
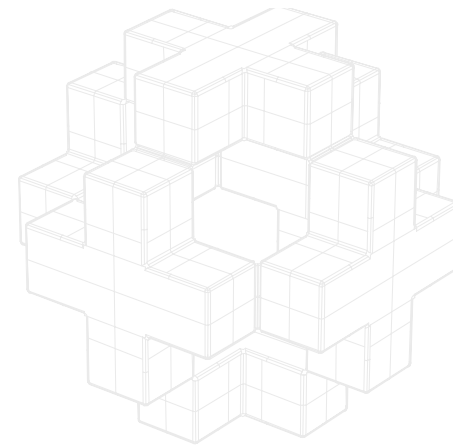

Chemical Product Design

Sungwoo Cho and Chonghun Han
Intelligent Process Systems Laboratory
School of Chemical and Biological Engineering
Seoul National University

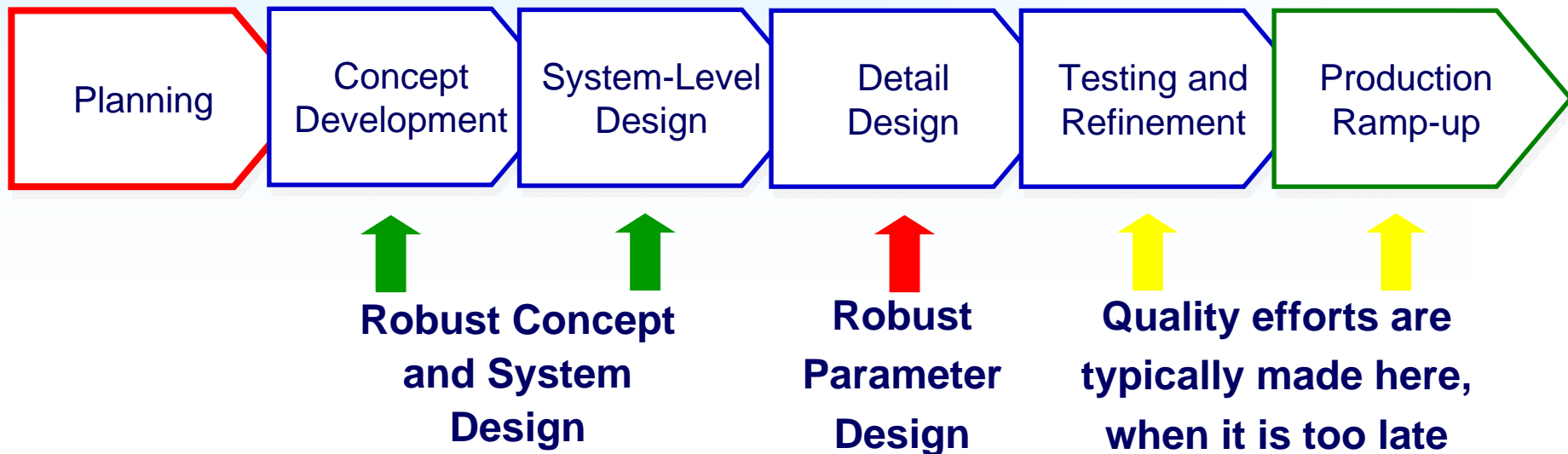


PART XI. Robust Design

- Robust Design



Robust Design and Quality in the Product Development Process



Robust Design

Goals for Designed Experiments

- ◆ Understanding relationships between design parameters and product performance
- ◆ Understanding effects of noise factors
- ◆ Reducing product or process variations

Robust Designs

A robust product or process performs correctly, even in the presence of noise factors

Noise factors may include:

- ◆ Parameter variations
- ◆ Environmental changes
- ◆ Operating conditions
- ◆ Manufacturing variations

Application Cases

Robust Design Case: PING

PING
38 Years of What Works.

ISI IRON SERIES

- Intensified weighting on the perimeter ensures consistent distance and accuracy
- Unique cavity design perfects the tone and feel of the club on impact
- Nickel alloy is tougher than copper or stainless steel but produces the softest feel
- Density of copper intensifies weight in key areas to provide maximum forgiveness on off-center hits
- Finely-tuned cavity design provides consistency across the club face

ISI STAINLESS IRONS
With New Cushin Insert

- Offers the same innovative design found in the copper and nickel models
- Controls unwanted vibrations, providing a more positive feel
- Improved optics, slimmer top line

1 Iron - Ditching wedge, W 47°, W2 49.5°, S 52°, S2 54.5°, S3 57° & L 61° in men's & ladies' right hand. ISI irons are available with Cushin steel or graphite shafts.

