

アナログ電子回路

授業開始までしばらくお待ちください。

- 講義資料（スライド等）は Google drive に置く。授業前には虫喰い状態のスライドのみを提供するが、授業後に穴埋め版を uncovered フォルダに置くので復習に活用されたい。
<https://drive.google.com/drive/folders/1yzIsRZsVGFerhnfnzn8Hycsn6nRPNCczn>
- 授業の録画も同じところに置く。
- ミニレポートは **Google Forms** (<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>) に提出。



- 出席は UNIPA で取るが、出席そのものは評価せず。極論するとテストのみ出席で他は全欠席でも A 評価はあり得る。なお、**不正出席をした場合は 21 点の減点**とする。
- 基本的には**中間演習**と**期末試験**で評価。
- 毎回ミニレポートを課す。出す者は提出期間を厳守すること。
- 試験の不合格者は**毎回のミニレポート**と**出席**で少し救済する。
(しっかりした内容のミニレポートを概ね 9 割以上提出し、かつ UNIPA で 8 割以上遅刻せず出席していた場合最大 10 点程度の救済。提出数や出席数が少ない場合は救済幅が縮小する。いずれかが 7 割を下回ったら一切救済しない。締め切り後の提出は認めない。)
- スライド穴埋め版はその回の授業終了後に公開。
- **授業中に**スライドの誤りを見つけて指摘してくれた者には、誤り一箇所につき先着一名様限り 100 点満点 1 点相当の加点を行う。(ただしごく軽微なものなど、内容によっては加点しない場合もあり。)

2025

S 科アナログ電子回路

Analog Electronics

『負帰還増幅の安定性』

小林裕之

大阪工業大学 RD 学部システムデザイン工学科



OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

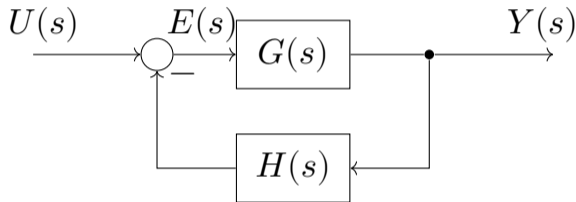
13 of 14

a L^AT_EX + Beamer slideshow

基本的には良いことづくめなのだが、 **A には何**
の問題もないのに、 $\frac{A}{1+AH}$ **が** **になる場**
合がある。

基本的には良いことづくめなのだが、 **A には何の問題もないのに、 $\frac{A}{1+AH}$ が不安定になる場合がある。**

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※ 急に A が G になっていてすみません。

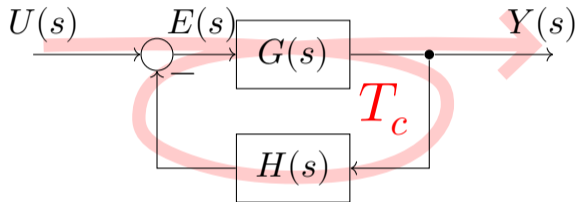
$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

$$T_c(s) =$$

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) =$$

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※急にAがGになっていてすみません。

$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

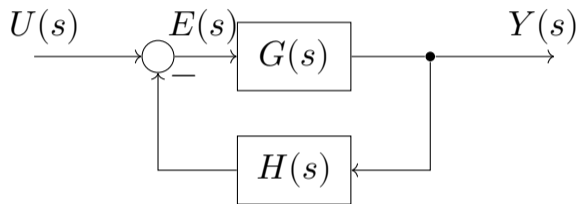
$$T_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

閉ループ伝達関数

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) =$$

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※急にAがGになっていてすみません。

$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

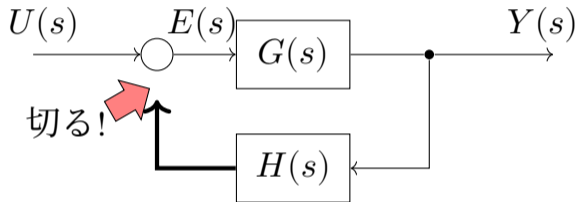
$$T_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

閉ループ伝達関数

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) =$$

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※急にAがGになっていてすみません。

$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

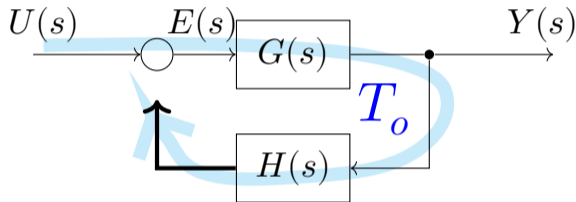
$$T_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

