

情報統計学実験

—パラメータ設計—

予習課題

標準予習書の実験装置・実験方法欄に記述すること。

- 1 表 4 から因子 F の第 3 水準の感度の水準平均 $\bar{F}_3^S$ を示しなさい。
- 2 SN 比と感度の最適水準が B_3, D_1, F_2, H_1 となったとき，表 5 の 4 つの推定値 ($\hat{\eta}_O, \hat{\eta}_C, \hat{S}_O, \hat{S}_C$) を示しなさい。

1 ミニ四駆を用いたパラメータ設計

1.1 目的

走路が平面から凹凸までばらつくという条件の下で，一周 秒（未知）で周回し，周回時間のばらつきの小さいミニ四駆を設計する．また，実験を通じて，パラメータ設計の手順および意義を理解する．

1.2 エンジニアード・システム

開発する製品を出力 y ，入力 M ，設計パラメータ $x_1, \dots, x_n$ ，ノイズ $z_1, \dots, z_n$ をもつものとする．出力 y は，

- ・ y は，システムの目的（機能）を表わす量である．
- ・ y は，システムの使われ方により目標値が変わる．

と定義されている．入力 M は，

- ・ M は出力を変えるための信号である．

とする．また，設計パラメータ $x_1, \dots, x_n$ によっても出力は変化するが，設計者の立場としては，入力 M により，目標値を調整したい．さらに，入力と設計パラメータのみで出力を決めたいが，実際はノイズによる影響を避けられない．こうした中でも，入力と出力の関係がノイズの影響を受けにくい場合，入出力関係がノイズに対してロバストであるという．

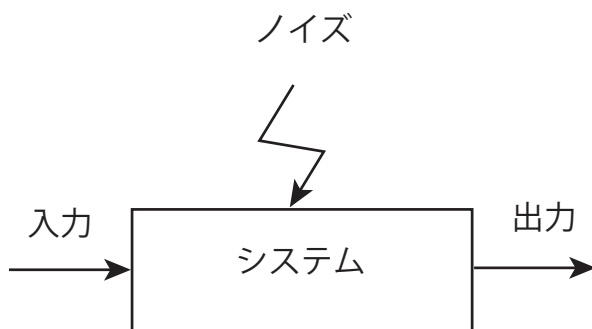


図 1 エンジニアード・システム

なお，入力に応じて出力が変化することが望ましい特性を動特性，一定の出力が望ましい特性を静特性と定義する．

ミニ四駆の場合，入力は電圧，出力は周回時間，ノイズは悪路および通常路であり，設計パラメータはモーター，タイヤ，ギヤなどである．電圧が高くなればモーターの回転数が上がり，周回時間は短くなる．つまり，電圧の変化によって周回時間を調整することになる．このとき，モーターなどの選択結果により周回時間が異なってくる．また，一般に悪路を走行すると周回時間は遅くなるが，いかなる電圧でもなるべく通常路とのタイム差がない（ロバストな）設計パラメータを決定したい．

