

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/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。

- 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

『差動増幅』

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

9 of 14

a L^AT_EX + Beamer slideshow

事実

任意の 2 関数 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は、共通部分 $g_c(t)$ と正反対の部分 $g_d(t)$ に分解できる！

$$\begin{cases} f_1(t) = \\ f_2(t) = \end{cases}$$

問: $g_c(t)$ と $g_d(t)$ を $f_1(t)$, $f_2(t)$ で表わせ。

事実

任意の 2 関数 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は、共通部分 $g_c(t)$ と正反対の部分 $g_d(t)$ に分解できる！

$$\begin{cases} f_1(t) = g_c(t) + g_d(t) \\ f_2(t) = g_c(t) - g_d(t) \end{cases}$$

問: $g_c(t)$ と $g_d(t)$ を $f_1(t)$, $f_2(t)$ で表わせ。

事実

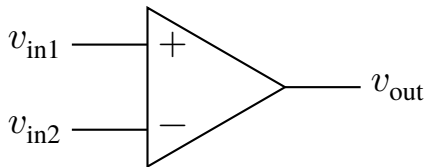
任意の 2 関数 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は、共通部分 $g_c(t)$ と正反対の部分 $g_d(t)$ に分解できる！

$$\begin{cases} f_1(t) = g_c(t) + g_d(t) \\ f_2(t) = g_c(t) - g_d(t) \end{cases}$$

問: $g_c(t)$ と $g_d(t)$ を $f_1(t)$, $f_2(t)$ で表わせ。

$$g_c(t) = (f_1(t) + f_2(t)) \div 2, \quad g_d(t) = (f_1(t) - f_2(t)) \div 2$$

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作:

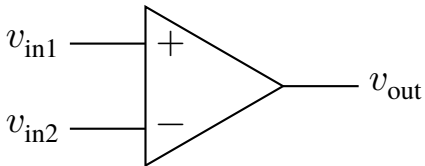
$$v_{\text{out}} =$$

実際の動作:

$$v_{\text{out}} =$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

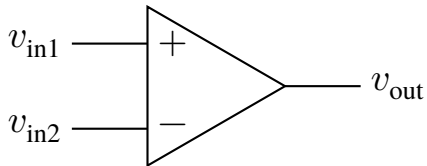
$$v_{out} =$$

実際の動作:

$$v_{out} =$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

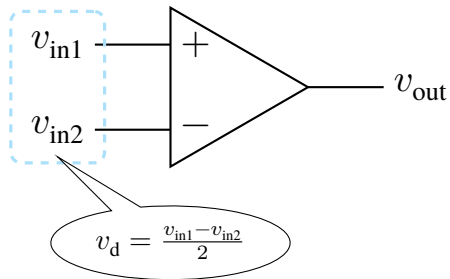
$$v_{\text{out}} = A_d \frac{v_{\text{in1}} - v_{\text{in2}}}{2} =$$

実際の動作:

$$v_{\text{out}} =$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

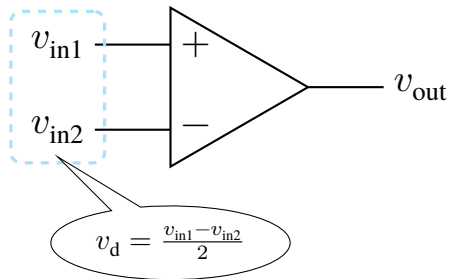
$$v_{out} = A_d \frac{v_{in1} - v_{in2}}{2} = A_d v_d$$

実際の動作:

$$v_{out} =$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

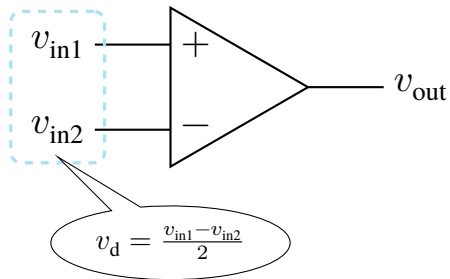
$$v_{out} = A_d \frac{v_{in1} - v_{in2}}{2} = A_d v_d$$

実際の動作: **同相成分も**増幅

$$v_{out} =$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

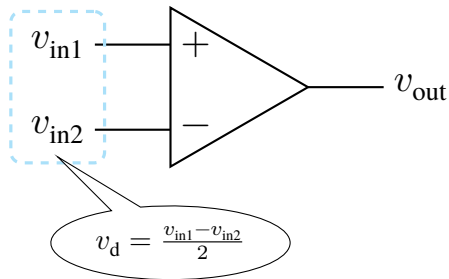
$$v_{out} = A_d \frac{v_{in1} - v_{in2}}{2} = A_d v_d$$

実際の動作: **同相成分も**増幅

$$v_{out} = A_d v_d + A_c v_c$$

(common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

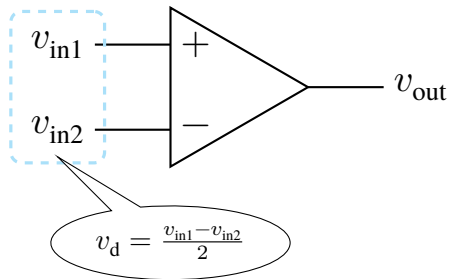
$$v_{out} = A_d \frac{v_{in1} - v_{in2}}{2} = A_d v_d$$