閉ループ伝達関数

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) =$$

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※急にAがGになっていてすみません。

$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

$$T_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

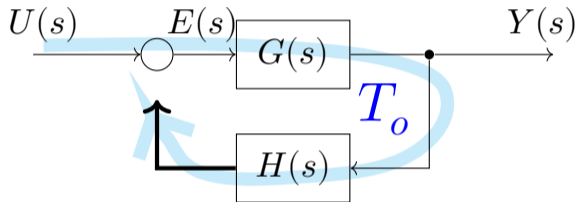
閉ループ伝達関数

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) = G(s)H(s)$$

開ループ伝達関数 または
一巡伝達関数

フィードバック系の二つの伝達関数 (制御工学Iの復習)



※急にAがGになっていてすみません。

$U(s) \rightarrow Y(s)$ 全体の T.F.

$$T_c(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

閉ループ伝達関数

ループを切って $U(s) \rightarrow$ 加算点直前の T.F.

$$T_o(s) = G(s)H(s)$$

開ループ伝達関数 または
一巡伝達関数

開ループ特性 $T_o(s)$ に注目して安定性を考える。

素朴な考察 (* G とか H とかぜんぶ複素数で考える。)

- ① T_o の分母について、 $1 + GH = 0$ だと 0 による除算、つまり発散。
- ② ということは $GH = T_o = -1$ 。つまり、 $|T_o| =$ **かつ**
 $\angle T_o =$ **だと明らかにまずい (不安定)。**

が安

定性の鍵か？

素朴な考察 (* G とか H とかぜんぶ複素数で考える。)

- ① T_o の分母について、 $1 + GH = 0$ だと 0 による除算、つまり発散。
- ② ということは $GH = T_o = -1$ 。つまり、 $|T_o| = 1$ **かつ**
 $\angle T_o =$ **だと明らかにまずい (不安定)。**

が安

定性の鍵か？

素朴な考察 (* G とか H とかぜんぶ複素数で考える。)

- ① T_o の分母について、 $1 + GH = 0$ だと 0 による除算、つまり発散。
- ② ということは $GH = T_o = -1$ 。つまり、 **$|T_o| = 1$ かつ $\angle T_o = -180^\circ$ だと明らかにまずい (不安定)。**

が安

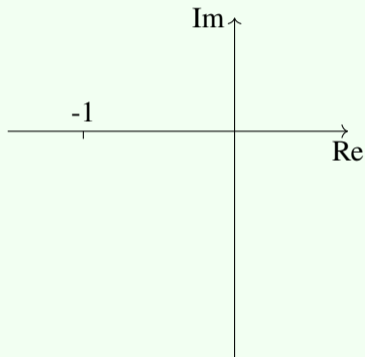
定性の鍵か？

素朴な考察 (* G とか H とかぜんぶ複素数で考える。)

- ① T_o の分母について、 $1 + GH = 0$ だと 0 による除算、つまり発散。
- ② ということは $GH = T_o = -1$ 。つまり、 **$|T_o| = 1$ かつ $\angle T_o = -180^\circ$ だと明らかにまずい (不安定)。**

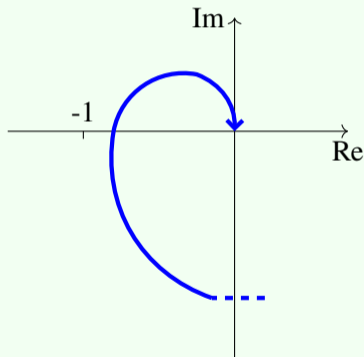
ゲイン = 1 もしくは位相のずれ = -180° が安定性の鍵か？

Nyquist の安定判別 ($T_o(s)$ 自体は安定な場合)



$T_o(s)$ の $\omega : 0 \rightarrow +\infty$ のベクトル軌跡が $-1 + j0$ の

Nyquist の安定判別 ($T_o(s)$ 自体は安定な場合)

