memo

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。

授業の受講に関して

- 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/1yzIsRZsVGFErhnfzn8Hycsn6nRPNCczn
- 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。

授業の進め方

- 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』

小林裕之

大阪工業大学 RD 学部システムデザイン工学科

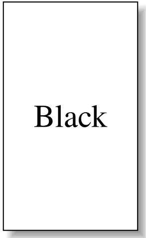
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

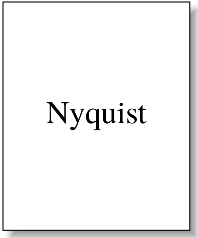
12 of 14

a LaTeX + Beamer slideshow

負帰還増幅の誕生

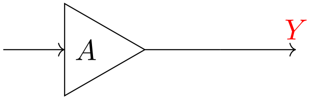
- 20 世紀初頭、電話信号の中継機の連鎖で歪がひどくなる問題があった。
- Western Electric Company の **Harold S. Black**(1898–1983) が負帰還増幅器を発明！(US Pat. 2,102,671 (filed 1921, issued 1927))
- Bell Labs. の **Harry Nyquist**(1889-1976) や **Hendrik Wade Bode**(1905-1982) らが理論を発展させる。





`img src=`Bode の写真は Wikimedia Commons より

負帰還増幅とは

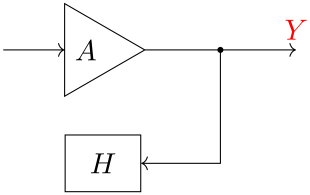


$$G = \frac{Y}{U}$$

- 入力 u から出力 y へ向かう前向きの要素 A と
- 出力から入力へ戻る向きの要素 H によるループ。
- フィードバックのパスは ________ になっている。

※ U, Y が大文字なのは周波数特性まで含めて**伝達関数**で考えてます、の意。(→ 制御工学 I)

負帰還増幅とは

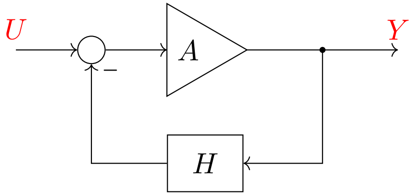


$$G = \frac{Y}{U}$$

- 入力 u から出力 y へ向かう前向きの要素 A と
- 出力から入力へ戻る向きの要素 H によるループ。
- フィードバックのパスは ________ になっている。

※ U, Y が大文字なのは周波数特性まで含めて**伝達関数**で考えてます、の意。($\rightarrow$ 制御工学 I)

負帰還増幅とは

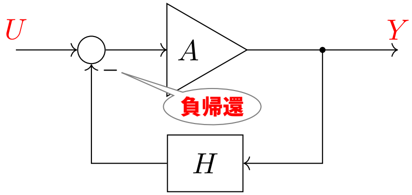


$$G = \frac{Y}{U}$$

- 入力 u から出力 y へ向かう前向きの要素 A と
- 出力から入力へ戻る向きの要素 H によるループ。
- フィードバックのパスは ________ になっている。

※ U, Y が大文字なのは周波数特性まで含めて**伝達関数**で考えてます、の意。(→ 制御工学 I)

負帰還増幅とは

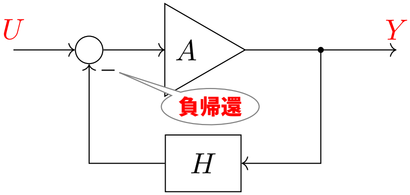


$$G = \frac{Y}{U}$$

- 入力 u から出力 y へ向かう前向きの要素 A と
- 出力から入力へ戻る向きの要素 H によるループ。
- フィードバックのパスは **負帰還** になっている。

※ U, Y が大文字なのは周波数特性まで含めて**伝達関数**で考えてます、の意。(→ 制御工学 I)

負帰還増幅とは



$$G = \frac{Y}{U} = \frac{A}{1 + AH}$$

- 入力 u から出力 y へ向かう前向きの要素 A と
- 出力から入力へ戻る向きの要素 H によるループ。
- フィードバックのパスは **負帰還** になっている。

※ U, Y が大文字なのは周波数特性まで含めて**伝達関数**で考えてます、の意。(→ 制御工学 I)

