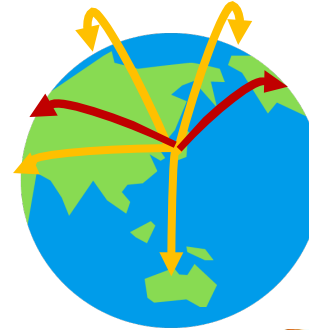


設計プロジェクトにおける 追加タスクの影響を最小化するためのロバスト最適化

○原田潤一 小蔵正輝 杉本謙二（奈良先端科学技術大学院大学）
岸田昌子（国立情報学研究所）

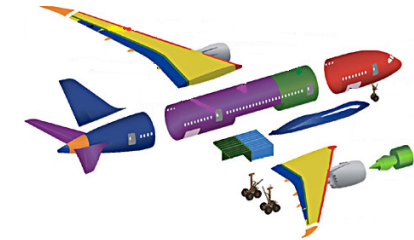
近年の製品開発

- 市場のグローバル化
- 製品の複雑化



外乱の要因が増えている

— 各国の政策や規制, ニーズの変化 ...



製品開発マネジメントの課題

不確実性の取り扱い — プロジェクトの進捗に影響
外乱に対して頑健かどうか

➡ **目的**：製品開発のための**ロバスト性**の分析手法の提案

固有値分析 — どのタスクの進捗が時間がかかるか

➤開発タスクの相互依存性：DSM や WTM

➤製品開発の進捗：線形システム

Design Structure Matrix と Work Transformation Matrix

(DSM)

[1]

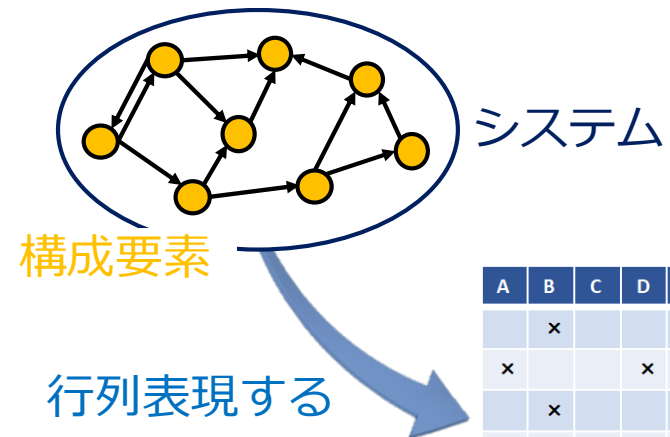
(WTM)

[2] [3]

タスク間の複雑な相互依存関係



- ① システムとして捉える
- ② 依存関係を行列として表現する

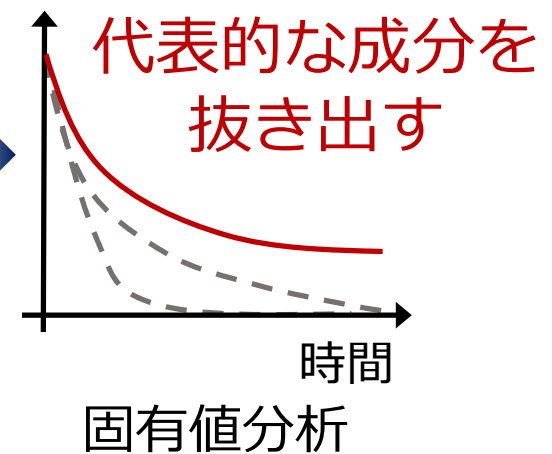
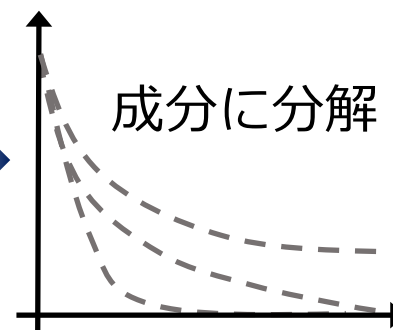
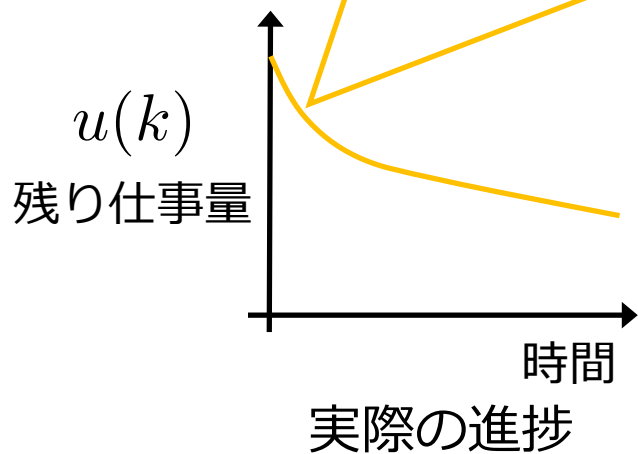


