

パルス回路(直線波の発生)

v3.7 Sep.2011

【目的】

時間に比例した電圧(直線波)を発生する代表的な回路として、ミラー積分回路とブートストラップ回路の動作を習得する。

【原理】

図1左に示すCR積分回路のコンデンサ端子電圧 V_C は、過渡解析によると式(1)に示す指数関数変化になる。

$$V_C = E(1 - e^{-t/CR}) = \frac{E}{CR}t \left(1 - \frac{1}{2CR}t + \dots\right) \quad \text{ただし、} \quad e^{-t/CR} = 1 - \frac{1}{CR}t + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{CR}\right)^2 t^2 - \dots \quad \text{である。} \quad (1)$$

このように電圧が指数関数変化するのは、コンデンサの充電とともに回路を流れる電流が指数関数的に減少するためである。もしもコンデンサの充電電流 i が一定のまま流れ続けられれば、時間に比例した直線的な電圧波形 V_C を得ることができる。そこで、図2左のようにコンデンサ端子電圧 V_C に等しい電圧を発生する可変従属電源 V_e を新たに挿入する。このとき、抵抗 R の両端の電圧 V_R は

$$V_R = E - V_C + V_e = E \quad (2)$$

となり、充電電流は常に $i = E/R$ 一定となる。したがって、出力電圧 V_C は次式となり、時間に比例した電圧を得ることができる(図2右参照)。

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t i \, dt = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{E}{R} \, dt = \frac{E}{CR}t \quad (3)$$

このような可変電源 V_e を実際に作ることは困難であるが、これを増幅器で近似的に置き換えたのがミラー積分回路とブートストラップ回路である。図2においてa点接地の回路をミラー積分回路、b点接地の回路をブートストラップ回路と呼んで区別している。

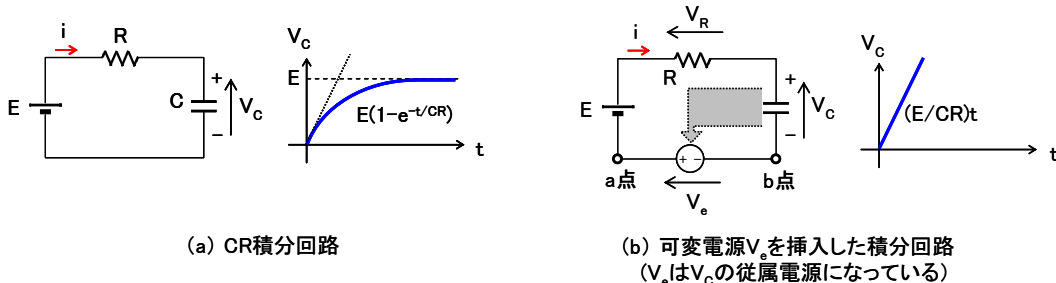


図1. CR積分回路の端子電圧 V_C

通常のCR積分回路は指数関数変化する。

図2. 可変電源を挿入したCR積分回路の V_C

可変電源を挿入すると線形変化する。

・ミラー積分回路

図3(a)のように増幅器を挿入し、これに可変電源 V_e に相当する働きをさせたものがミラー積分回路(Miller integrator)である。図3(a)において、抵抗 R を流れる電流を i 、反転入力端子電圧を v_1 、出力端子電圧を v_o とする。ただし、増幅器の入力インピーダンスは $Z_{in} = \infty$ とする。

一般性を持たせるため、入力電圧 E を角周波数 ω の交流に拡張して考える。反転入力端子の電圧を v_1 、出力電圧を v_o とすると、電流 i は $Z_{in} = \infty$ のためそのまま C に流れるので、

$$\begin{aligned} i &= j\omega C(v_1 - v_o) = j\omega C(v_1 - (-Av_1)) \\ &= j\omega \underbrace{(1+A)C}_{C'} v_1 = j\omega C' v_1 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)で新しく定義したキャパシタンス $C' = (1+A)C$ を使うと、図3(a)の増幅回路を図3(b)のように書き換えることができる。