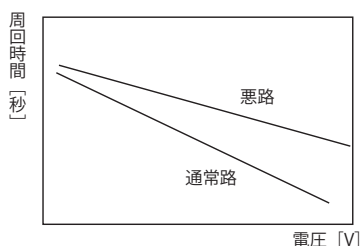


図 2 電圧が高いとノイズの影響が大きい設計

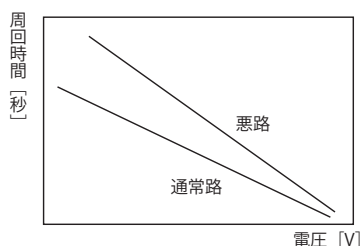


図 3 電圧が低いとノイズの影響が大きい設計

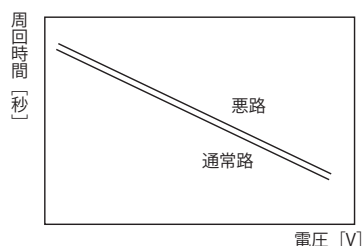


図 4 ノイズの影響が小さい設計

1.3 パラメータ設計における因子と水準

1.3.1 信号因子（入力）

信号因子は，システムの入力を示す．システムの入出力関係がどの程度ノイズに対して強いのかを評価するために取り上げる．

1.3.2 誤差因子

ノイズの中で実験に取り上げるものを誤差（ノイズ）因子と呼ぶ．実験の中でその値を強制的に変えることで，市場でのバラツキや劣化を作り出すための因子である．

1.3.3 制御因子

技術者が制御できる設計パラメータや工程条件で，実験に取り上げるものを制御因子と呼ぶ．実験結果から入出力関係のノイズに対する強さを向上させる水準を見つける．

1.4 パラメータ設計の手順

1.4.1 入出力の検討

ミニ四駆の機能は，「ある目標時間で周回すること」であり，出力は周回時間である．周回時間を変える電圧を入力とする．

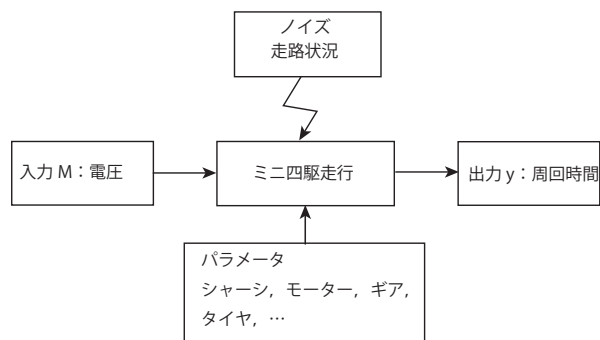


図 5 システムチャート

1.4.2 理想機能の検討

入力と出力の間の理想機能を検討する．入力 M の変化に対して，出力 y が直線的に変化することを理想とする．数式で表すと 1 次式

$$y = \alpha_3 + \beta M$$

で表わされるとする．

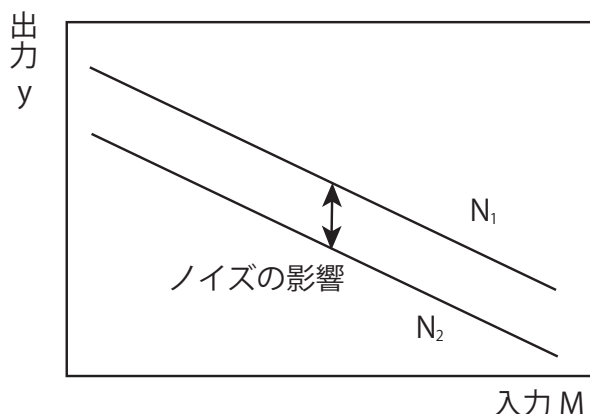


図 6 理想機能

1.4.3 出力変動の評価方法

入力とノイズからロバストネスの評価条件を作る．ノイズ（誤差因子）は， N_1 （悪路）， N_2 （通常路）の 2 水準を取り上げる．また，入力（信号因子）は， M_1 （充電池（白） $\times 2$ ，2.7V）， M_2 （充電池（緑） $\times 2$ ，2.9V）， M_3 （充電池（緑白） $\times 2$ ，3.4V）の 3 水準とする．

1.5 パラメータ設計の実験レイアウト

パラメータ設計では，制御因子を直交表に割り付ける．一般には， L_{18} 直交表が用いられることが多く，本実験でも L_{18} 直交表を用いる．表 1 に実験レイアウトを示す．

各 No. の設計条件に対し，信号因子を M_1 ， M_2 ， M_3 と変え，各信号因子ごとに誤差因子の条件を N_1 ， N_2 と変えて，データを測定する．例えば，No.1 は，すべての因子において第 1 水準で設定する．

本実験で用いる制御因子と水準を表 2 にまとめる．前（後）輪駆動はギアを外すことで対応すること．

1.5.1 ロバストネスの定量化

入出力のロバストネスは SN 比によって数値化する．SN 比は，信号因子の水準が 3 水準，誤差因子の水準が 2 水準で，各 1 回ずつデータを取り，データが表 3 の形でまとめられたとき，以下のように計算する．