CUSHIN SHAFT

- Selective filtering insert
- Filters unwanted frequencies for more positive feedback

ZING 2 IRONS and WEDGES

- Designed to increase the effective hitting area
- Provides maximum forgiveness on off-center hits
- Features extreme weighting

1 Iron - pitching wedge, SW, LS & LW in men's & ladies' right & left hand. ZING 2 Irons & wedges are available with steel or graphite shafts. Zing 2 BeCu wedges available in right hand only.

ALSO FOR LADIES

NEW FOR '97

ALSO FOR LADIES

Application Cases

Robust Design Case: AKIA

미스샷 방지 설계 적용한 '아키아' 드라이버 출품

Source: 매일경제신문, 2003.3.17

KOREA GOLF SHOW
2003. 3. 28 ~ 3. 31 (3일간)

세한인터내셔널

요즘 나오는 골프채들은 어느 정도 미스 히트가 돼도 목표와 비슷한 방향으로 나갈 수 있도록 첨단 기술을 접목하고 있다. 일본 아키아(AKIA)사는 아예 자사의 머리글자와 인공지능(Artificial Intelligence)을 동시에 뜻하는 'A(Artificial)시리즈'를 내놨다.

세한인터내셔널이 수입판매하는 A1 드라이버(사진)는 380cc 빅헤드를 2피스 공법으로 제작했다.

단조 베타 티타늄 페이스(2.6mm)로 최상의 터지감은 물론 반발력이 뛰어나 거리 증대 효과도 낼 수 있다는 설명이다.

숏(바닥)은 미스샷을 최대한 방지할 수 있는 텅스텐 스크류바를 설치해 헤드가 빨리 닫히거나 열리는 것을 방지할 수 있도록 했다. 샤프트는 일본 미쓰비시레이온사에서 제작한 샤프트를 채용했다.

A시리즈 페어웨이우드는 볼을 띄우기 편안한 저중심 헤드 설계가 특징. 신개념인 '물결무늬' 시스템으로 디자인해 어떠한 지형에서도 샷을 편안하게 할 수 있다.

이번 전시회에서 인기를 모을



것으로 기대하는 '치바-101'과 '치바-201' 아이언은 골프채 설계 명인인 일본 치바 후미오 씨가 직접 참여한 제품.

'치바-101' 아이언은 그가 손수 전 과정을 수공 제작한 연철 단조 아이언으로서 숏과 넥 부분이 클럽별로 각기 다르게 디자인됐다.

웨이트 밸런스가 토쪽에 있는 몰아이언은 볼을 띄우기 쉬운 구즈넥 스타일로 돼 있다. 또 미들 아이언은 웨이트 밸런스가 중앙에 있어 방향성이 뛰어나며 정확한 임팩트를 구사할 수 있는 세미 구즈넥 스타일로 돼 있다. 쇼트 아이언은 웨이트 밸런스가 윗쪽에 가까이 있고 스트레이트넥 스타일로 디자인돼 정교한 샷을 구사할 수 있다. (02)511-4770

Application Cases

Robust Design Case: *Digital Camera vs. Tank*

시속 60km 모래폭풍에 작전 올스톱

안성규 중군기자 이라크국경 사막체험

미국-멕시코 국경에는 죽음의 사막이 있다. 길을 잃으면 팔라 막는다. 이곳 중 동리 사막에도 죽음의 공포가 있다. 거센 모래폭풍 때문이다. 사막(沙漠)이 되면 사풍(死風)이 된다.



기자가 태어난 캘리포니아에 있는 이라크 국경 사막 시대에는 지난 주말 이래 계속 모래폭풍이 불어닥쳤다. 모래 먼지 탓에 디지털 카메라가 고장났다. 지난 12일 기자는 카메라를 고치러 부대를 벗어나 쿠웨이트시를 찾았다. 오후 8시를 무대로 돌아가려고 고속도로에 걸어들어갈 길에 모래가 날리기 시작했다. 눈 앞에는 먼지 안개가 걸렸다. 쿠웨이트인 운전사는 속도를 꼭 떨어뜨렸다.

큰 길에서 벗어나지 차 안은 어둠 먼지로 가득했다. "두두두두" 바람에 실려온 모래가 자동차를 때렸다. 정신을 제압 차리고 더군 차량의 후

대행인을 따라갔다. 시막에 난 길이 잘 안보였다. 아차 싶더니 그런 더군 차량을 놓았다. 거북이처럼 차를 몰다 도로사설물을 확인하려 차에서 내렸다.