実は……。

制御工学 I で勉強したことがそのまま使える！

- 電圧　　　　　を伝達要素と考え、
- 伝達関数の代わりに　　　　　　　　　　　を使い、
- ラプラス変換した信号の代わりに　　　　　を使う。
- そして、s と同様に　　を扱う。

実は……。

制御工学 I で勉強したことがそのまま使える！

- 電圧**アンプ**を伝達要素と考え、
- 伝達関数の代わりに　　　　を使い、
- ラプラス変換した信号の代わりに　　　　を使う。
- そして、s と同様に　　を扱う。

実は……。

制御工学 I で勉強したことがそのまま使える！

- 電圧 **アンプ** を伝達要素と考え、
- 伝達関数 の代わりに **複素数で表した利得** を使い、
- ラプラス変換した信号 の代わりに を使う。
- そして、s と同様に を扱う。

実は……。

制御工学 I で勉強したことがそのまま使える！

- 電圧 **アンプ** を伝達要素と考え、
- 伝達関数 の代わりに **複素数で表した利得** を使い、
- ラプラス変換した信号 の代わりに **複素電圧** を使う。
- そして、s と同様に を扱う。

実は……。

制御工学 I で勉強したことがそのまま使える！

- 電圧 **アンプ** を伝達要素と考え、
- 伝達関数 の代わりに **複素数で表した利得** を使い、
- ラプラス変換した信号 の代わりに **複素電圧** を使う。
- そして、s と同様に $j\omega$ を扱う。

負帰還増幅回路の考え方

制御工学Ｉでさんざんやっていることなので詳細は省略

フィードバックが良いことずくめなのはよく知っている。

1. **増幅器としての素性が良くなる。**
   - トランジスタの個体差の影響が減る。
   - 温度など周辺環境の変化への依存性が減る。
2. **外乱に強くなる。**
3. **帯域幅拡大**（え？そうなの？）

負帰還増幅回路の考え方

制御工学 I でさんざんやっていることなので詳細は省略

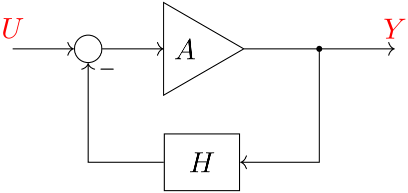
フィードバックが良いことずくめなのはよく知っている。

1. **増幅器としての素性が良くなる。**
   - トランジスタの個体差の影響が減る。
   - 温度など周辺環境の変化への依存性が減る。
2. **外乱に強くなる。**
3. **帯域幅拡大**（え？そうなの？）

で、どうやって<u>作る</u>のか？

負帰還のメリット 1: アンプの個体差の影響低減

OP アンプの増幅回路も結局そういうことです。



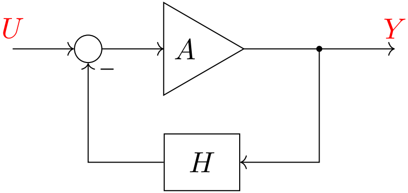
$$G = \frac{A}{1 + AH}$$

1. A ならば、
2. G なので、
3. ____________ ができる！

※ H は通常減衰部なので、抵抗器などのみで単純に、個体差なく作れます。

負帰還のメリット 1: アンプの個体差の影響低減

OP アンプの増幅回路も結局そういうことです。



$$G = \frac{A}{1 + AH}$$

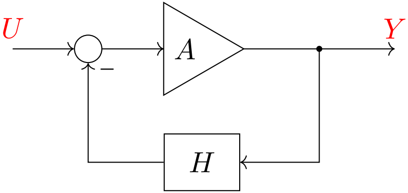
1. $A \to$ 大ならば、
2. G 　　　なので、
3. ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿ができる！

※ H は通常減衰部なので、抵抗器などのみで単純に、個体差なく作れます。

負帰還のメリット 1: アンプの個体差の影響低減

OP アンプの増幅回路も結局そういうことです。

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



$$G = \frac{A}{1 + AH}$$

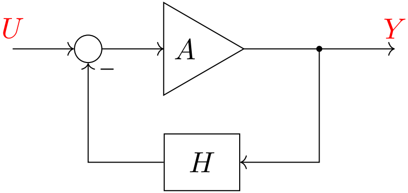
1. $A \to$ 大ならば、
2. $G \to \dfrac{1}{H}$ なので、
3. ________________ ができる！