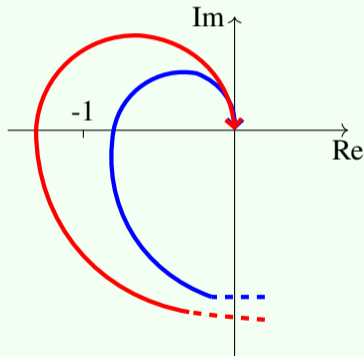


$T_o(s)$ の $\omega : 0 \rightarrow +\infty$ のベクトル軌跡が $-1 + j0$ の

- 右側を通れば安定、

○

Nyquist の安定判別 ($T_o(s)$ 自体は安定な場合)



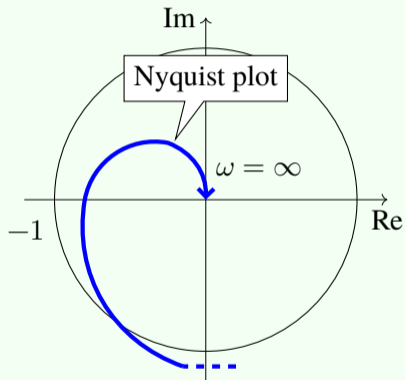
$T_o(s)$ の $\omega : 0 \rightarrow +\infty$ のベクトル軌跡が $-1 + j0$ の

- 右側を通れば安定、
- 左側を通れば不安定。

Nyquist

ハリー・ナイキスト (英語: Harry Nyquist, スウェーデン語: Harry Theodor Nyqvist, 1889年2月7日 - 1976年4月4日) はスウェーデン生まれの物理学者で自動制御理論および情報理論の発展に貢献した。スウェーデンでの名はハリー・テオドール・ニュークヴィスト。(出典: <http://ja.wikipedia.org/wiki/ハリー・ナイキスト>)

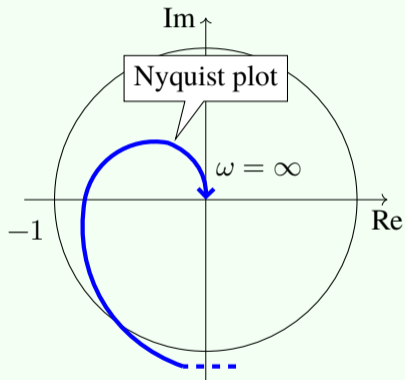
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか？

,

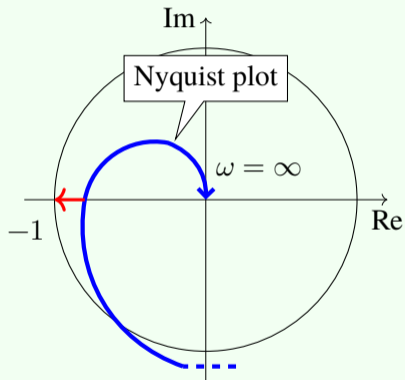
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

,

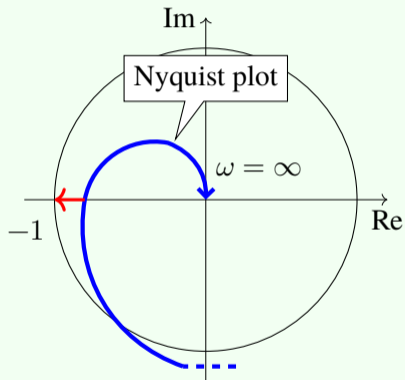
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

,

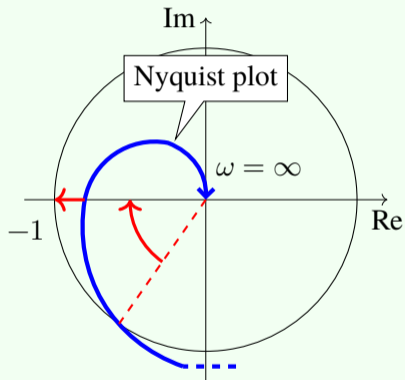
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

ゲイン余裕,

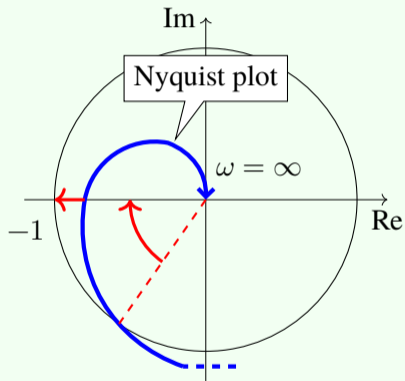
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