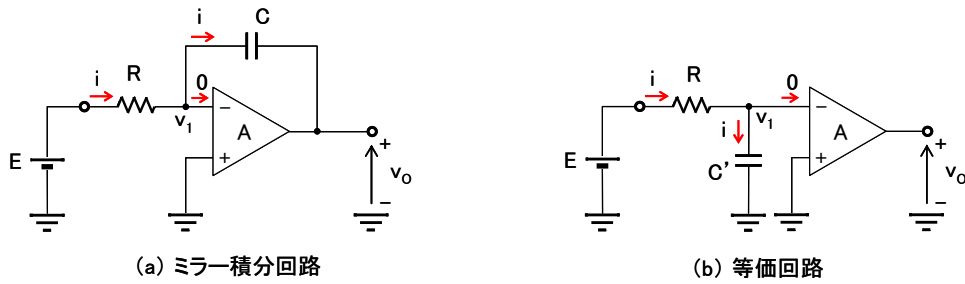


図3. ミラー積分回路(a)とその等価回路(b)

図3(b)の回路において入力が直流Eのとき、図1との類似性より出力電圧 v_o は式(1)から類推して次式で表現できる。

$$v_o = -AV_{C'} = -AE(1 - e^{-t/CR}) = -AE(1 - e^{-t/(1+A)CR}) \quad (5)$$

$$= -\frac{A}{(1+A)} \frac{E}{CR} t \left(1 - \frac{1}{(1+A)} \frac{1}{2CR} t + \dots \right)$$

ここで、電圧利得が十分大きく $A \approx \infty$ で近似できるなら、2項目以降は無視することができて、

$$v_o = -\frac{E}{CR} t \quad (6)$$

となり、完全な直線波が得られる。利得Aが有限の場合は、2項目以降の非線形項 t^2, t^3, \dots が直線を歪めるように影響を及ぼすが、式(1)に比べると $1/(1+A)$ 倍非線形効果は小さいことがわかる。

同様に図3(b)の回路において入力が振幅Eの正弦波 $E \sin \omega t$ の場合、 C' に加わる電圧振幅 $V_{C'}$ が無視できるなら(電源電圧の大半がRにかかるなら)流れる電流は $i = (E/R) \sin \omega t$ となり、次式が成立する。

$$v_o = -AV_{C'} = -A \left(\frac{1}{C'} \int_0^t i dt \right) \quad (7)$$

$$= -\frac{A}{(1+A)C} \int_0^t \frac{E}{R} \sin \omega t dt$$

$$= \frac{AE}{(1+A)\omega CR} \cos \omega t$$

ミラー積分回路に、方形波もしくは正弦波が入力されたときの出力波形の様子を図4に示す。積分すると方形波は三角波へ、CosはSinへ変換される。

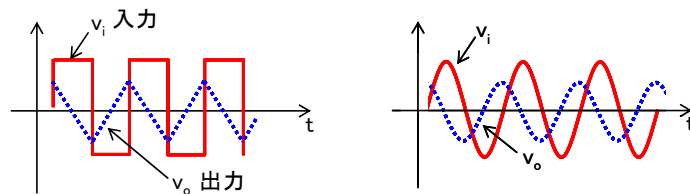


図4. ミラー積分回路の入出力波形

・ブートストラップ回路

図5(a)に示すように増幅器を挿入し、これに可変電源 V_o に相当する働きをさせたものが**ブートストラップ回路**(Bootstrap circuit)である。図5(a)において、抵抗Rを流れる電流を i 、非反転入力端子電圧を v_1 、出力端子電圧を v_o とする。ただし、増幅器の増幅度は $A \approx +1$ 、増幅器の入力インピーダンスは $Z_{in} = \infty$ とする。増幅器の出力端子の電位が v_o なので、ここから電源 $E \rightarrow$ 抵抗 $R \rightarrow$ キャパシタンス $C \rightarrow$ アースの順にキルヒホッフの電圧則を適用すると、

$$v_o + E - iR - v_1 = 0 \quad (8)$$

となるので、

$$E = iR + v_1 - (+Av_1) = iR + v_1(1 - A) \quad (9)$$

$$\therefore \frac{E}{1 - A} = i \frac{R}{1 - A} + v_1$$

$$\Rightarrow E' = iR' + v_1$$

式(9)で新しく定義した電源電圧 $E' = E/(1 - A)$ と抵抗 $R' = R/(1 - A)$ を使うと、図5(b)の等価回路で書き換えることができる。