※ H は通常減衰部なので、抵抗器などのみで単純に、個体差なく作れます。

負帰還のメリット 1: アンプの個体差の影響低減

OP アンプの増幅回路も結局そういうことです。

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



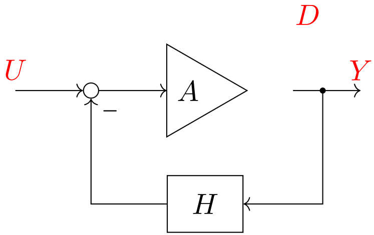
$$G = \frac{A}{1 + AH}$$

1. $A \rightarrow$ 大ならば、
2. $G \rightarrow \dfrac{1}{H}$ なので、
3. <u>A **に依らない増幅**</u> ができる！

※ H は通常減衰部なので、抵抗器などのみで単純に、個体差なく作れます。

負帰還のメリット 2: 外乱低減

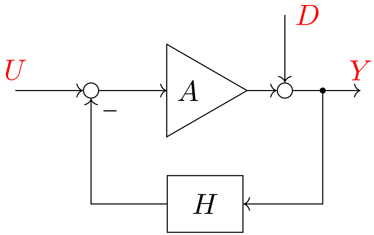
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



$$G_{YD} =$$

1. A ならば、
2. G_{YD} なので、
3. ______________ なる！

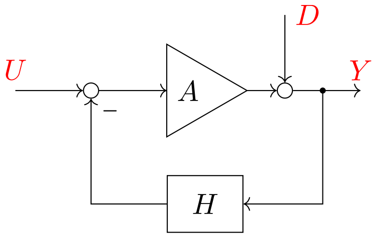
負帰還のメリット 2: 外乱低減



$$G_{YD} =$$

1. A ならば、
2. G_{YD} なので、
3. ________________ なる！

負帰還のメリット 2: 外乱低減

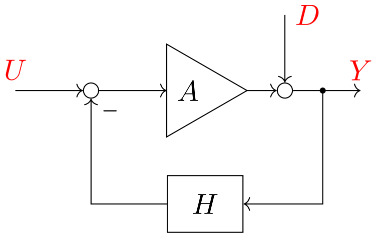


$$G_{YD} = \frac{1}{1 + AH}$$

1. A 　　　ならば、
2. G_{YD} 　　　なので、
3. ______________ なる！

負帰還のメリット 2: 外乱低減

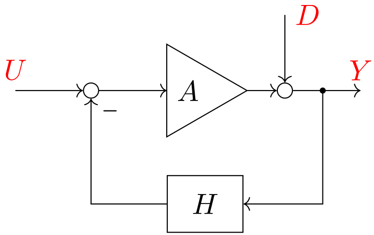
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



$$G_{YD} = \frac{1}{1 + AH}$$

1. $A \to$ 大ならば、
2. G_{YD} なので、
3. ________________ なる！

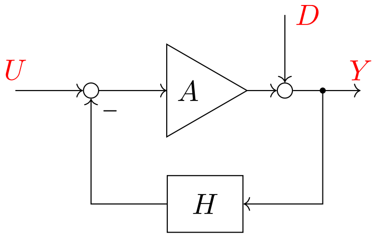
負帰還のメリット 2: 外乱低減



$$G_{YD} = \frac{1}{1 + AH}$$

1. $A \to$ 大ならば、
2. $G_{YD} \to 0$なので、
3. ________________ なる！

負帰還のメリット 2: 外乱低減



$$G_{YD} = \frac{1}{1+AH}$$

1. $A \to$ 大ならば、
2. $G_{YD} \to 0$なので、
3. 外乱の影響がなく なる！

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

$$\frac{A}{1+AH} =$$

$$=$$

$$=$$

HPF の標準形

$$A =$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

$$\frac{A}{1+AH} =$$

$$=$$

$$=$$

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{K \cdot \frac{j\omega T}{j\omega T+1}}{1 + K \cdot \frac{j\omega T H}{j\omega T+1}}$$