순간 팔가 온몸을 때렸다. 모래폭풍이었다. 모래와 먼지가 더군에서 솟구쳐서는 폭풍지대에 휘날려 세차게 피오리를 친다. 앞이 안보였다. 길 하나를 사이에 둔 자동차의 뒷바퀴

한치앞 안보여 헬기 못떠 뒤쫓던 미군차 놓치기도

뿐만 먼지 속에 가뭇거렸다. 영을 몰아보자 철축세의 모래안개 가 기자를 포위했다. "여기에 관해 있다가는 죽을 수도 있겠다"는 생각이 들었다. 차를 돌려 도망치듯 사막을 빠져나왔다.

모래폭풍은 더군을 고갈하게 만든다. 12일 폭풍은 시속 60km를 기록했다. 부대는 거의 모든 작전을 중지해야 했다. 특히 헬리콥터들은 뛰노도 못했다. 항공 보급을 담당하는 장교



미군 해병대원들이 12일 모래 바람이 부는 쿠웨이트 사막에서 전술훈련을 받고 있다. [쿠웨이트시프 모이러-뉴스시스]

는 "폭풍 때문에 작전이 취소됐다. 먼지 등으로 가시거리가 짧아지면 헬기를 띄울 수 없다"고 말했다. 쿠웨이트 내 치상군 가운데 가장 앞에 배치돼 있는 헬프 부대의 3대 아라비헬기 공격부대.

헬기들은 이라크의 지상군 부대를 영격해야 하는 임무를 맡고 있다. 헬기 조종사나 지원관들은 사막폭풍에 걱정이 많다. 그레고리 케스 대령은 "사막의 폭풍은 헬기를 무력하게

만든다. 우리는 많은 훈련을 취소해야 했다"고 말했다. 그는 "공격 명령만을 기다려 왔는데 폭풍이 계속되면 헬기 공격은 힘들 것"이라고 걱정했다.

모래바람이 강하게 불면 아라비헬기 훈련과 각종 음성통신이 장애를 받는다. 컴퓨터 같은 비공인 전자장비도 고장이 잘 난다. 그러나 사막의 폭풍이 미군의 진격을 막을 수는 없을 것이다. 헬기는 시야를 자주 확보하는 모래바람을 견디게 설계됐다. 미

군의 공신 데이브워스 대령은 무시할 것을 중히 모래폭풍 속에서도 일을 보며 전진할 수 있다.

이라크에 초기 용다폭풍을 다다려 게 될 폭풍기도 모래폭풍에 별로 영향을 받지 않는다고 한다. 폭풍과 뒤도 날기 때문이다.