表 1 パラメータ設計の実験レイアウト

列 No.	A	B	C	D	E	F	G	H	M_1		M_2		M_3	
	1	2	3	4	5	6	7	8	N_1	N_2	N_1	N_2	N_1	N_2
1	1	1	1	1	1	1	1	1						
2	1	1	2	2	2	2	2	2						
3	1	1	3	3	3	3	3	3						
4	1	2	1	1	2	2	3	3						
5	1	2	2	2	3	3	1	1						
6	1	2	3	3	1	1	2	2						
7	1	3	1	2	1	3	2	3						
8	1	3	2	3	2	1	3	1						
9	1	3	3	1	3	2	1	2						
10	2	1	1	3	3	2	2	1						
11	2	1	2	1	1	3	3	2						
12	2	1	3	2	2	1	1	3						
13	2	2	1	2	3	1	3	2						
14	2	2	2	3	1	2	1	3						
15	2	2	3	1	2	3	2	1						
16	2	3	1	3	2	3	1	2						
17	2	3	2	1	3	1	2	3						
18	2	3	3	2	1	2	3	1						

$$S_m = \frac{(\text{6 個のデータの和})^2}{6} \quad (\phi = 1)$$

$$S_T = \text{6 個のデータの 2 乗和} \quad (\phi = 6)$$

$$\bar{M} = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{3}$$

$$r = 2 \left\{ (M_1 - \bar{M})^2 + (M_2 - \bar{M})^2 + (M_3 - \bar{M})^2 \right\}$$

$$S_\beta = \frac{\{(M_1 - \bar{M}) Y_1 + (M_2 - \bar{M}) Y_2 + (M_3 - \bar{M}) Y_3\}^2}{r} \quad (\phi = 1)$$

$$S_N = \frac{X_1^2 + X_2^2}{3} - S_m \quad (\phi = 1)$$

表 2 制御因子と水準

回												制御因子	水準		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	シャーシ	重りあり	重りなし	—
E	H	G	C	D	D	E	H	G	F	G	C	ギア	4:1	3.7:1	3.5:1
D	D	E	G	H	C	H	C	D	D	F	G	シャフト	中空	ノーマル	強化
B	C	F	E	C	F	B	F	E	E	H	F	ローラー	13mm	17mm	19mm
C	F	H	H	F	H	F	B	B	B	D	B	モーター	アトミック	レブ	トルク
F	E	B	F	G	G	G	D	C	C	C	D	タイヤ	ピンスパイク	バレル	スポンジ
G	G	D	D	B	B	D	E	F	H	E	H	ボディ	なし	ボディ A	ボディ B
H	B	C	B	E	E	C	G	H	G	B	E	駆動	四輪駆動	後輪駆動	前輪駆動

表 3 SN 比の計算

		入力 (3 水準)			計
		M_1	M_2	M_3	
ノイズ (2 水準)	N_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	X_1
	N_2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	X_2
計		Y_1	Y_2	Y_3	T

$$S_e = S_T - S_m - S_\beta - S_N \quad (\phi = 3) \text{ (ただし, 本実験では } S_e = 0 \text{ とする.)}$$

$$V_e = \frac{S_e}{3}$$

$$S_{N'} = S_N + S_e = S_T - S_m - S_\beta \quad (\phi = 4)$$

$$V_{N'} = \frac{S_{N'}}{4}$$

$$SN \text{ 比} : \hat{\eta} = 10 \log_{10} \frac{\frac{S_\beta - V_e}{r}}{V_{N'}} [db]$$

$$\text{感度} : \hat{S} = 10 \log_{10} \frac{S_\beta - V_e}{r} [db]$$

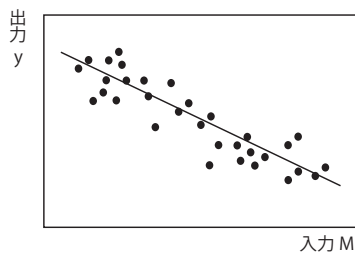


図 7 SN 比が低い (バラツキ大)