固有値分析 — どのタスクの進捗が時間がかかるか

- 開発タスクの相互依存性：DSM や WTM
- 製品開発の進捗：線形システム

線形システム [4]

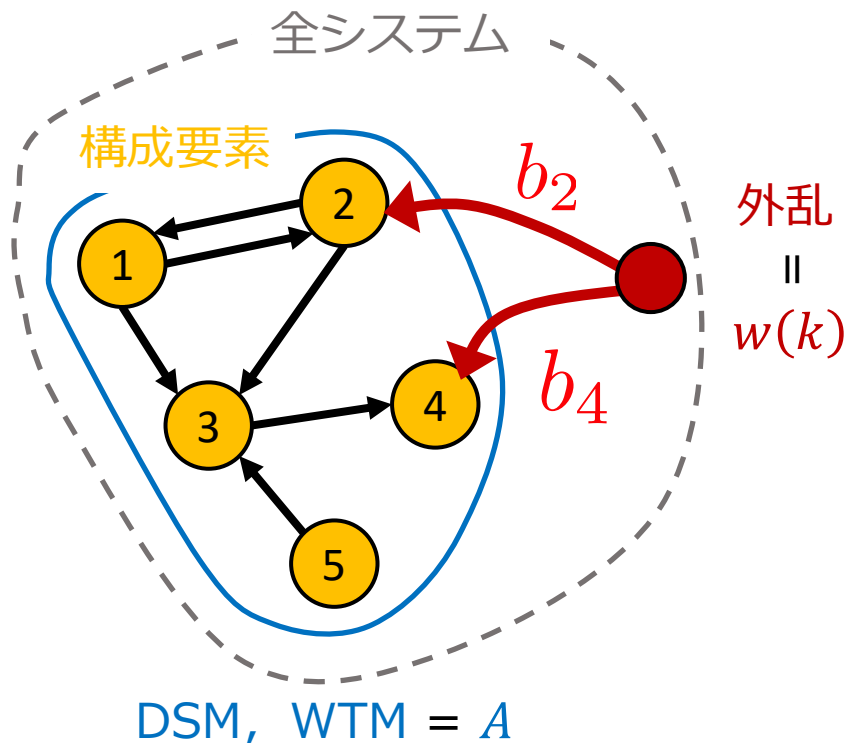
$$u(k+1) = Au(k) \quad A : \text{DSM, WTM}$$