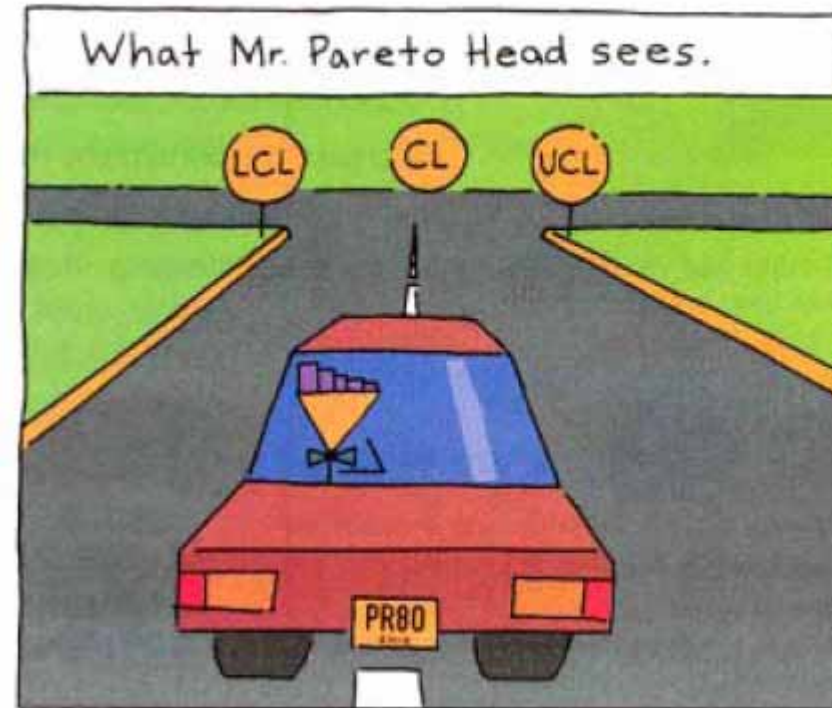
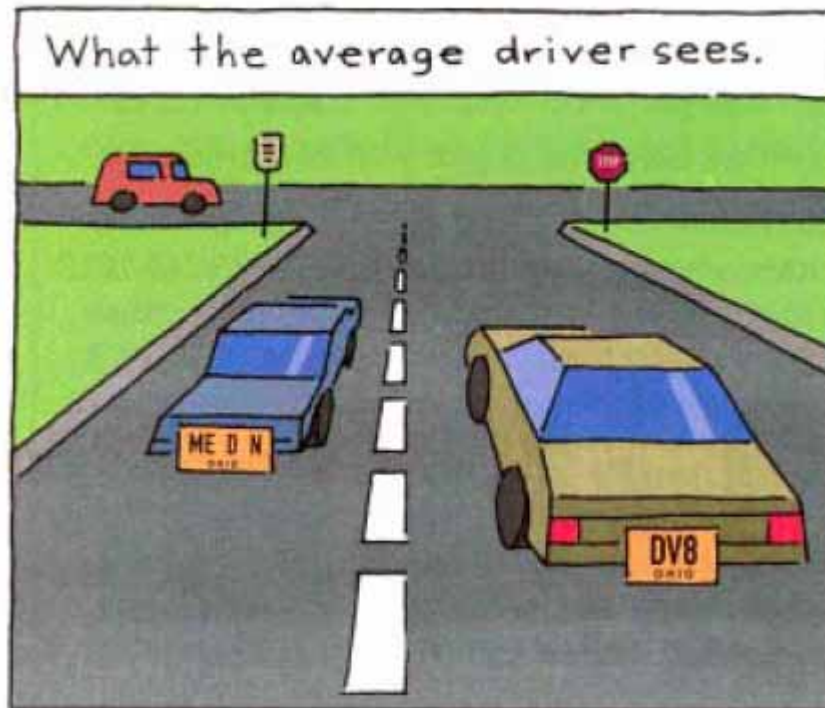
16천부지원단의 브라운 리오시 소령은 "일부 작전이 폭풍의 영향을 받는 것은 사실이나 공격 기사 자체에는 문제가 없다"고 자신했다.

Robust Design

What is the better picture ???