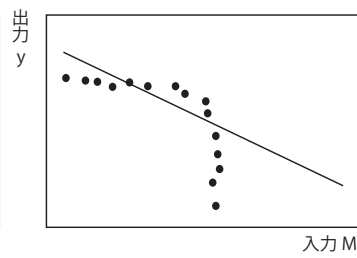


図 8 SN 比が低い (直線性が悪い)

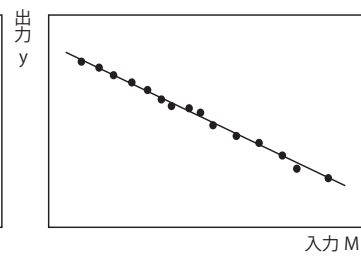


図 9 SN 比が高い (バラツキ小, 直線性)

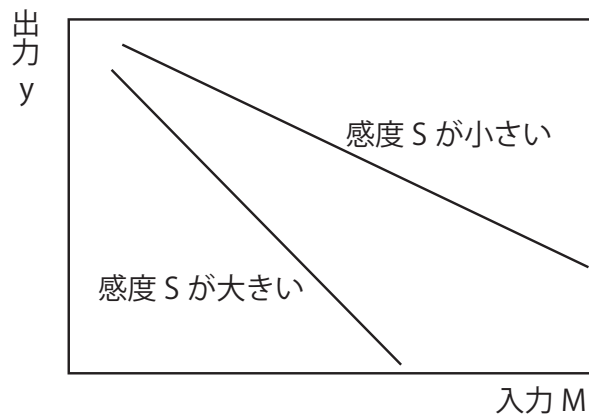


図 10 感度

1.6 制御因子の要因効果

表 4 のように各 No. ごとに SN 比と感度を求めたら, 各因子ごとに SN 比と感度に対する水準平均を計算する. 例えば, 因子 C の第 2 水準の SN 比の水準平均は, 表 4 の C 列における水準 2 に対応する SN 比を用いて平均を求める, すなわち,

$$\bar{C}_2^{\eta} = \frac{\eta_2 + \eta_5 + \eta_8 + \eta_{11} + \eta_{14} + \eta_{17}}{6}$$

である. 感度の水準平均 ($\bar{C}_2^S$) も同様に計算する. 各水準平均の値を基に要因効果図を作成する.

1.7 2 段階設計による最適化

第 1 段階では, SN 比の要因効果図から, SN 比が最大となる水準を選び, ロバストネスを最大化する. ここで, 「実験した制御因子のうち半分は効果を持ち, 残りの半分はあ

