

生体システム工学 I

次の[I - 1]~[I - 3]の 3 題を、それぞれ別の解答用紙に答えよ。

[I - 1]

心電図は心臓の電氣的活動を計測して得られる信号である。心電図の計測系を図(A)のように簡略化した等価回路として考える。ここで、 e_i と e_0 は、それぞれ、生体起電力（心臓の起電力）および心電図の計測電圧である。また、 Z_m と Z_0 は、それぞれ生体インピーダンス（生体、電極と体表面の接触インピーダンスを含む）および計測器の負荷抵抗（内部抵抗、あるいは計測器の入力インピーダンス）である。

(問 1) e_0 を e_i 、 Z_m および Z_0 を用いて表せ。

(問 2) 心電図が正しく計測されるためには、 Z_m と Z_0 の大小関係はどうあるべきか述べよ。

さて、以下では、 Z_m と Z_0 を、それぞれ、図(B)および図(C)のようにモデル化する。ここで、 R_m 、 C_m および R_0 は、それぞれ、生体抵抗、生体の静電容量、および計測器の負荷抵抗である。また、図(A)のように生体起電力側からみた系全体のインピーダンスを Z 、系に流れる電流を i とする。

$$r = \left| \frac{e_0}{e_i} \right|$$

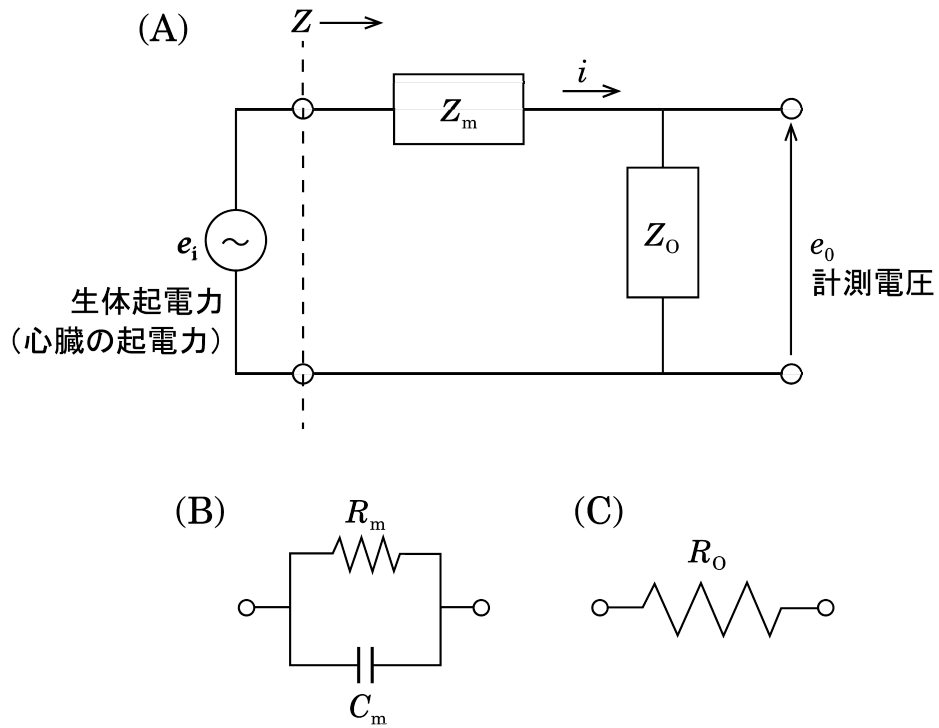
と定義すると、 $r=1$ が成り立てば、心電図が正しく計測できる。

(問 3) e_i および e_0 を、それぞれ、 i と Z 、および i と R_0 を用いて表せ。さらに、 r を Z および R_0 を用いて表せ。

(問 4) 生体起電力の角周波数を ω とし、 Z_m を R_m 、 C_m および ω を用いて表せ。さらに、 Z を R_m 、 C_m 、 R_0 および ω を用いて表せ。

(問 5) r を R_m 、 C_m 、 R_0 および ω を用いて表せ。

(問 6) 心電図にはおおよそ 0.01 rad/s から 1000 rad/s 程度の周波数成分が含まれる。 $C_m=1 \mu\text{F}$ 、 $R_m=10 \text{ k}\Omega$ とし、 $R_0=10^3 \Omega$ 、および $R_0=10^6 \Omega$ の場合に対して、 r の周波数依存性の概形を図示せよ。(各 R_0 に対して、 $\omega=0 \text{ rad/s}$ 、 $\omega=10^{-2} \text{ rad/s}$ 、 $\omega=10^2 \text{ rad/s}$ 、 $\omega=10^3 \text{ rad/s}$ 、 $\omega \rightarrow \infty$ に対する r の値を概算してみよ。)



図：心電図計測系の等価回路

[I - 2]

以下の問いに答えよ.

(問 1) 図 1 に示すように, 有限長で端点が点 A, B である直線状の導体 AB に, A から B の方向に電流 I が流れている. 導体 AB の中点 C からの距離 CP が r である点 P における磁場 (A/m) を求めよ. なお, $\angle APC = \angle BPC = \theta$ とする.