実際の動作: **同相成分**も増幅

$$v_{out} = A_d v_d + A_c v_c$$

CMRR (common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

差動増幅器 (Differential Amplifier)



理想動作: **逆相成分のみ**増幅

$$v_{out} = A_d \frac{v_{in1} - v_{in2}}{2} = A_d v_d$$

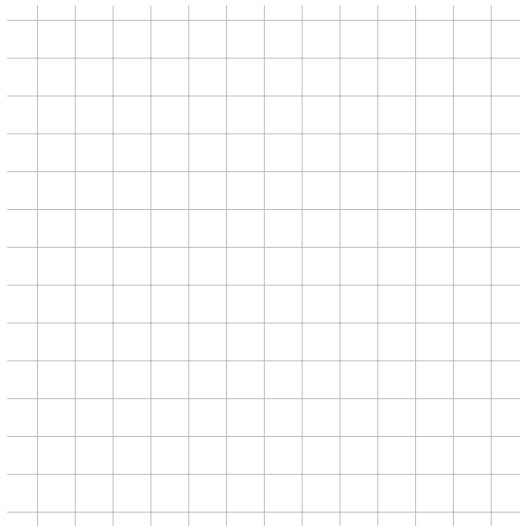
実際の動作: **同相成分**も増幅

$$v_{out} = A_d v_d + A_c v_c$$

CMRR (common mode rejection ratio) — 理想と現実のギャップ

$$\text{CMRR} \triangleq \frac{A_d}{A_c}$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