ゲイン余裕,

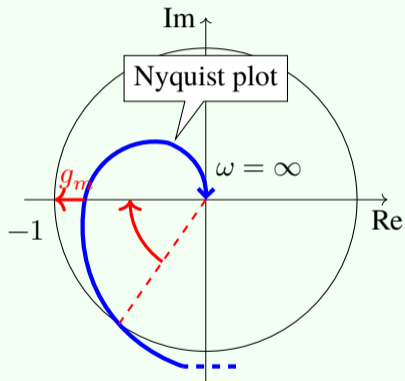
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

ゲイン余裕, 位相余裕

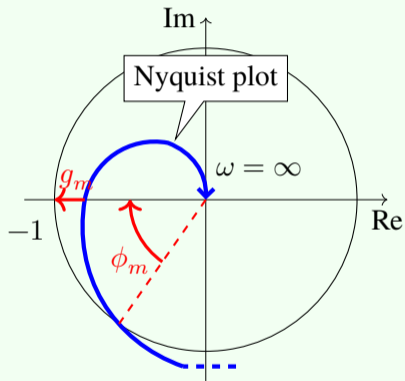
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

g_m : **ゲイン余裕,** **位相余裕**

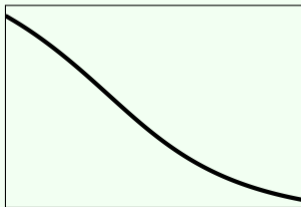
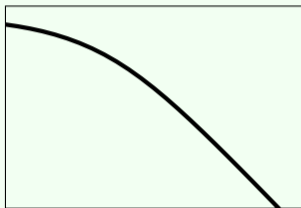
ゲイン余裕と位相余裕



- ① $-1 + j0$ を右にとおるか、左にとおるかが重要なら、
- ② 実軸を横切るとき、ゲインが 0 dB より小さければ小さいほど安定度が高く、
- ③ 原点からの距離が 1 になるときに、位相が -180° より大きければ大きいほど安定度が高い…と言えるか? → **言える**

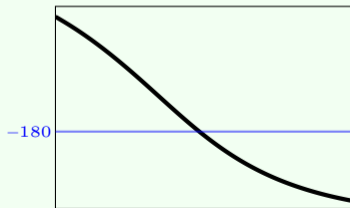
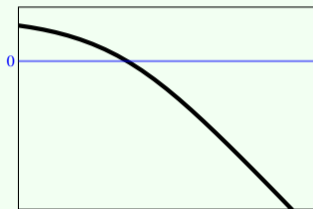
g_m : **ゲイン余裕**, ϕ_m : **位相余裕**

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



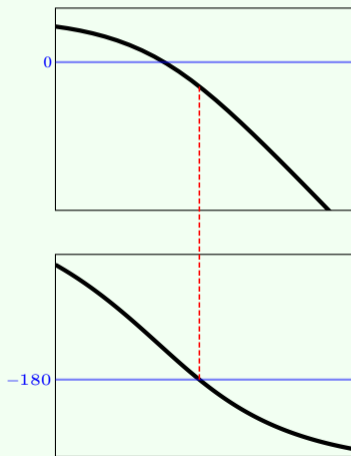
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。 **まであとどれだけか**
→
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 **まであとどれだ
けか** →
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



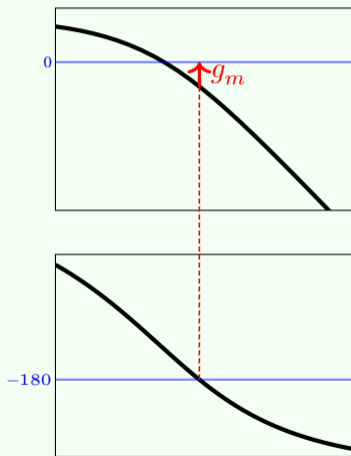
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。 **まであとどれだけか**
→
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 **まであとどれだ
けか** →
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。**0 dB まであとどれだけか**
→
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。**まであとどれだ
だけか** →
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

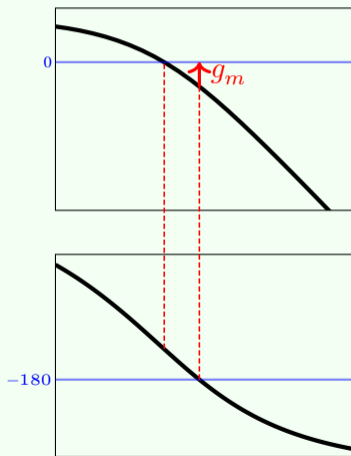
$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 **まであとどれだ
だけか** →
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