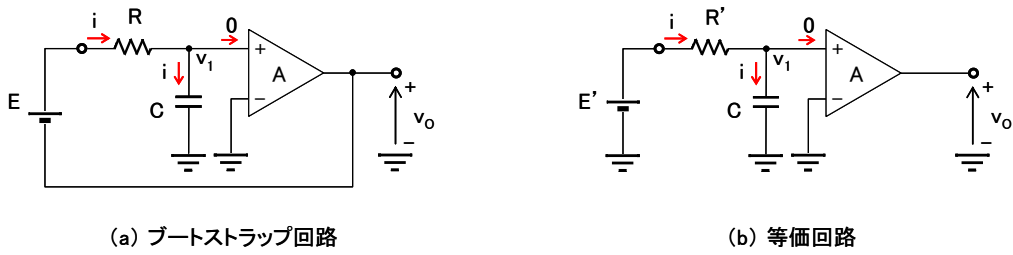


図 5. ブートストラップ回路(a)とその等価回路(b)

図 5(b)の回路において入力が直流 E のとき、図 1 との類似性より出力電圧 v_o は式(1)から類推して次のように表現できる。

$$\begin{aligned}
 v_o &= +AV_C \\
 &= AE'(1 - e^{-t/CR'}) \\
 &= A \left(\frac{E}{1-A} \right) (1 - e^{-t(1-A)/CR}) \\
 &= A \frac{E}{CR} t \left(1 - \frac{(1-A)}{2CR} t + \dots \right)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

式(10)において、 $A=+1$ ならば次式のように完全な直線波を得ることができる。

$$v_o = \frac{E}{CR} t \tag{11}$$

また、 $A < 1$ の場合でも式(1)と比べると $(1-A)$ 倍だけ直線性が改善されることがわかる。

【測定系】

図 6(a)および図 6(b)にミラー積分回路の内部配線と測定系を示す。

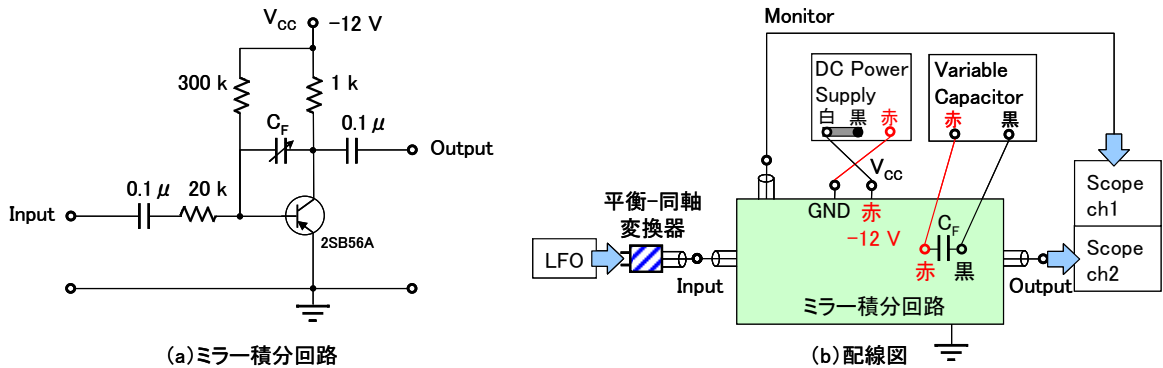


図 6. ミラー積分回路の実験回路図(a)と実際の結線(b)