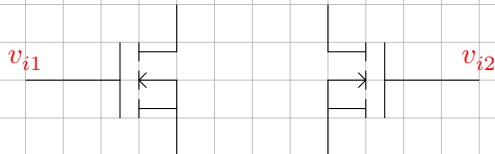


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌



LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

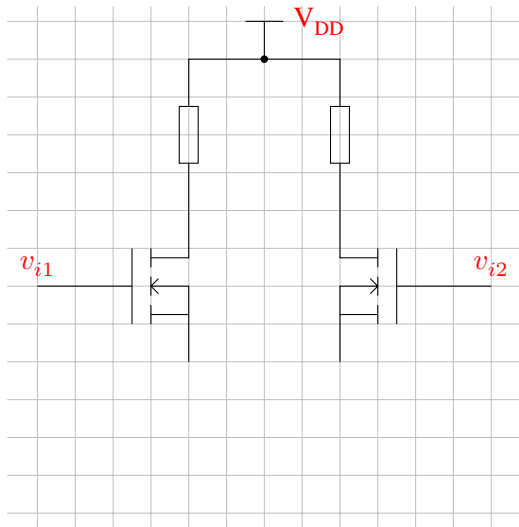


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌

♪ トランジスタ pair がありました。

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

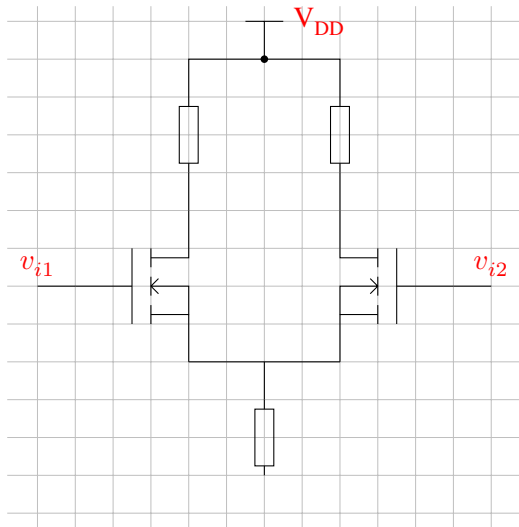


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌

- ♪ トランジスタ pair がありました。
- ♪ 正電源でつなげましょう。

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

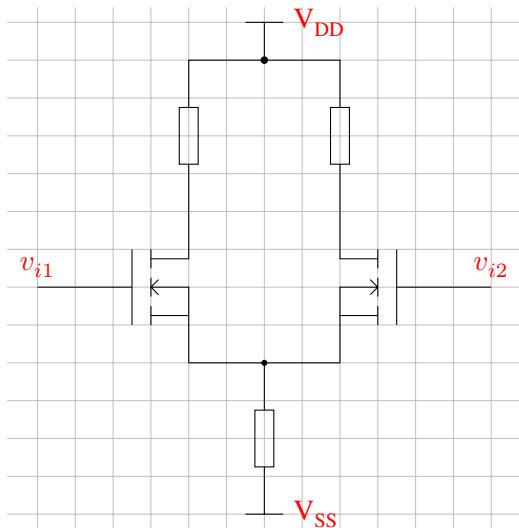


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌

- ♪ トランジスタ pair がありました。
- ♪ 正電源でつなげましょう。
- ♪ long tail のその先は、

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

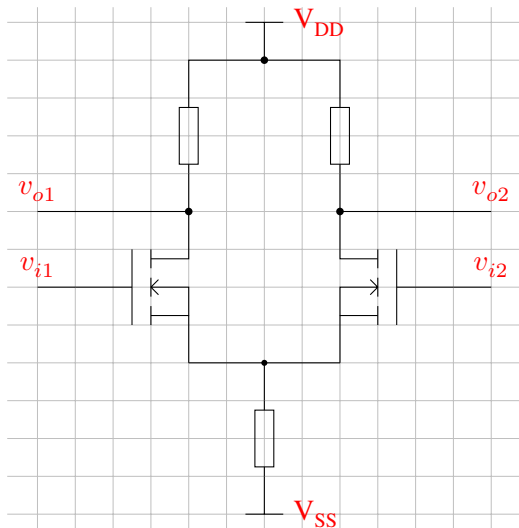


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌

- ♪ トランジスタ pair がありました。
- ♪ 正電源でつなげましょう。
- ♪ long tail のその先は、
- ♪ 負電源につながった。

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路

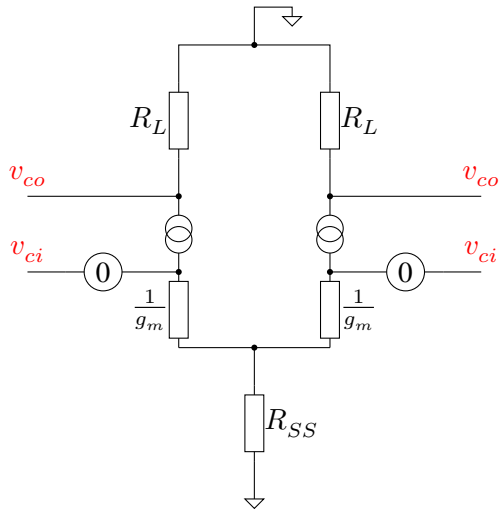


飽和領域にバイアスされているものとする。(負電源を使うのでバイアス抵抗不要。)

LTP 絵描き歌

- ♪ トランジスタ pair がありました。
- ♪ 正電源でつなげましょう。
- ♪ long tail のその先は、
- ♪ 負電源につながった。
- ♪ 出力つけたらできあがり！

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 1: 同相成分

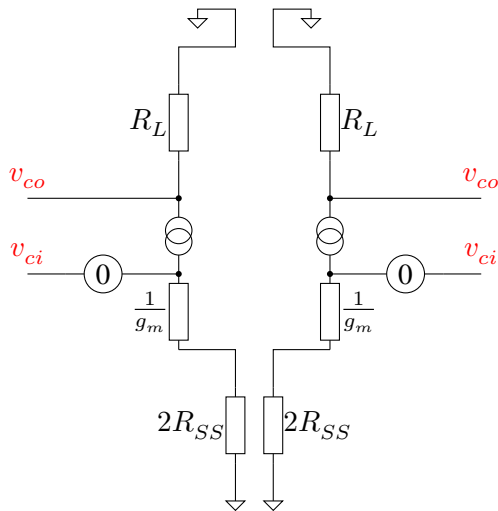


同相成分は**完全に左右対称**だから…

$$v_{co} =$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 1: 同相成分

同相成分は**完全に左右対称**だから…



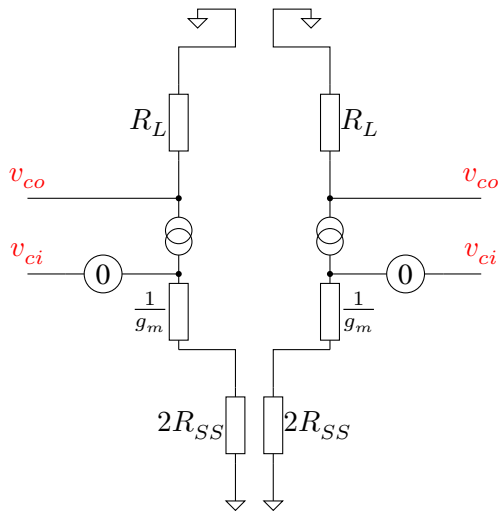
斬る！

$$v_{co} =$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 1: 同相成分

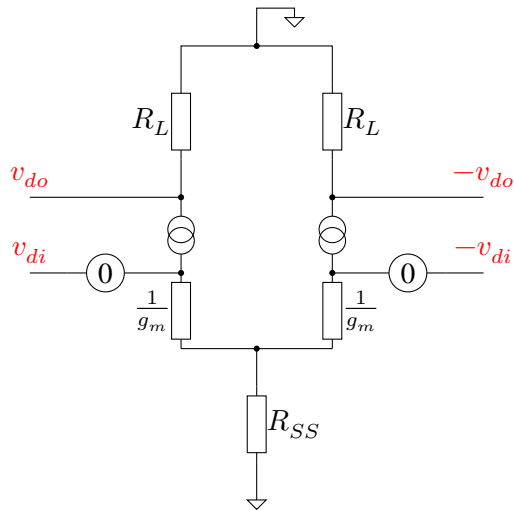
同相成分は**完全に左右対称**だから…

斬る！



$$v_{co} = - \frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{SS}} v_{ci}$$