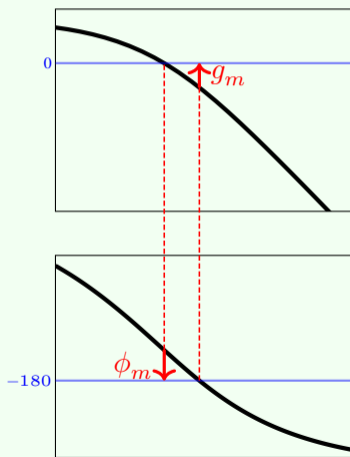
ボード線図を用いた安定余裕の評価

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



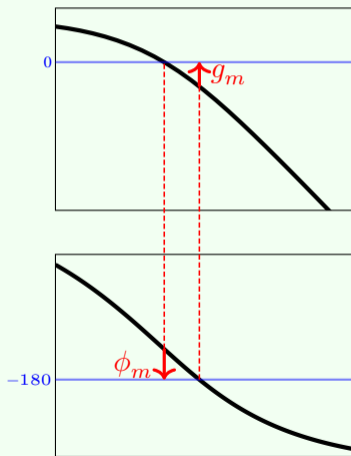
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
けか →
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



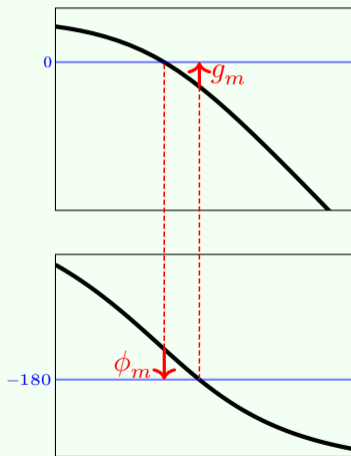
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
けか → **位相余裕** (ϕ_m)
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも なら が
安定、 なら が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



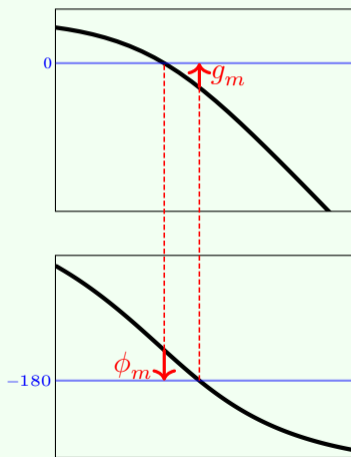
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
けか → **位相余裕** (ϕ_m)
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも 正 なら _____ が
安定、負 なら _____ が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



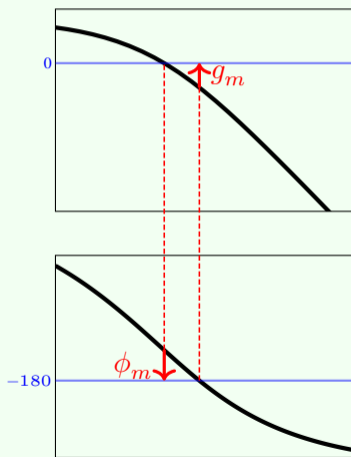
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
だけか → **位相余裕** (ϕ_m)
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも 正 なら $T_c(s)$ が
安定、 なら が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



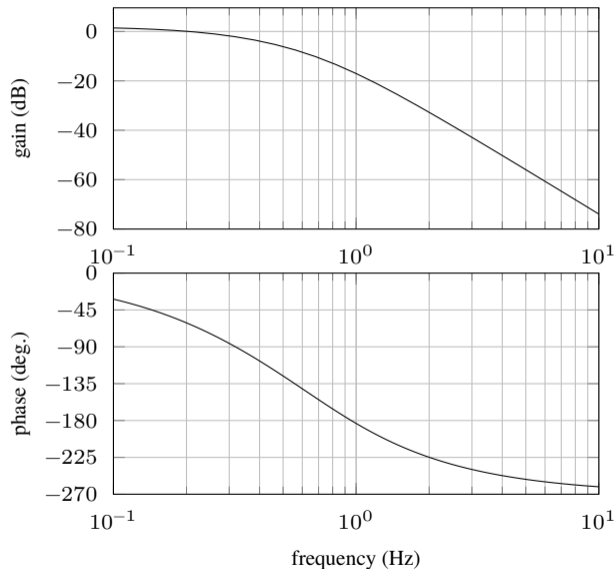
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
だけか → **位相余裕** (ϕ_m)
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも 正 なら $T_c(s)$ が
安定、負 なら _____ が不安定。