$$=$$

$$=$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{K \cdot \frac{j\omega T}{j\omega T+1}}{1 + K \cdot \frac{j\omega TH}{j\omega T+1}}$$

$$= \frac{j\omega TK}{1 + j\omega T(1+KH)}$$

$$=$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{K \cdot \frac{j\omega T}{j\omega T+1}}{1+K \cdot \frac{j\omega TH}{j\omega T+1}}$$

$$= \frac{j\omega TK}{1+j\omega T(1+KH)}$$

$$= \frac{K}{1+KH} \cdot \frac{j\omega T(1+KH)}{1+j\omega T(1+KH)}$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{K \cdot \frac{j\omega T}{j\omega T+1}}{1 + K \cdot \frac{j\omega T H}{j\omega T+1}} = \frac{j\omega T K}{1 + j\omega T(1+KH)} = \frac{K}{1+KH} \cdot \frac{j\omega T(1+KH)}{1+j\omega T(1+KH)}$$

全体のゲイン: $\frac{1}{1+KH}$ 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (1 of 2)

A が HPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

HPF の標準形

$$A = K\frac{j\omega T}{j\omega T + 1}$$

$$\begin{aligned}\frac{A}{1+AH} &= \frac{K\cdot\frac{j\omega T}{j\omega T+1}}{1+K\cdot\frac{j\omega TH}{j\omega T+1}} \\ &= \frac{j\omega TK}{1+j\omega T(1+KH)} \\ &= \frac{K}{1+KH}\cdot\frac{j\omega T(1+KH)}{1+j\omega T(1+KH)}\end{aligned}$$

全体のゲイン: $\dfrac{1}{1+KH}$ 倍, カットオフ: $\dfrac{1}{1+KH}$ 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

$$\frac{A}{1+AH} =$$

$$=$$

$$=$$

LPF の標準形

$$A =$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

$$\frac{A}{1+AH} =$$

$$=$$

$$=$$

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{\frac{K}{j\omega T+1}}{1+\frac{KH}{j\omega T+1}}$$

$$=$$

$$=$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{\frac{K}{j\omega T+1}}{1+\frac{KH}{j\omega T+1}}$$

$$= \frac{K}{1+KH+j\omega T}$$

$$=$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

A が LPF 特性を持っている場合

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{\frac{K}{j\omega T+1}}{1+\frac{KH}{j\omega T+1}} = \frac{K}{1+KH+j\omega T} = \frac{K}{1+KH}\cdot\frac{1}{j\omega\frac{T}{1+KH}+1}$$

全体のゲイン: 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{\frac{K}{j\omega T+1}}{1+\frac{KH}{j\omega T+1}} = \frac{K}{1+KH+j\omega T} = \frac{K}{1+KH}\cdot\frac{1}{j\omega\frac{T}{1+KH}+1}$$

全体のゲイン: $\dfrac{1}{1+KH}$ 倍, カットオフ: 倍

負帰還のメリット 3: 帯域拡大 (2 of 2)

A が LPF 特性を持っている場合

LPF の標準形

$$A = K\frac{1}{j\omega T + 1}$$

$$\frac{A}{1+AH} = \frac{\frac{K}{j\omega T+1}}{1+\frac{KH}{j\omega T+1}} = \frac{K}{1+KH+j\omega T} = \frac{K}{1+KH}\cdot\frac{1}{j\omega\frac{T}{1+KH}+1}$$

全体のゲイン: $\dfrac{1}{1+KH}$ **倍, カットオフ:** $1+KH$ **倍**

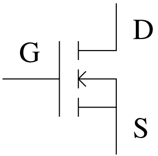
「回路」としての作り方

「回路」としての作り方

→ 実は既に作成済み！

ソース負帰還増幅回路

これがフィードバックなのか !?