➡ 進捗を評価する際に**外乱**が考慮されていない

外乱の導入 → 外乱を考慮した製品開発のモデル

$$u(k+1) = Au(k) + bw(k) \quad [5]$$



$u(k)$: 時刻 k における残り仕事量
 A : DSM, WTM
 $w(k)$: 外乱

従来のモデル

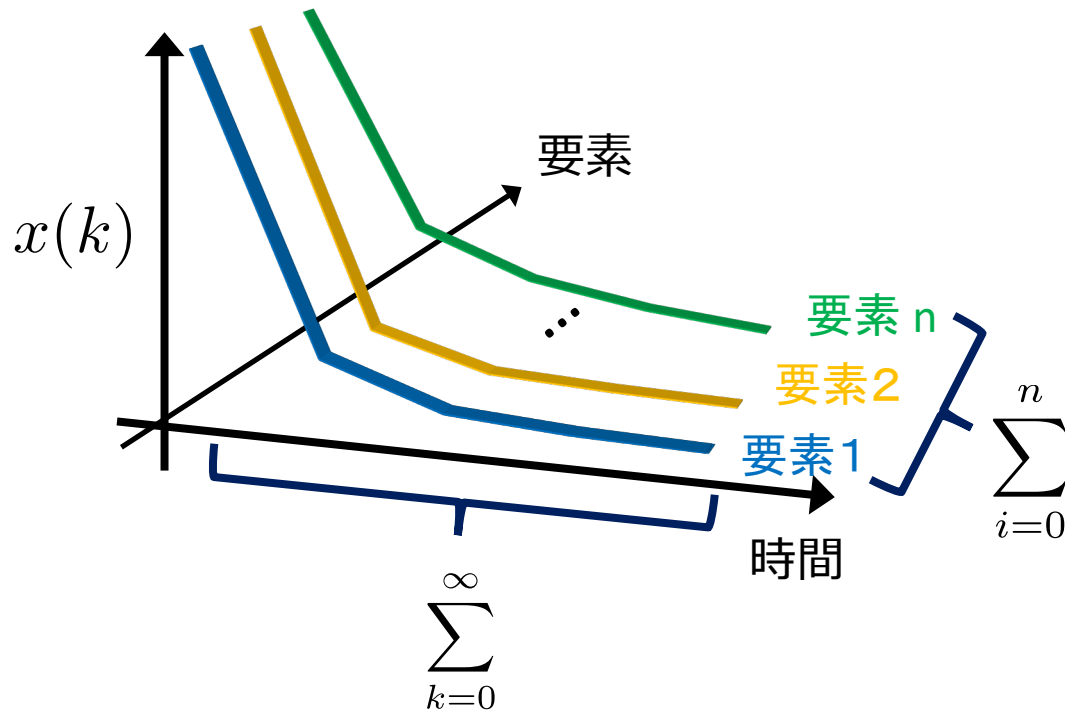
— 外乱がない状態で進捗を評価

本モデル

— 外乱がある状態で進捗を評価

→ 定量的な評価指標

ロバスト性 — 外乱によるプロジェクト全体への影響度



l_1 ノルム

$$\|x(k)\|_{l_1} = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=0}^n |x_i(k)|$$

時間方向と要素方向の和

システムが外乱から受ける影響度

$$\gamma = \sup \frac{\| \text{進捗度} \|_{l_1}}{\| \text{外乱} \|_{l_1}}$$

最悪な外乱が入った時に
どれほど進捗度に影響するか

目標：外乱によるプロジェクト全体への影響を最小化

→ どの要素への外乱を防ぐべきか（ベクトル b ）を最適化

設計変数

- ベクトル b

与条件

- DSM, WTM A
- コスト制約 \bar{c}

$$u(k+1) = Au(k) + bw(k)$$

目的関数

- 外乱による影響度 γ

minimize γ

$$\gamma = \sup_{w \in l_1^+ \setminus \{0\}} \frac{\|u(k)\|_{l_1}}{\|w(k)\|_{l_1}}$$

$$0 < \underline{b}_i \leq b_i \leq \bar{b}_i$$

$$F(b) \leq \bar{C}$$

$$A^T p - p + I < 0$$

$$B^T p - \gamma < 0$$

ただし, $F(b)$ は b を調整するコスト

$$F(b) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i^{-q} - \bar{b}_i^{-q}}{\underline{b}_i^{-q} - \bar{b}_i^{-q}}$$

凸最適化問題へ帰着 \longrightarrow geometric program

geometric program [5]