$T_o(s)$ のボード線図 とゲイン余裕・位相余裕



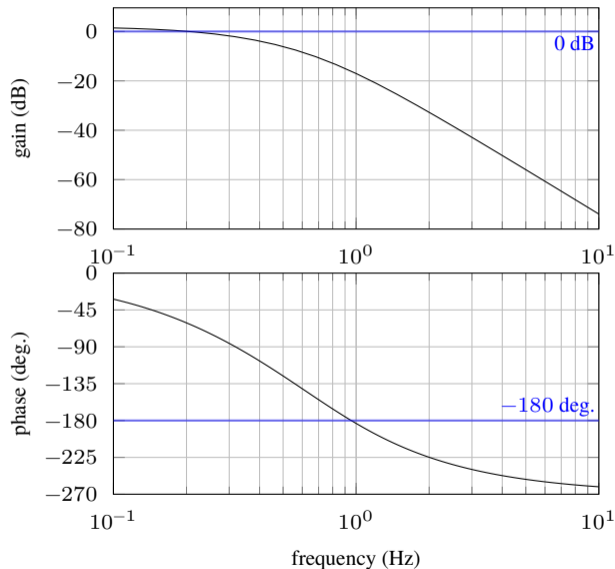
- ① 位相が -180° のとき、0 dB を超えてしま
っては不安定。0 dB まであとどれだけか
→ **ゲイン余裕** (g_m)
- ② ゲインが 0 dB のとき、 -180° を下回って
しまっては不安定。 -180° まであとどれだ
けか → **位相余裕** (ϕ_m)
- ③ ゲイン余裕・位相余裕とも 正 なら $T_c(s)$ が
安定、負 なら $T_c(s)$ が不安定。

安定余裕評価練習問題



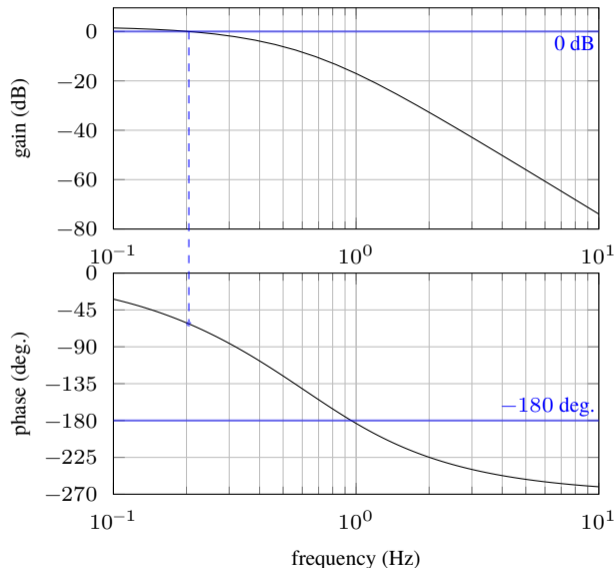
問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

安定余裕評価練習問題



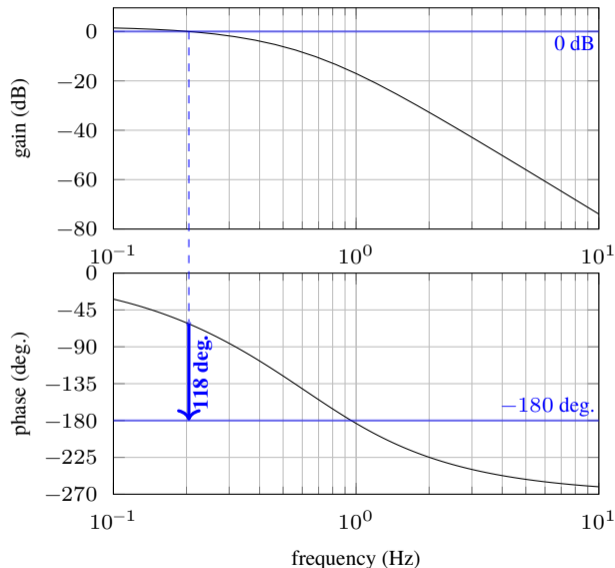
問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