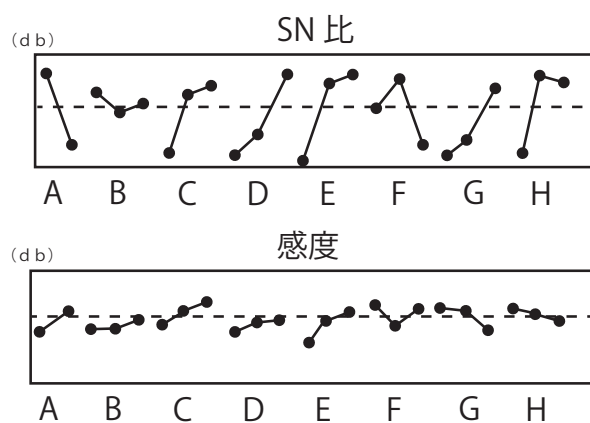


図 11 要因効果図

表 4 SN 比と感度

列 No.	A	B	C	D	E	F	G	H	SN 比	感度
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	η_1	S_1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	η_2	S_2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	η_3	S_3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	η_4	S_4
5	1	2	2	2	3	3	1	1	η_5	S_5
6	1	2	3	3	1	1	2	2	η_6	S_6
7	1	3	1	2	1	3	2	3	η_7	S_7
8	1	3	2	3	2	1	3	1	η_8	S_8
9	1	3	3	1	3	2	1	2	η_9	S_9
10	2	1	1	3	3	2	2	1	η_{10}	S_{10}
11	2	1	2	1	1	3	3	2	η_{11}	S_{11}
12	2	1	3	2	2	1	1	3	η_{12}	S_{12}
13	2	2	1	2	3	1	3	2	η_{13}	S_{13}
14	2	2	2	3	1	2	1	3	η_{14}	S_{14}
15	2	2	3	1	2	3	2	1	η_{15}	S_{15}
16	2	3	1	3	2	3	1	2	η_{16}	S_{16}
17	2	3	2	1	3	1	2	3	η_{17}	S_{17}
18	2	3	3	2	1	2	3	1	η_{18}	S_{18}
平均									$\bar{T}_\eta$	$\bar{T}_S$

表 5 SN 比と感度の推定値および実測値

条件	SN 比 [db]		感度 [db]	
	推定値	実測値	推定値	実測値
最適条件				
参照条件				
利得				

まり効果をもたない」という立場にたち，効果のある（落差の大きい）制御因子を SN 比および感度それぞれ 4 因子選ぶ．第 2 段階では，第 1 段階で選んだ感度の制御因子の水準を最大化する．ただし，選んだ制御因子が SN 比でも選ばれていたら，SN 比の水準を優先する．これにより，SN 比をあまり変えず，感度を大きく変える因子の水準を変え，目標値を目指す．

1.8 再現性の確認

最適条件の SN 比と感度が再現するかどうか参照条件との比較により確認する．参照条件は，すべての因子において第 2 水準をとるものとする．最適条件を決定する際に選択した SN 比，感度それぞれの制御因子（4 因子）より，SN 比および感度の推定値を

$$\hat{\eta} = \text{SN 比の全平均値} + \text{効果のある因子をその水準にした効果}$$

$$\hat{S} = \text{感度の全平均値} + \text{効果がある因子をその水準にした効果}$$

によって推定する．例えば，最適条件の SN 比の推定値は，効果のある因子およびその時の最適水準を， A_1, C_2, E_2, G_3 とすれば，

$$\hat{\eta}_O = \bar{T}_\eta + (\bar{A}_1^\eta - \bar{T}_\eta) + (\bar{C}_2^\eta - \bar{T}_\eta) + (\bar{E}_2^\eta - \bar{T}_\eta) + (\bar{G}_3^\eta - \bar{T}_\eta)$$

となる．同様に，参照条件における SN 比の推定値（ $\hat{\eta}_C$ ），最適条件及び参照条件における感度の推定値（ $\hat{S}_O, \hat{S}_C$ ）を求める．ここで，参照条件の推定値を求めるために用いる 4 つの因子は，最適条件の因子と同じであり，水準のみ異なる．（本実験の場合はすべて第 2 水準とする．）

続いて，確認実験をおこなう．制御因子を最適条件および参照条件に設定し，データを測定し，SN 比と感度を求める．以上の結果を表 5 にまとめる．利得とは最適条件と参照条件の差である．

一般には，推定値の利得と実測値の利得の差が $\pm 3[db]$ 以内であれば再現できたと判断する．

1.9 実験方法

- ・ I 班が重りありシャーシ，II 班が重りなしシャーシを使用し，表 1 のレイアウトに従って実験をおこなう．
- ・ タイムの測定は，まず，1 周走行させ，2 週目から 6 週目まで（5 周）のタイムを測定し， $M_i N_j$ における測定値とする．5 周走行しなかったり，コースから飛び出すことが続く場合は欠測値とし，あとで修正する．
- ・ タイムの測定が終了したら，各班のデータを集計し，表 1 の空欄を埋める．
- ・ 表 4 の SN 比と感度を計算する．
- ・ 水準平均を求め，SN 比および感度の要因効果図を描く．
- ・ 要因効果図から最適条件を求める．
- ・ 最適条件と参照条件における SN 比と感度の推定値を求め，さらに最適条件と参照条件におけるタイムを測定する．測定値から SN 比と感度を求め，表 5 を埋め，利得を求め，再現性を確認する．