Mr. Pareto Head

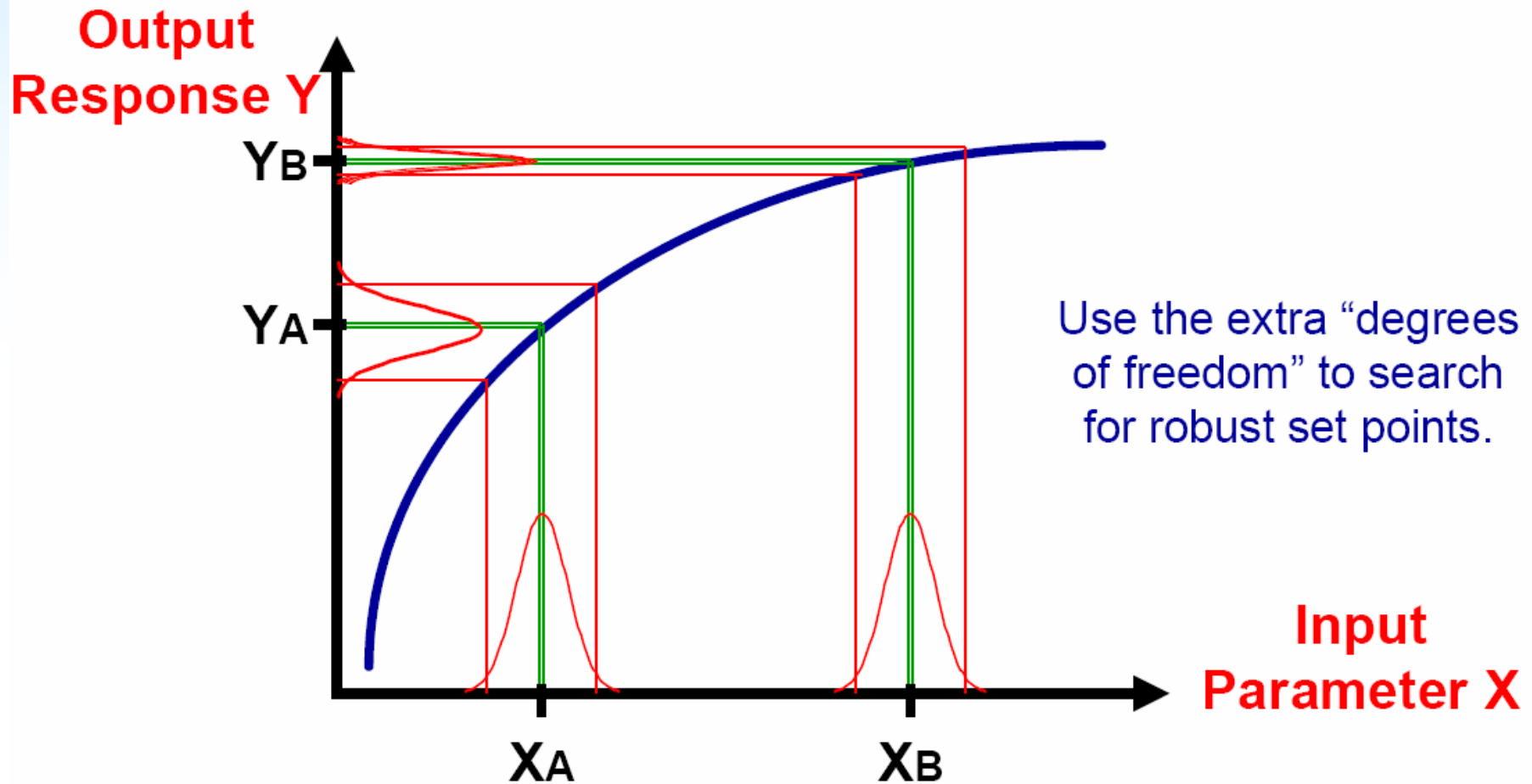
by Mike Crossen



© 2003 Mike Crossen

Robust Design

Exploiting Non-Linearity

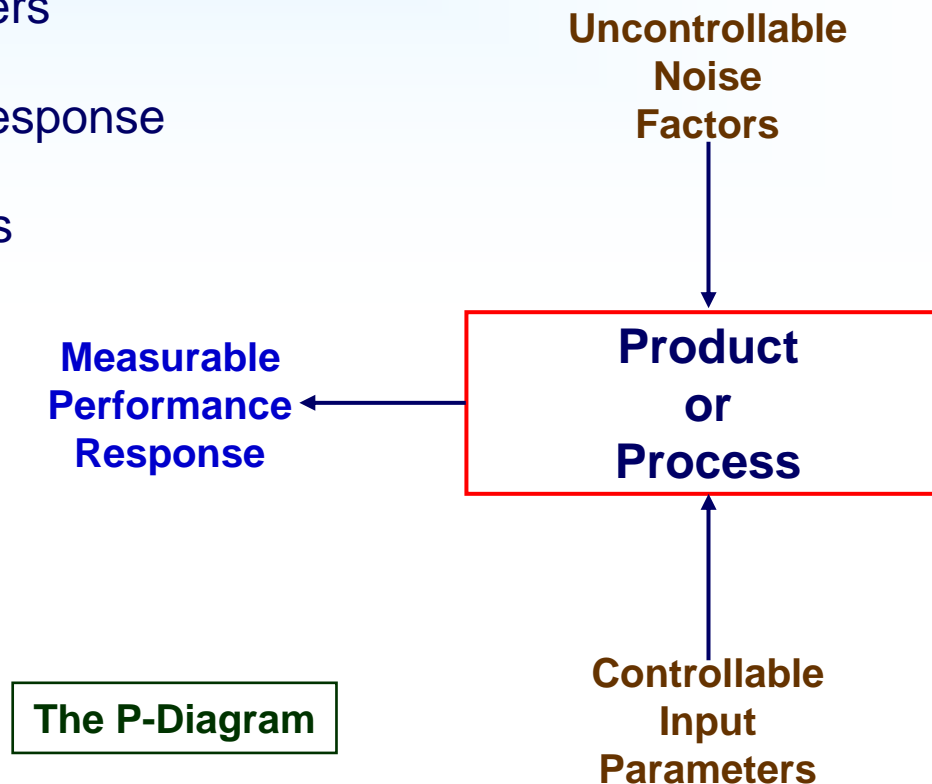


Parameter Design Procedure

Step 1: P-Diagram

Step 1: Select appropriate controls, response, and noise factors to explore experimentally.