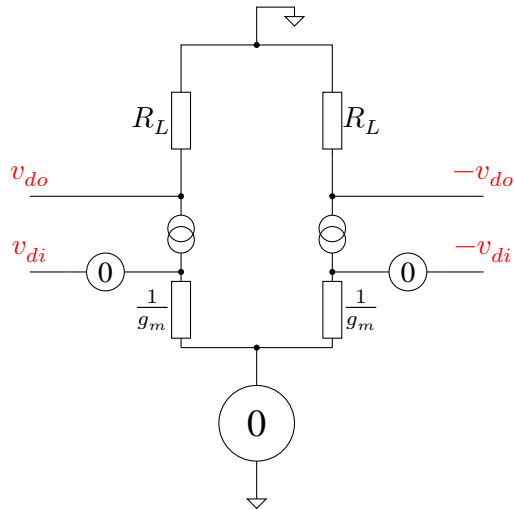
LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 2: 逆相成分



逆相成分は**左右の電流が逆向きに等しい**ので…

$$v_{do} =$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 2: 逆相成分

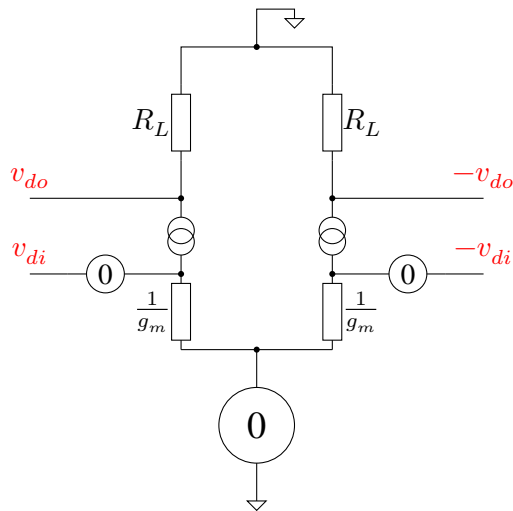


逆相成分は**左右の電流が逆向きに等しい**ので…

R_{SS} に電流が流れない、つまり R_{SS} で
の電圧降下がゼロ。

$$v_{do} =$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 2: 逆相成分

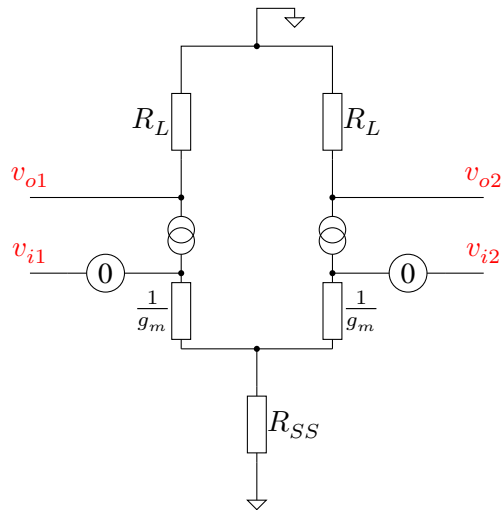


逆相成分は**左右の電流が逆向きに等しい**ので…

R_{SS} に電流が流れない、つまり R_{SS} で
の電圧降下がゼロ。

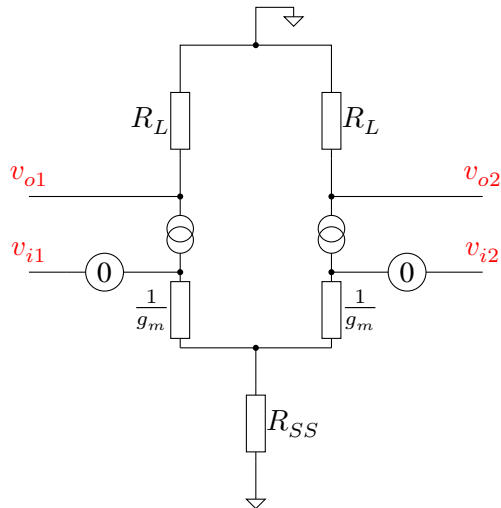
$$v_{do} = -g_m R_L v_{di}$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



$$v_{o1} =$$

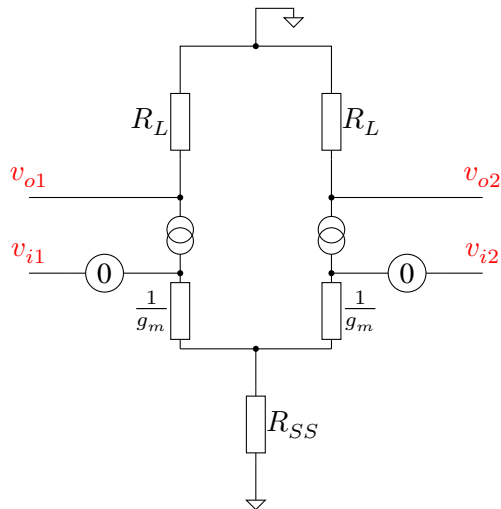
LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



