合わせて輝度を自己調整する仕組みが、現場での堅牢な動作を支える。応用情報技術者試験の問題を単なる過去問として「解く」のではなく、「**自分ならこの仕様で製品を作れるか？**」という**シミュレーション**として活用してください。以下のマインドセットが、プロフェッショナルへの近道です。
- すべての数式には物理的な意味がある。
- すべてのタイミング設計には通信遅延のリスクがある。
- すべての制限事項には信頼性を守る意図がある。技術的な裏付けを持って論理を組み立てる力は、試験のみならず現場でも最強の武器となります。一步一步、その洞察を深めていきましょう。応援しています。