- ◆ Controllable input parameters
- ◆ Measurable performance response
- ◆ Uncontrollable noise factors



Parameter Design Procedure

Step 1: P-Diagram Example – *Brownie Mix*

◆ Controllable Input Parameters

- Recipe ingredients (quantity of eggs, flour, chocolate)
- Recipe directions (mixing, baking, cooling)
- Equipment (bowls, pans, oven)

◆ Uncontrollable Noise Factors

- Quality of ingredients (size of eggs, type of oil)
- Following directions (stirring time, measuring)
- Equipment variations (pan shape, oven temp)

◆ Measurable Performance Response

- Taste testing by customers
- Sweetness, moisture, density

Parameter Design Procedure

Step 2: Objective Function

Step 2: Define an objective function (of the response) to optimize.

- ◆ Maximize desired performance
- ◆ Minimize variations
- ◆ Quadratic loss
- ◆ Signal-to-noise ratio

Types of Objective Function

Larger-the-Better
e.g. performance

$$f(y) = y^2$$

Nominal-the-Best
e.g. target

$$f(y) = 1 / (y - t)^2$$

Smaller-the-Better
e.g. variance

$$f(y) = 1 / y^2$$

Signal-to-Noise
e.g. trade-off

$$f(y) = 10 \log[\mu^2 / \sigma^2]$$

Parameter Design Procedure

Step 3: Plan the Experiment

Step 3: Plan experimental runs to elicit desired effects.

- ◆ Use full or fractional factorial designs to identify interactions
- ◆ Use an orthogonal array to identify main effects with minimum of trials
- ◆ Use inner and outer arrays to see the effects of noise factors

Parameter Design Procedure

Step 3: Plan the Experiment – *Full Factorial*

- ◆ Consider **k** factors, **n** levels each
- ◆ Test all combinations of the factors
- ◆ The number of experiment is **n^k**
- ◆ Generally this is too many experiments, but we are able to reveal all of interactions

Expt. #	Parameter A	Parameter B
1	A1	B1
2	A1	B2
3	A1	B3
4	A2	B1
5	A2	B2
6	A2	B3
7	A3	B1
8	A3	B2
9	A3	B3



2 factors, 3 level each:
 $n^k = 3^2 = 9$ trials

4 factors, 3 level each:
 $n^k = 3^4 = 81$ trials

Parameter Design Procedure

Step 3: Plan the Experiment – *One Factor at a Time*

- ◆ Consider **k** factors, **n** levels each
- ◆ Test all levels of each factor while freezing the others at nominal level
- ◆ The number of experiment is **$nk + 1$**
- ◆ BUT this is an *unbalanced* experiment design

Expt. #	Parameter A	Parameter B	Parameter C	Parameter D
1	A1	B1	C2	D2
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C2	D2
4	A2	B1	C2	D2
5	A2	B2	C2	D2
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C2	D1
9	A3	B3	C2	D3

4 factors, 2 levels each:

$$nk + 1 =$$

$$2 * 4 + 1 = 9 \text{ trials}$$

Parameter Design Procedure

Step 3: Plan the Experiment – *Orthogonal Array*

- ◆ Consider **k** factors, **n** levels each
- ◆ Test all levels of each factor in a balanced way
- ◆ The number of experiment is order of **$1 + k(n-1)$**
- ◆ This is the smallest balanced experiment design
- ◆ **BUT** main effects and interactions are confounded

Expt. #	Parameter A	Parameter B	Parameter C	Parameter D
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C1	D3
9	A3	B3	C2	D1

4 factors, 3 levels each:

$$1 + k(n-1) = \\ 1 + 4(3-1) = 9 \text{ trials}$$

Parameter Design Procedure

Step 3: Plan the Experiment – *Using Inner and Outer Arrays*

- ◆ Induce the same noise factor levels for each combination of controls in a balanced manner

4 factors, 3 levels each:
L9 inner array for controls

3 factors, 2 levels each:
L4 outer array for noise

A1	B1	C1	D1	E1	E1	E2	E2
A1	B2	C2	D2	F1	F2	F1	F2
A1	B3	C3	D3	G2	G1	G2	G1
A2	B1	C2	D3				
A2	B2	C3	D1				
A2	B3	C1	D2				
A3	B1	C3	D2				
A3	B2	C1	D3				
A3	B3	C2	D1				

Inner * Outer =
L9 * L4 =
36 trials

Parameter Design Procedure

Step 4: Run the Experiment

Step 4: Conduct the experiment

- ◆ Vary the input and noise parameters
- ◆ Record the output response
- ◆ Compute the objective function