$$v_{o1} = v_{co} + v_{do}$$

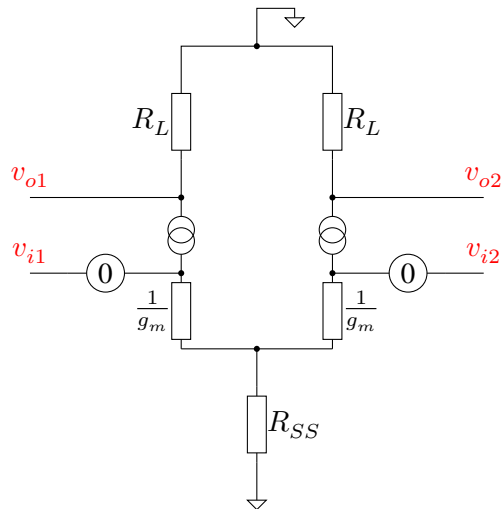
=

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



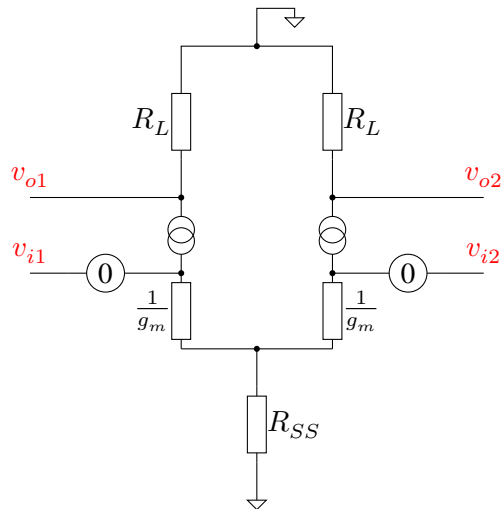
$$\begin{aligned} v_{o1} &= v_{co} + v_{do} \\ &= \underbrace{-\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{SS}}}_{A_c} v_{ci} - \underbrace{g_m R_L}_{A_d} v_{di} \\ &= \end{aligned}$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



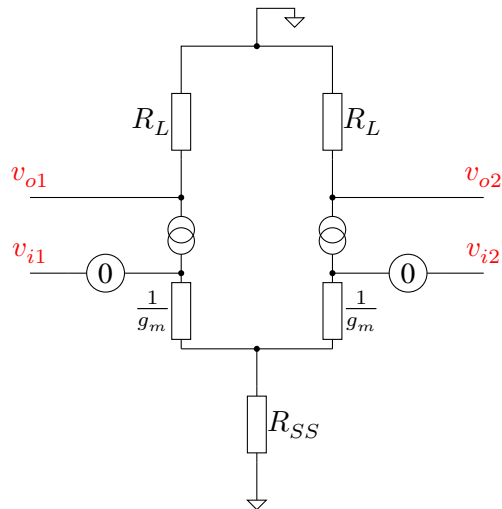
$$\begin{aligned} v_{o1} &= v_{co} + v_{do} \\ &= \underbrace{-\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{SS}}}_{A_c} v_{ci} - \underbrace{g_m R_L}_{A_d} v_{di} \\ &= A_c v_{ci} + A_d v_{di} \\ &= \end{aligned}$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



$$\begin{aligned} v_{o1} &= v_{co} + v_{do} \\ &= \underbrace{-\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{SS}}}_{A_c} v_{ci} - \underbrace{g_m R_L}_{A_d} v_{di} \\ &= A_c v_{ci} + A_d v_{di} \\ &= \frac{A_c + A_d}{2} v_{i1} + \frac{A_c - A_d}{2} v_{i2} \end{aligned}$$

LTP (Long-Tailed Pair) 増幅回路の攻略法 3: 重ねの理



$$\begin{aligned} v_{o1} &= v_{co} + v_{do} \\ &= \underbrace{-\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_{SS}}}_{A_c} v_{ci} - \underbrace{g_m R_L}_{A_d} v_{di} \\ &= A_c v_{ci} + A_d v_{di} \\ &= \frac{A_c + A_d}{2} v_{i1} + \frac{A_c - A_d}{2} v_{i2} \\ v_{o2} &= A_c v_{ci} - A_d v_{di} \\ &= \frac{A_c - A_d}{2} v_{i1} + \frac{A_c + A_d}{2} v_{i2} \end{aligned}$$

問: (v_{o1} を出力としたときの) LTP 差動増幅回路の

- ① A_d を求めよ。
- ② A_c を求めよ。
- ③ CMRR を求めよ。

答:

問: (v_{o1} を出力としたときの) LTP 差動増幅回路の

- ① A_d を求めよ。
- ② A_c を求めよ。
- ③ CMRR を求めよ。

答:

- ① (前ページより) $-g_m R_L$
- ② (前ページより) $-\frac{g_m R_L}{1+2g_m R_{SS}}$

問: (v_{o1} を出力としたときの) LTP 差動増幅回路の

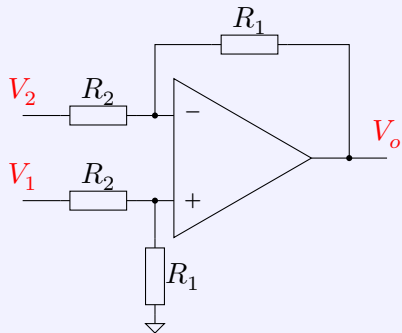
- ① A_d を求めよ。
- ② A_c を求めよ。
- ③ CMRR を求めよ。

答:

- ① (前ページより) $-g_m R_L$
- ② (前ページより) $-\frac{g_m R_L}{1+2g_m R_{SS}}$
- ③ $1 + 2g_m R_{SS}$

OP アンプによる差動増幅回路

あれれどこかで見たような…?

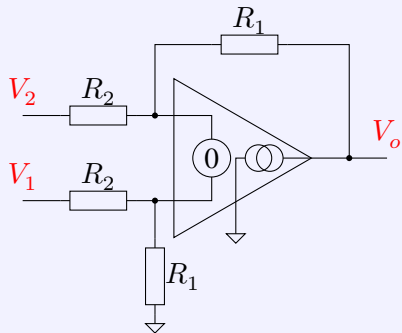


問: この回路の V_o を
 V_1, V_2 を用いて表わせ。

$$V_o =$$

OP アンプによる差動増幅回路

あれれどこかで見たような…?

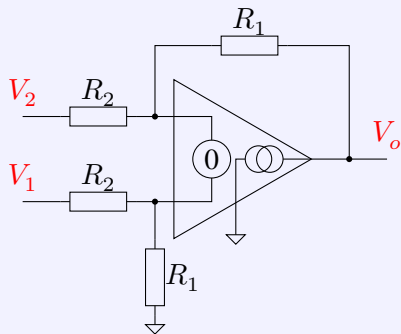


問: この回路の V_o を
 V_1, V_2 を用いて表わせ。

$$V_o =$$

OP アンプによる差動増幅回路

あれれどこかで見たような…?

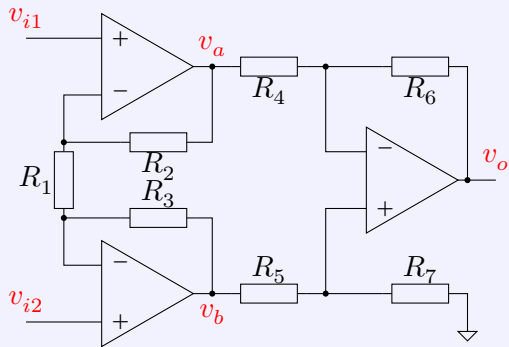


問: この回路の V_o を V_1, V_2 を用いて表わせ。

$$V_o = \frac{R_1}{R_2} (V_1 - V_2)$$

計装アンプ (instrumentation amplifier)

OP アンプを使った実用的な差動増幅回路

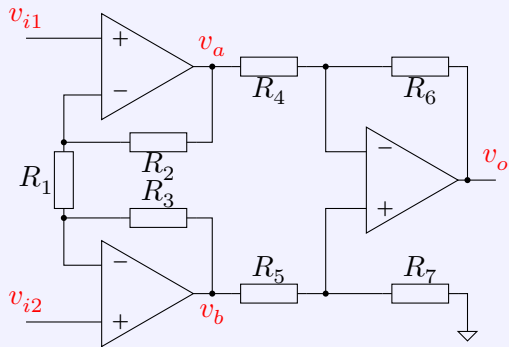


問: この回路の v_o を v_{i1}, v_{i2} を用いて表わせ。ただし、 $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ とする。
ヒント:

$$v_o =$$

計装アンプ (instrumentation amplifier)

OP アンプを使った実用的な差動増幅回路

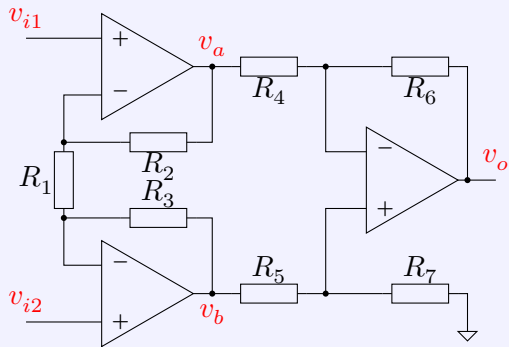


問: この回路の v_o を v_{i1}, v_{i2} を用いて表わせ。ただし、 $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ とする。
ヒント: $v_a - v_b$ を求める。

$$v_o =$$

計装アンプ (instrumentation amplifier)