図 7(a)および図 7(b)にブートストラップ回路の内部配線と測定系を示す。

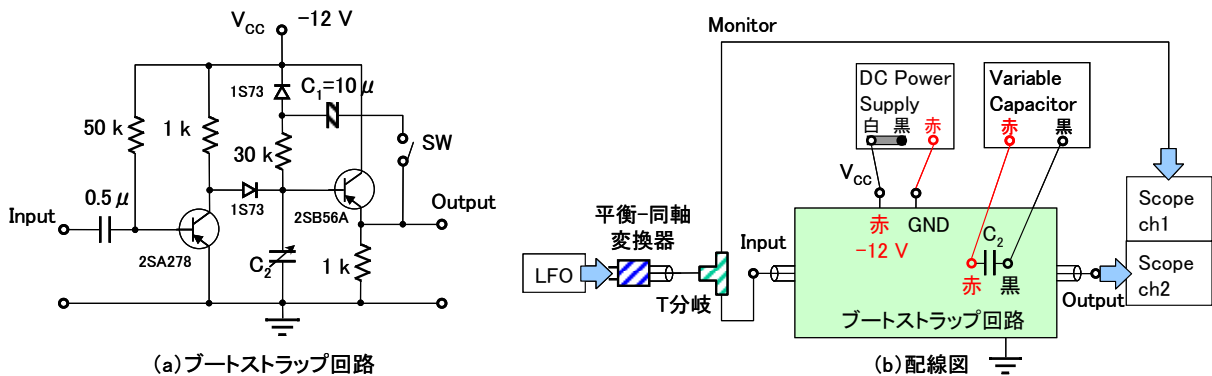


図 7. ブートストラップ回路の実験回路図(a)と実際の結線(b)

【使用機材】

表 1. 使用機材一覧 (実験は 2 グループで行う)

品目	オシロ スコープ	可変 コンデンサ	直流電源	オーディオ ジェネレータ	デジタル マルチメータ	ミラー積分 回路	ブートストラ ップ回路
略記号	Scope	C_F or C_2	V_{CC}	LFO	DMM	DUT1	DUT2
個数	1×2グループ	1×2グループ	1×2グループ	1×2グループ	1×2グループ	1	1
メーカー	HITACHI	HP	KENWOOD	LEADER	FLUKE	TAKUMA	TAKUMA
型番	V1560	4440B	PR36-1.2A	LAG120B	83		
その他	100 MHz	40 pF-1.2 uF					

【測定方法】

1. ミラー積分回路

1-1. 正弦波入力に対する出力波形の観察

- (1) オシロスコープの振幅微調整ツマミ (灰色または赤のツマミ) が右一杯に回っていることを確認する。
- (2) 直流電源の POWER だけを ON にして CV 12 V (定電圧 12 V) に調整する。まだ OUTPUT は押さないこと。
- (3) 図 6(b)のミラー積分回路を組む。
- (4) バイアス電圧、可変コンデンサ C_F 、LFO、Scope を次のように設定する。設定チェックと配線チェックが完了したら、最後に V_{CC} と LFO の OUTPUT を ON にして回路を動作させる。
 - 可変コンデンサ: $C_F=0.01 \mu F$
(ダイヤル表示を . 0 1 0 0 μF にする。2 pF/DIV のツマミは使わないので無視してよい)
 - LFO: $f=80 \text{ Hz}$, $V_{p-p}=8 \text{ V}$ の正弦波
(振幅レベルは LFO の ATTENUATION ツマミをまわしながらオシロスコープ上で確認する)
 - Scope: VERTICAL MODE=DUAL、SOURCE=CH1、入力結合方式=AC
- (5) 周波数を 80 Hz - 5 kHz まで変化させ、図 8 のように入出力の位相差を観察してデータシート 1-1 に記入する。正弦波を積分するので、ある周波数を超えると位相差は 90° または 270° になるはずである。
- (6) 80 Hz から周波数を徐々に上げて行き、積分動作が始まる周波数を時間波形とリサージュ図の両方から判定する。動作開始周波数をデータシート 1-2 に記録する。
 - 時間波形判定: 出力波形の歪みがなくなり、かつ位相差が $\theta=90^\circ$ または 270° になったとき
 - リサージュ図判定: VERTICAL MODE = XY とし、図 9 のように歪んだ楕円から綺麗な楕円が得られたとき
 - $C_F=0.001 \mu F$ 、 $0.005 \mu F$ 、 $0.05 \mu F$ 、 $0.1 \mu F$ の各場合についても(4)と同様の測定を行う。

1-2. パルス入力に対する出力波形の観察

- (7) LFO 発振出力をパルス波に変更する。(OUTPUT の ATTENUATION ツマミを PULL する)
 - LFO: $f=80 \text{ Hz}$, $V_{p-p}=4 \text{ V}$ の矩形波 (方形波、パルス波とも呼ぶ)
- (8) 可変コンデンサを $C_F=0.01 \mu F$ に設定する。そして、データシート 1-3 の要領で各周波数における出力波形をオシロスコープで観察し、画像を記録する。