Parameter Design Procedure

Step 4: Run the Experiment – *Paper Airplane Experiment*

Expt. #	Weight	Winglet	Nose	Wing	Trials	Mean	Std. Dev	S / N
1	A1	B1	C1	D1				
2	A1	B2	C2	D2				
3	A1	B3	C3	D3				
4	A2	B1	C2	D3				
5	A2	B2	C3	D1				
6	A2	B3	C1	D2				
7	A3	B1	C3	D2				
8	A3	B2	C1	D3				
9	A3	B3	C2	D1				

Parameter Design Procedure

Step 5: Conduct Analysis

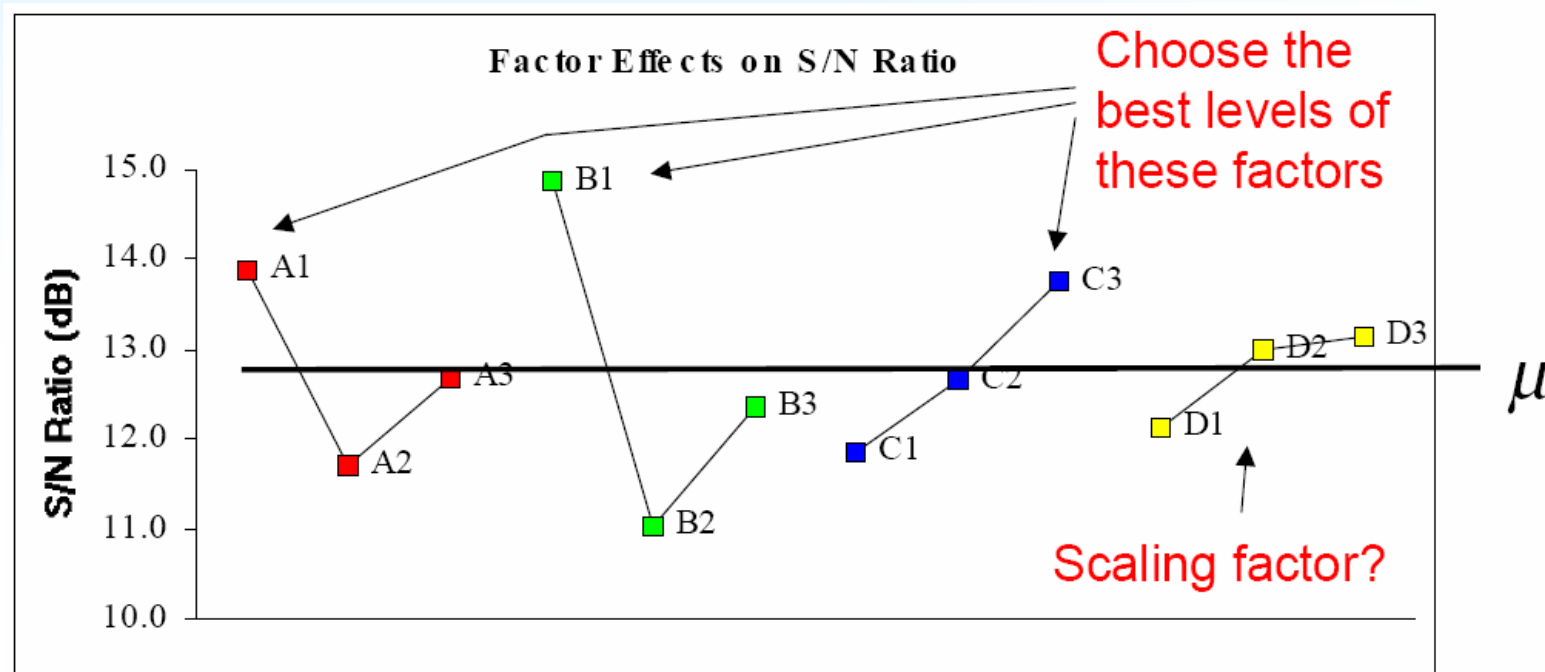
Step 5: Perform analysis of means

- ◆ Compute the mean value of the objective function for each parameter setting
- ◆ Identify which parameters reduce the effects of noise and which ones can be used to scale the response. (2-Step Optimization)

Parameter Design Procedure

Step 5: Conduct Analysis – Analysis of Means (ANOM)

Plot the average effect of each factor level



Prediction of Response

$$E[\eta(A_i, B_j, C_k, D_l)] = \mu + a_i + b_j + c_k + d_l$$

Parameter Design Procedure

Step 6: Select Parameter Setpoints

Step 6: Select parameter setpoints

- ◆ Choose parameter settings to maximize or minimize objective function
- ◆ Consider variations carefully. (Use ANOM on variance to understand variation explicitly.)