OP アンプを使った実用的な差動増幅回路

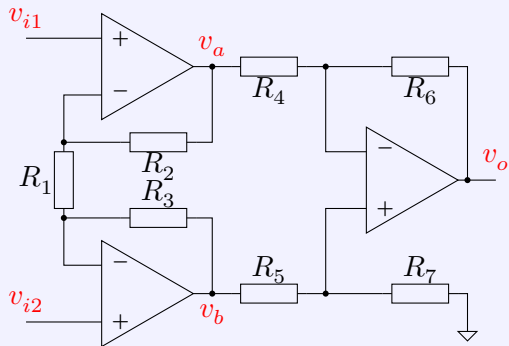


問: この回路の v_o を v_{i1}, v_{i2} を用いて表わせ。ただし、 $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ とする。
ヒント: $v_a - v_b$ を求める。

$$v_o = \frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_{i2} - v_{i1})$$

計装アンプ (instrumentation amplifier)

OP アンプを使った実用的な差動増幅回路



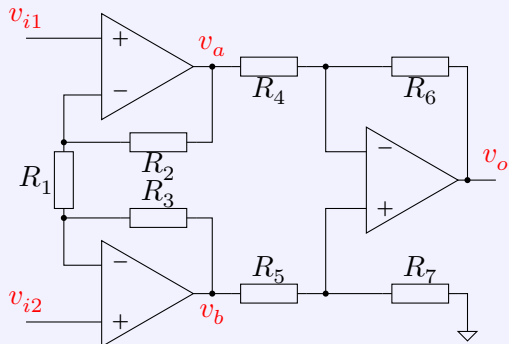
問: この回路の v_o を v_{i1} , v_{i2} を用いて表わせ。ただし、 $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ とする。
ヒント: $v_a - v_b$ を求める。

$$v_o = \frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_{i2} - v_{i1})$$

なんか面倒くさい割に本質的に前ページと同じ?

計装アンプ (instrumentation amplifier)

OP アンプを使った実用的な差動増幅回路



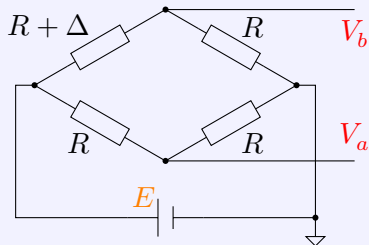
問: この回路の v_o を v_{i1}, v_{i2} を用いて表わせ。ただし、 $R_2 = R_3$, $R_4 = R_5$, $R_6 = R_7$ とする。
ヒント: $v_a - v_b$ を求める。

$$v_o = \frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (v_{i2} - v_{i1})$$

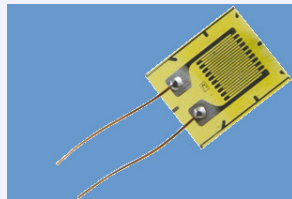
なんか面倒くさい割に本質的に前ページと同じ? → 問: 利点は何か?

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (_____ を用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小 である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



img src=<http://www.kyowa-ei.com>

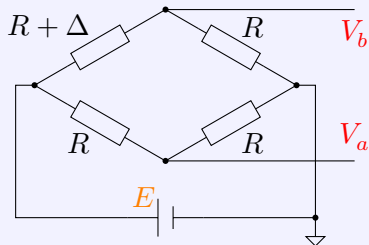
答: $V_a =$ _____ , $V_b =$ _____ より、 $V_a - V_b =$ _____ E となる。 Δ は微小なの

で、 Δ について _____ すると、 $V_a - V_b \simeq$ _____ となる。

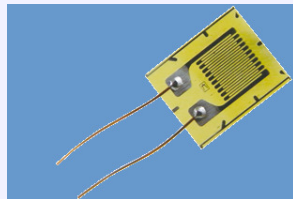
抵抗値の変化が電位の差として現れる \rightarrow

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



img src=<http://www.kyowa-ei.com>

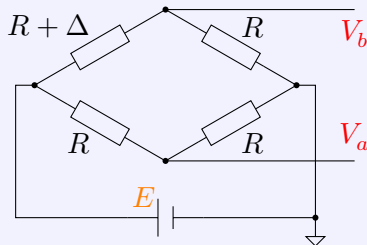
答: $V_a =$, $V_b =$ より、 $V_a - V_b =$ E となる。 Δ は微小なの

で、 Δ について _____ すると、 $V_a - V_b \simeq$ となる。

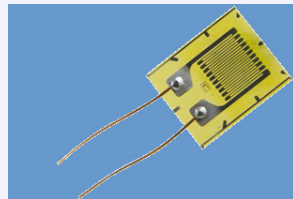
抵抗値の変化が電位の差として現れる →

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



img src=<http://www.kyowa-ei.com>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b =$