2 課題

- ・ 機械工学の分野でパラメータ設計がどのように利用されているか，信号因子，制御因子，誤差因子を明らかにした上で内容を紹介しなさい．

（注）参照した文献のコピーを添付すること．

参考文献

- [1] 沖村，北宮，柳本，井上，広瀬，“ミニ四駆を用いたパラメータ設計の教材，”品質工学研究発表大会論文集，vol.16，pp.94-97，2008．
- [2] 榊，加藤，森，香川，木下，鈴木，，“レースで最速を目指した四駆のパーツ最適化，”品質工学研究発表大会論文集，vol.18，pp.146-149，2010．
- [3] 立林，「タグチメソッド入門」，日本経済新聞出版社，2009．
- [4] 立林，「入門タグチメソッド」，日科技連出版社，2004．
- [5] 山田，立林，吉野，「パラメータ設計・応答曲面法ロバスト最適化入門」，日科技連出版社，2012．

実験上の注意

- ・ 電池の扱いに注意すること．ショートさせないこと．(やけどに注意．)
- ・ 組立て作業はトレイの上でおこなうこと．(部品を紛失しないこと．)

参考

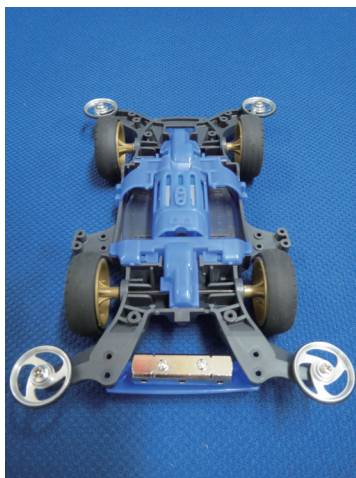


図 12 シャーシ (重りあり)

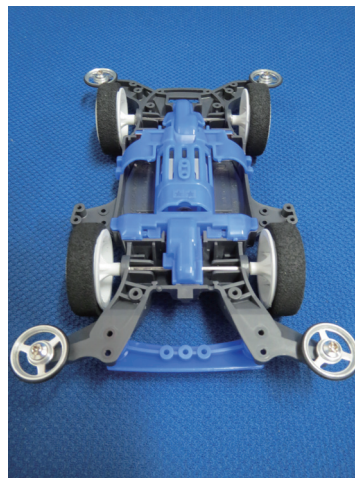


図 13 シャーシ (重りなし)

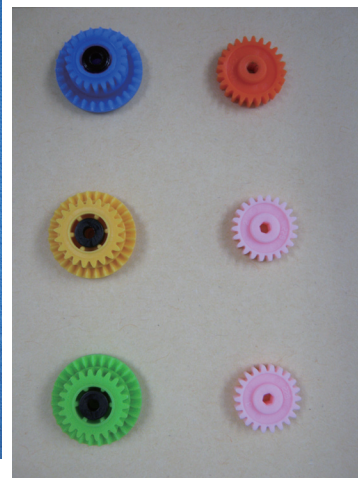


図 14 ギア (上から 4:1, 3.7:1, 3.5:1)



図 15 シャフト (左から ノーマル, 中空, カーボン)

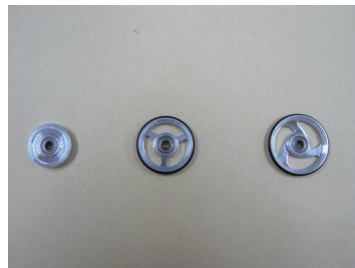


図 16 ローラー (左から 13mm, 17mm, 19mm)



図 17 モーター (左から レブ, アトミック, トルク)



図 18 タイヤ（左からピンスパイク，バレル，スポンジ）



図 19 ボディ A



図 20 ボディ B