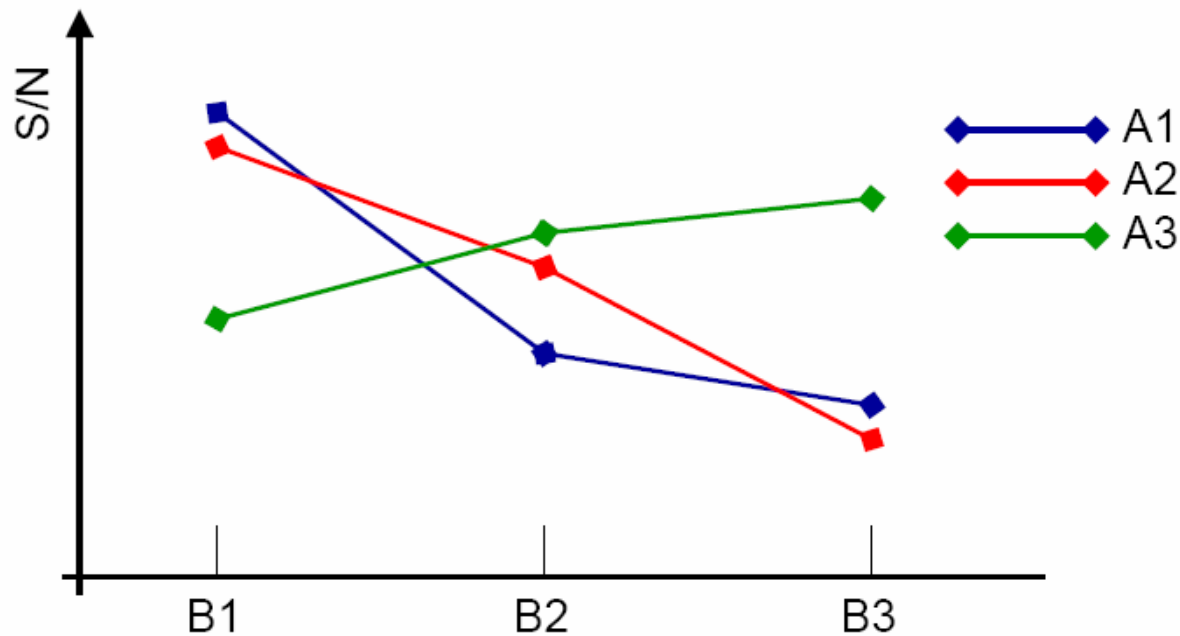
Advanced Use:

- ◆ Conduct confirming experiments
- ◆ Set scaling parameters to tune response
- ◆ Iterate to find optimal point
- ◆ Use higher fractions to find interaction effects
- ◆ Test additional control and noise factors

Parameter Design Procedure

Step 6: Select Parameter Setpoints – Confounding Interactions

- ◆ Generally the main effects dominate the response. But sometimes **interactions** are important. This is generally the case when the confirming trial fails.
- ◆ To explore interactions, use a fractional factorial experiment design.



Parameter Design Procedure

Alternative Experiment Design Approach: Adaptive Factor One at a Time

- ◆ Consider **k** factors, **n** levels each
- ◆ Start at nominal levels
- ◆ Test each level of each factor one at a time, while freezing the previous ones at **best level so far**
- ◆ The number of experiment is order of **$nk + 1$**
- ◆ Since this is an **unbalanced** experiment design, it is generally OK to stop early
- ◆ Helpful to sequence factors for strongest effects first
- ◆ Generally found to work well when interactions are present

Expt. #	Param. A	Param. B	Param. C	Param. D	Response
1	A1	B1	C2	D2	5.95
2	A1	B2	C2	D2	5.63
3	A1	B3	C2	D2	6.22
4	A2	B1	C2	D2	6.70
5	A2	B2	C2	D2	6.58
6	A2	B3	C1	D2	4.85
7	A3	B1	C3	D2	5.69
8	A3	B2	C2	D1	6.60
9	A3	B3	C2	D3	6.98

4 factors, 2 levels each:

$$nk + 1 =$$

$$2 * 4 + 1 = 9 \text{ trials}$$

Ref: Forthcoming paper
by Dan Frey

Key Concepts of Robust Design

- ◆ Variation causes quality loss
- ◆ Two-step optimization
- ◆ Matrix experiments (orthogonal arrays)
- ◆ Inducing noise (outer array or repetition)
- ◆ Data analysis and prediction
- ◆ Interactions and confirmation