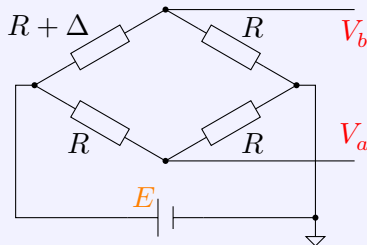
E となる。 Δ は微小なの

で、 Δ について _____ すると、 $V_a - V_b \simeq$ _____ となる。

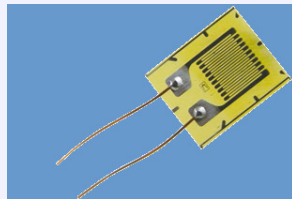
抵抗値の変化が電位の差として現れる →

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



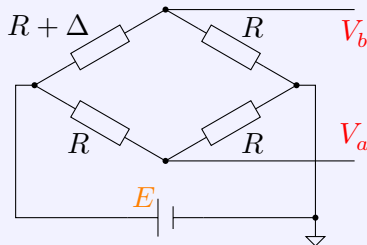
img src=<http://www.kyowa-ei.com>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b = \frac{\Delta}{2(2R + \Delta)}E$ となる。 Δ は微小なの
で、 Δ について _____ すると、 $V_a - V_b \simeq$ _____ となる。

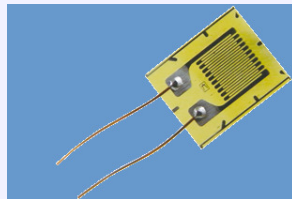
抵抗値の変化が電位の差として現れる →

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



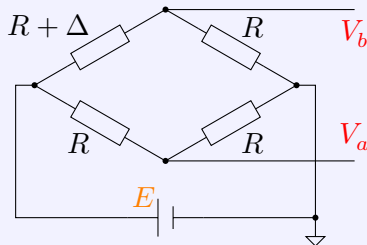
img src=<http://www.kyowa-ei.com>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b = \frac{\Delta}{2(2R + \Delta)}E$ となる。 Δ は微小なの
で、 Δ について 一次近似 すると、 $V_a - V_b \simeq$ となる。

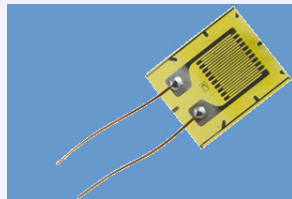
抵抗値の変化が電位の差として現れる →

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



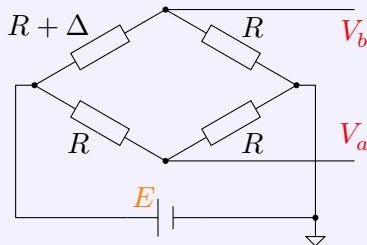
img src=<http://www.kyowa-ei.com>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b = \frac{\Delta}{2(2R + \Delta)}E$ となる。 Δ は微小なの
で、 Δ について 一次近似 すると、 $V_a - V_b \simeq \frac{\Delta}{4R}E$ となる。

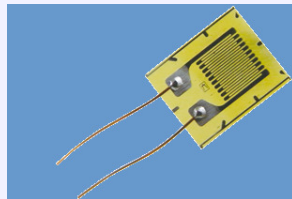
抵抗値の変化が電位の差として現れる →

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗変化の検出の例 (^{ひず}歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



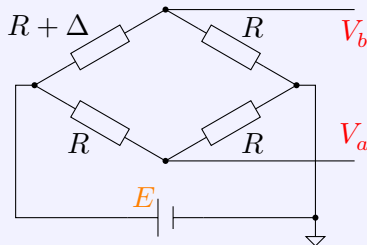
img src=<http://www.kyowa-ei.com>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b = \frac{\Delta}{2(2R + \Delta)}E$ となる。 Δ は微小なので、 Δ について 一次近似 すると、 $V_a - V_b \simeq \frac{\Delta}{4R}E$ となる。

抵抗値の変化が電位の差として現れる → **差動増幅** すればいい!!

差動増幅の使いどころ

ブリッジ回路による微小抵抗^{ひず}変化の検出の例 (歪みゲージを用いた計測など)



問:
左の回路において Δ
が微小である時、
 $V_a - V_b$ を求めよ。



Sir Charles Wheatstone (1802-75; 英)

img src=<http://ja.wikipedia.org>

答: $V_a = \frac{1}{2}E$, $V_b = \frac{R}{2R + \Delta}E$ より、 $V_a - V_b = \frac{\Delta}{2(2R + \Delta)}E$ となる。 Δ は微小なの
で、 Δ について 一次近似 すると、 $V_a - V_b \simeq \frac{\Delta}{4R}E$ となる。

抵抗値の変化が電位の差として現れる → 差動増幅 すればいい!!

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。)

LTP 増幅回路に置いて $g_m = 500\mu(\text{S})$, $R_L = 10\text{k}(\Omega)$, $R_{SS} = 2\text{k}(\Omega)$ とする。 $v_{i1} = 0.1(\text{V})$, $v_{i2} = 0.11(\text{V})$ を入力した際の v_{o2} を求めよ。**すべての式について文章による丁寧な説明を行うこと。**

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>