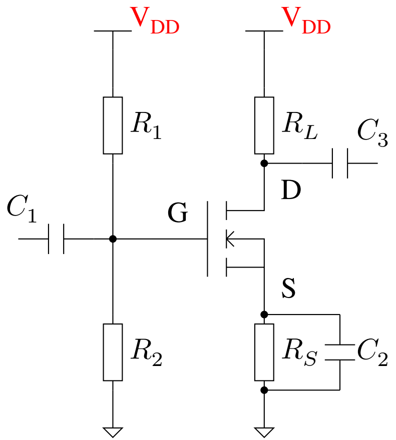
略説 (以下では $A \triangleq g_m R_L$ としている。):

1. C_2 があるとき $A_v =$ $\qquad\qquad = -A$。
2. C_2 がないとき $A'_v =$ $\qquad\qquad$。ここで $H \triangleq \frac{R_S}{R_L}$。
3. これは負帰還の式そのもの。
4. ちなみに R_S は大信号でもフィードバックに効く。
5. この場合、大信号でバイアスが安定させられれば g_m も安定するので小信号は負帰還にしなくてもいい、という方針もアリ。
6. その場合 C_2 を入れる。

ソース負帰還増幅回路

これがフィードバックなのか !?

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

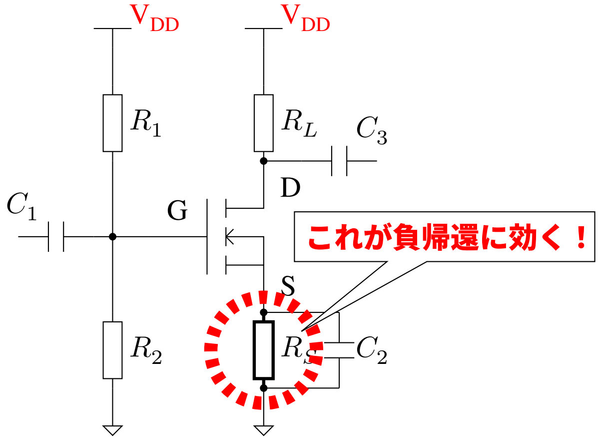


略説 (以下では $A \triangleq g_m R_L$ としている。):

1. C_2 があるとき $A_v =$ $= -A$。
2. C_2 がないとき $A_v' =$ 。ここで $H \triangleq \frac{R_S}{R_L}$。
3. これは負帰還の式そのもの。
4. ちなみに R_S は大信号でもフィードバックに効く。
5. この場合、大信号でバイアスが安定させられれば g_m も安定するので小信号は負帰還にしなくてもいい、という方針もアリ。
6. その場合 C_2 を入れる。

ソース負帰還増幅回路

これがフィードバックなのか !?

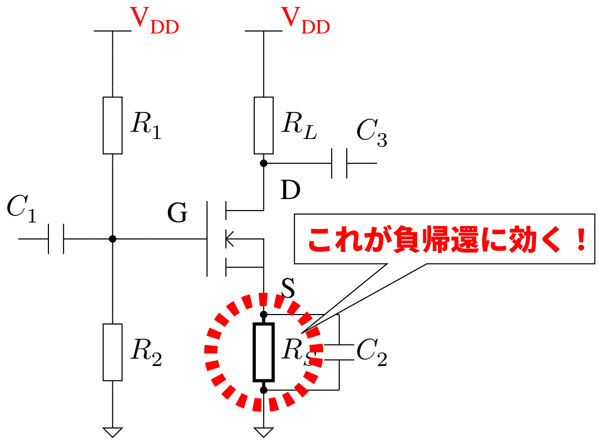


略説 (以下では $A \triangleq g_m R_L$ としている。):

1. C_2 があるとき $A_v =$ $= -A$。
2. C_2 がないとき $A'_v =$ 。ここで $H \triangleq \frac{R_S}{R_L}$。
3. これは負帰還の式そのもの。
4. ちなみに R_S は大信号でもフィードバックに効く。
5. この場合、大信号でバイアスが安定させられれば g_m も安定するので小信号は負帰還にしなくてもいい、という方針もアリ。
6. その場合 C_2 を入れる。

ソース負帰還増幅回路

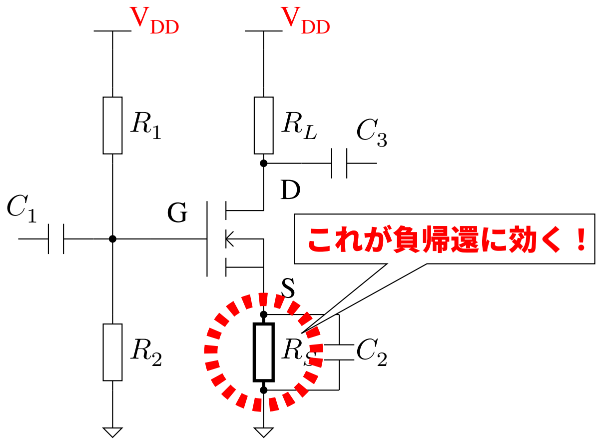
これがフィードバックなのか !?