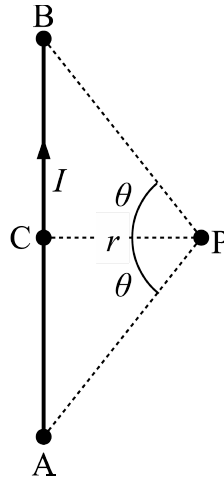


図 1

(問 2) 図 1 において, 直線状の導体 AB の長さが無限になった場合, 点 P における磁場を求めよ.

(問 3) 図 2 に示すように, 半径 r の円に内接する正三角形回路に電流 I が流れている場合, 円の中心 O における磁場を求めよ.

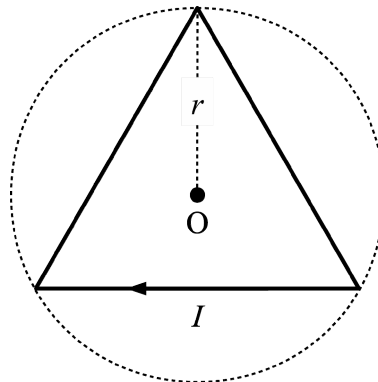


図 2

(問 4) 半径 r の円に内接する多角形が正 N 角形の場合, 円の中心 O における磁場を求めよ.

(問 5) 半径 r の円回路に電流 I が流れている場合, 円の中心 O における磁場を求めよ.

[I - 3]

ヒトの身体姿勢の安定性は、視覚、前庭（平衡）感覚および体性感覚を利用することで保たれる。これらの感覚のうち、前庭感覚は内耳の前庭感覚器によって受容される。前庭感覚器は、身体（頭部）の傾きを検出する。前庭の内部はリンパ液で満たされており、内壁に耳石器をもつ。耳石器には、前庭神経の終末器官である平衡斑があり、そこに有毛細胞が並んでおり、有毛細胞の上には耳石が乗っている。頭部の姿勢変化は耳石に作用する力（重力と頭部の運動に起因する慣性力の和）に反映される。この力によって耳石の位置が変わり、有毛細胞の感覚毛が曲がる。感覚毛にはメカノトランスダクションチャネルがあり、感覚毛の屈曲に応じて有毛細胞膜の脱分極（神経スパイク生成）が引き起こされる。頭部の前後方向の傾斜角度および角度変化に対応する耳石に作用する力と耳石の変位との伝達関数を

$$G(s) = \frac{2.0}{(s + 0.2)(s + 2.0)}$$

とする。ここで、 s はラプラス変数を表す。また、耳石の変位と神経細胞の平均発火頻度の間の伝達関数を

$$H(s) = s + 0.1$$

とする。ここでは、頭部の傾斜角度の変化（耳石に作用する力の変化）に含まれる可能性がある角周波数として、 0.01 rad/sec から 100 rad/sec までの範囲を考える。以下の問いに答えよ。

(問 1) $G(s)$ は、2 つの一次遅れ系

$$G_1(s) = \frac{1}{s + 0.2}$$

および

$$G_2(s) = \frac{1}{s + 2.0}$$

を用いて、

$$G(s) = 2G_1(s)G_2(s)$$

と表される。 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ および $G(s)$ の周波数特性（ボード線図）を一つのグラフ上に重ねて図示せよ（3 つの伝達関数の周波数特性が区別できるように工夫し、ゲイン線図と位相線図に分けて、双方を描け）。この際、周波数特性を特徴付ける数字も図中に記せ。

(問 2) $H(s)$ の周波数特性（ボード線図のゲイン線図と位相線図）を図示せよ。この際、周波数特性を特徴付ける数字も図中に記せ。

(問 3) 頭部の傾斜角度を入力とし、神経細胞の発火頻度を出力とする系の伝達関数を $F(s)$ とする。 $F(s)$ を $G(s)$ と $H(s)$ を用いて表せ。さらに、 $F(s)$ の周波数特性（ボード線図のゲイン線図と位相線図）を図示せよ。この際、周波数特性を特徴付ける数字も図中に記せ。

(問 4) $F(s)$ の周波数特性には、ゲインが直流ゲインよりも大きく、かつ位相進みを示す周波数帯域が存在する。この角周波数帯域をおおよその数値で記せ。

(次のページに続く)

- (問 5) 頭部の傾斜角度が 0.1 Hz ($0.2\pi \text{ rad/sec}$) で周期的かつ滑らかに変化しているとする。このとき、問 1 および問 3 の結果に基づいて、頭部の傾斜角度が最大となる時刻と $G(s)$ の出力が最大となる時刻の時間差を求めよ。同様に、頭部の傾斜角度が最大となる時刻と $F(s)$ の出力が最大となる時刻の時間差も求めよ。
- (問 6) 日常生活におけるヒトの頭部の姿勢変化の時間スケールを考慮に入れ、 $F(s)$ が問 3 で示したような周波数特性をもつ感覚情報処理における機能的意義を解釈し、それを簡潔に記せ。