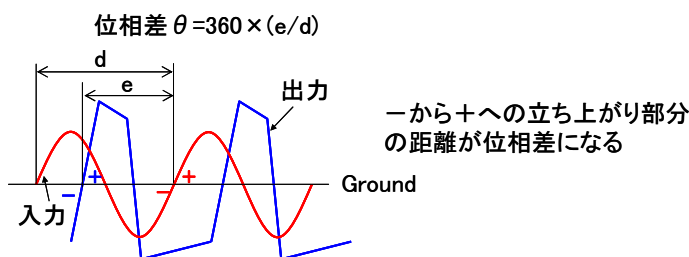


図 8. 位相差の取り方

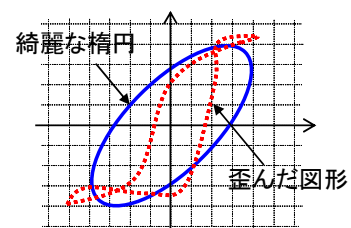


図 9. リサージュ図による判定

2. ブートストラップ回路

2-1. パルス入力に対する出力波形の観察

- (1) 直流電源の POWER だけを ON にして CV 12V(定電圧 12 V)に調整する。まだ OUTPUT は押さないこと。
- (2) 図 7(b)のブートストラップ回路を組む。
- (3) LFO 発振出力を **パルス波に変更**する。(OUTPUT の ATTENUATION ツマミを PULL する)
- (4) バイアス電圧、可変コンデンサ C_2 、LFO、Scope を次のように設定する。設定チェックと配線チェックが完了したら、最後に V_{cc} と LFO の OUTPUT を ON にして回路を動作させる。
 - 可変コンデンサ: $C_2=0.001 \mu F$
(ダイヤル表示を $.0010 \mu F$ にする。2 pF/DIV のツマミは使わないので無視してよい)
 - LFO: $V_{p-p}=4 V$ 、 $f=10 \text{ kHz}$ の **矩形波**(方形波、パルス波とも呼ぶ)
回路基板に入力電圧をモニタする端子がないため、T 分岐コネクタを使って入力を分岐し、LFO の ATTENUATION ツマミをまわしながらオシロスコープ画面上で入力電圧レベルを調整する。
 - Scope: VERTICAL MODE=Dual、SOURCE=CH1、**入力結合方式=AC**
- (5) データシート 2-1 の要領で C_1 を ON または OFF にしたときの出力波形をオシロスコープで観察し記録する。
- (6) $C_2=0.05 \mu F$ としたとき、同様に波形を観察して記録する。
- (7) 次の条件で出力電圧の勾配(時間変化に対する電圧傾斜部分の変化量)をオシロスコープで観察する。結果をデータシート 2-2 の要領でまとめる。
 - $C_1=ON$ 、 $C_2=0.05 \mu F$ 、 $0.01 \mu F$ 、 $0.005 \mu F$ 、 $0.00265 \mu F$ 、 $0.001 \mu F$

【注意事項】

- (1) バイアス電圧の極性に注意すること。
- (2) 直流電源の出力を ON にする前に必ず、電圧-電流両出力調整ダイヤルを左一杯にまわして 0V-0A の状態にすること。

【考察・研究事項】

- (1) ミラー積分回路の実験データを整理し、回路シミュレータと比較考察せよ。
回路シミュレータ(LTspice)の使い方は <http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/experiment/experiment.html> を参考に。
- (2) ~~ブートストラップ回路の実験データを整理し、回路シミュレータと比較考察せよ。~~
- (3) ~~ミラー積分回路やブートストラップ回路はどのような用途に使用されるか。~~

【参考文献】

- [1] 鈴木、吉田「パルス・デジタル回路入門」 pp.105-112, コロナ社
- [2] 内山「パルス回路」 pp.102-107, コロナ社
- [3] 清水、鴻田「パルス回路の考え方 改訂 2 版」 pp.130-137, オーム社
- [4] 菅谷、中村「パルス回路」 pp.120-124, オーム社

【レポートについて】

- (1) 実習結果や測定結果に関する表やグラフは必ず各自で作成すること。Excel の使用可。
- (2) 本実験テキストのワードファイルはダウンロードできるが、**目的、原理、測定系**についてはコピー貼り付け不可。手書きもしくは式の導出過程等を確認しながら自分のレポートを作成すること。
- (3) 実験テキストの改善点提案や間違い箇所の指摘など、以降の学生実験にとって有益なアドバイスがあれば加点する。