略説 (以下では $A \triangleq g_m R_L$ としている。):

1. C_2 があるとき $A_v = -g_m R_L = -A$。
2. C_2 がないとき $A'_v =$ 　　　。ここで $H \triangleq \frac{R_S}{R_L}$。
3. これは負帰還の式そのもの。
4. ちなみに R_S は大信号でもフィードバックに効く。
5. この場合、大信号でバイアスが安定させられれば g_m も安定するので小信号は負帰還にしなくてもいい、という方針もアリ。
6. その場合 C_2 を入れる。

ソース負帰還増幅回路
これがフィードバックなのか !?



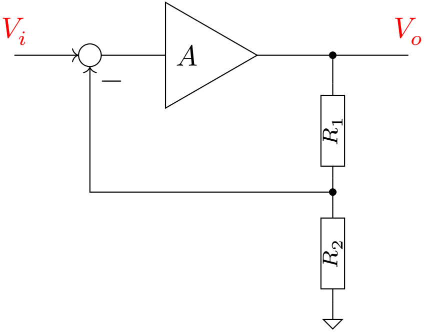
略説 (以下では $A \triangleq g_m R_L$ としている。):

1. C_2 があるとき $A_v = -g_m R_L = -A$。
2. C_2 がないとき $A'_v = -\frac{A}{1+AH}$。 ここで $H \triangleq \frac{R_S}{R_L}$。
3. これは負帰還の式そのもの。
4. ちなみに R_S は大信号でもフィードバックに効く。
5. この場合、大信号でバイアスが安定させられれば g_m も安定するので小信号は負帰還にしなくてもいい、という方針もアリ。
6. その場合 C_2 を入れる。

締めの練習問題

諦めないでね

OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



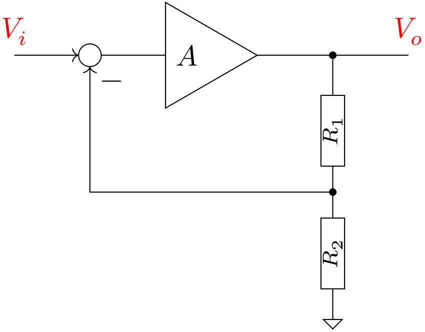
左図のように電位を A 倍する増幅器の出力を 2 つの抵抗器で分圧して負帰還した。

1. V_o と V_i の関係を求めよ。
2. $\lim_{A\to\infty}$ のとき、この関係はどうなるか?

ただし、制御工学のブロック線図でいう加算点のような記号は期待通りの（電位を加算する）機能を持つ素子とする。

締めの練習問題

諦めないでね



左図のように電位を A 倍する増幅器の出力を 2 つの抵抗器で分圧して負帰還した。

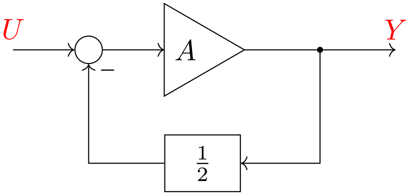
1. V_o と V_i の関係を求めよ。
2. $\lim_{A\to\infty}$ のとき、この関係はどうなるか?

ただし、制御工学のブロック線図でいう加算点のような記号は期待通りの（電位を加算する）機能を持つ素子とする。

第 1 回へとループが閉じた!

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。)



図において、$A = \dfrac{0.002 \times j\omega}{0.001 \times j\omega + 1}$ である。

1. ハイパス特性、ローパス特性どちらか?
2. 負帰還しない場合のカットオフ角周波数と中間周波数における電圧利得を求めよ。
3. 負帰還した場合のカットオフ角周波数と中間周波数における電圧利得を求めよ。

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、コントラストが読むに耐えうる **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