安定余裕評価練習問題



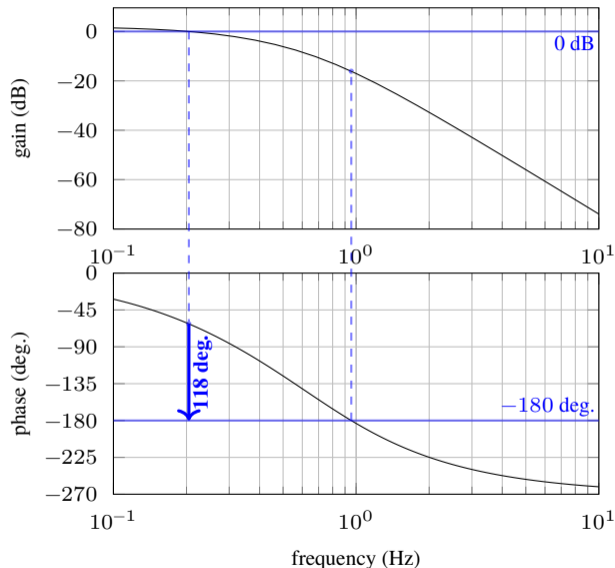
問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

安定余裕評価練習問題



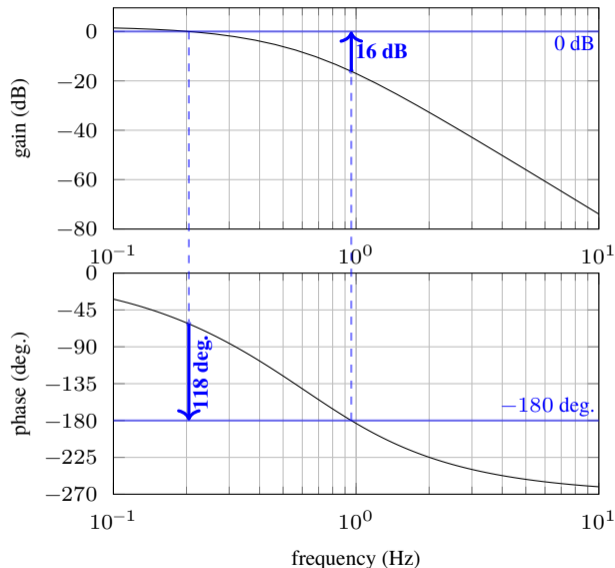
問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

安定余裕評価練習問題



問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

安定余裕評価練習問題

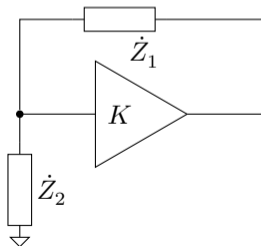


問: これは某回路の開
ループ伝達特性であ
る。ゲイン余裕と位相
余裕を求めよ。

不安定を狙って作る! ~発振回路~

- 負帰還でゲイン余裕、位相余裕が負になると不安定。
- わざと不安定にして持続振動するようにする。→**発振**
- 負帰還回路の開ループ複素電圧利得が $-1 + 0j$ になることが発振の条件^a。

^a実際は下の例のように発振回路は正帰還で構成されるので、 $1 + 0j$ で計算する方が自然。

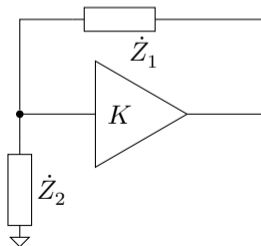


左は単純な発振回路の概念図。開ループ (正帰還) の複素電圧利得は $A_o(\omega) =$ な
ので、 $A_o(\omega) = 1 + 0j$ を解けば発振周波数を求められる。

不安定を狙って作る! ~発振回路~

- 負帰還でゲイン余裕、位相余裕が負になると不安定。
- わざと不安定にして持続振動するようにする。→**発振**
- 負帰還回路の開ループ複素電圧利得が $-1 + 0j$ になることが発振の条件^a。

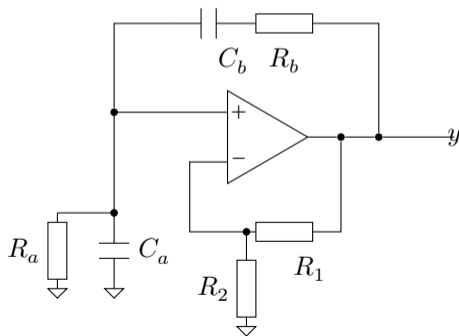
^a実際は下の例のように発振回路は正帰還で構成されるので、 $1 + 0j$ で計算する方が自然。



左は単純な発振回路の概念図。開ループ(正帰還)の複素電圧利得は $\dot{A}_o(\omega) = \frac{K\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$ なので、 $\dot{A}_o(\omega) = 1 + 0j$ を解けば発振周波数を求められる。

発振回路の例: Wien bridge oscillator

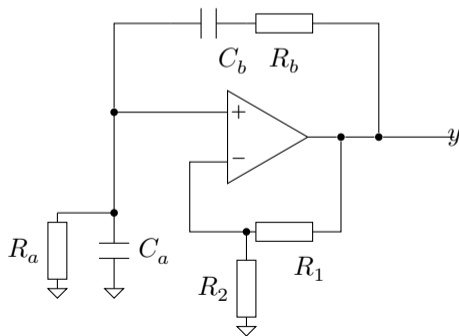
- アンプと R と C から作られた発振回路。
- 『OP アンプと R_1, R_2 からなる内側のループ』が前ページの K 、
- R_a, R_b, C_a, C_b が前ページの Z_a, Z_b である、と考えると簡単。



問. 開ループ複素電圧利得が $1 + 0j$ であることが発振条件として、発振周波数を求めよ。他に発振のための条件があればそれも示せ。ただし簡単のため $R_a = R_b = R$, $C_a = C_b = C$ とする。

発振回路の例: Wien bridge oscillator

- アンプと R と C から作られた発振回路。
- 『OP アンプと R_1, R_2 からなる内側のループ』が前ページの K 、
- R_a, R_b, C_a, C_b が前ページの Z_a, Z_b である、と考えると簡単。

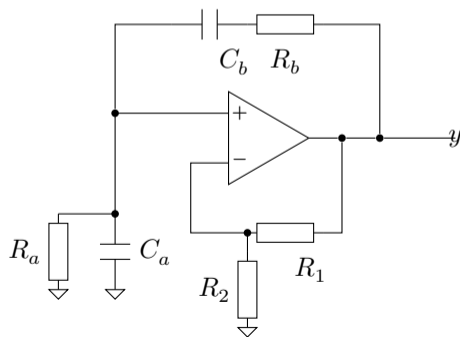


問. 開ループ複素電圧利得が $1 + 0j$ であることが発振条件として、発振周波数を求めよ。他に発振のための条件があればそれも示せ。ただし簡単のため $R_a = R_b = R$, $C_a = C_b = C$ とする。

答: $\omega = \frac{1}{CR}$,

発振回路の例: Wien bridge oscillator

- アンプと R と C から作られた発振回路。
- 『OP アンプと R_1, R_2 からなる内側のループ』が前ページの K 、
- R_a, R_b, C_a, C_b が前ページの Z_a, Z_b である、と考えると簡単。

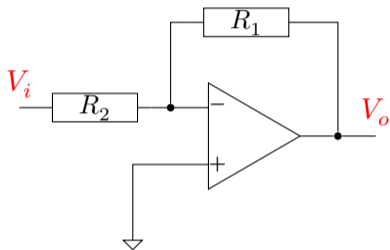


問. 開ループ複素電圧利得が $1 + 0j$ であることが発振条件として、発振周波数を求めよ。他に発振のための条件があればそれも示せ。ただし簡単のため $R_a = R_b = R$, $C_a = C_b = C$ とする。

答: $\omega = \frac{1}{CR}, 1 + \frac{R_1}{R_2} = 3$

ミニレポート課題 (受付期間: 授業当日~次回授業の前日)

受付期間外には提出しないこと。(自動処理しています。)



- ① 中間テスト後の内容で、自分が一番理解が足りていないと思ったところを具体的に述べよ。
- ② 図は反転増幅器で、OP アンプの増幅率を ∞ としたナレータ・ノレータモデルで計算すると #1 のスライドでやったとおり、電圧利得は $V_o/V_i = -\frac{R_1}{R_2}$ である。OP アンプの増幅率を g とした負帰還増幅と考えたときの電圧利得を求めよ。(前回の内容に即した課題です。)

提出は下記 URL の Google Forms。歪んでいない、開いた時に横倒しになっていない、コントラストが読みに耐えうる **PDF で提出** すること。**手書きを写真撮影する場合はスキャナもしくはスキャナアプリの使用を必須とする。**

<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>



授業アンケート