以下の形で表現される最適化問題は凸最適化問題に帰着される

$$\text{minimize } f_0(x)$$

$$\text{subject to } f_i(x) \leq 1, i = 1, 2, \dots, m,$$

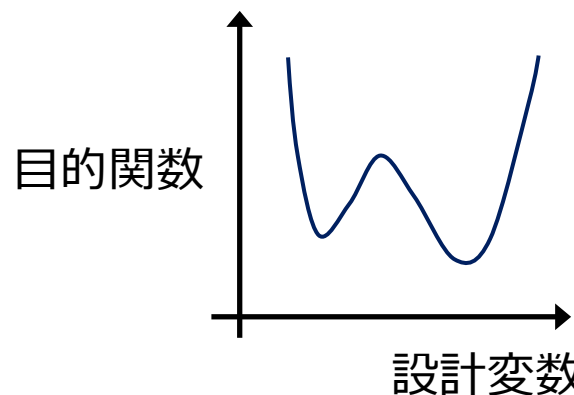
$$x > 0.$$

ただし, $f_i(x) = \sum_{k=1}^K c_k x_1^{a_{1k}} x_2^{a_{2k}} \dots x_n^{a_{nk}}$ の形で表現される関数

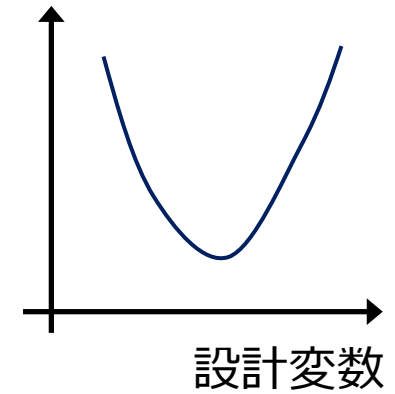
geometric programに帰着

凸最適化問題に帰着

効率良く最適化できる



一般的な最適化問題



凸最適化問題

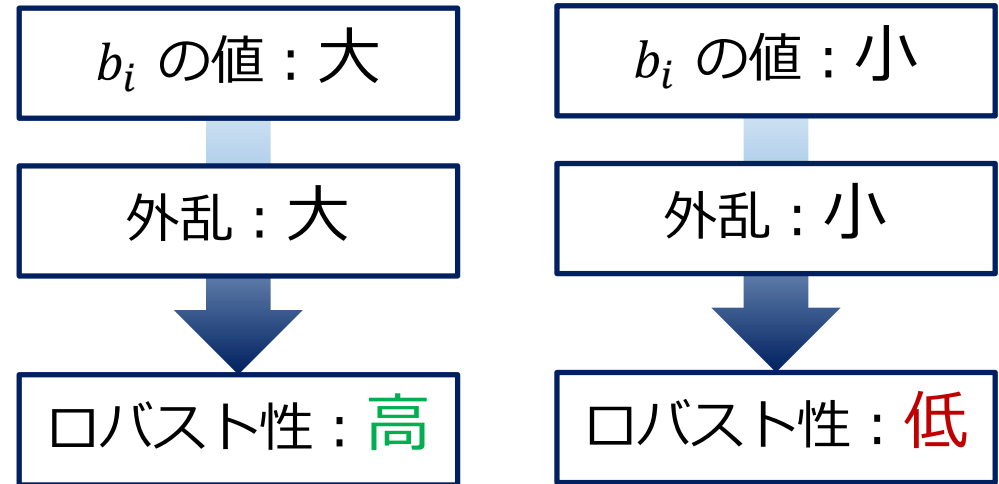
自動車用ブレーキシステム開発のWTM [6]

- Smith らが分析
- 対象 : 自動車用ブレーキシステムの設計パラメータ
- 要素数 : 28個

Knuckle envelope & attach pts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	
Pressure at rear wheel lock up	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0.05	0	0.05	0	0	0	
Brake torque vs. skidpoint	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0.25	0	0.25	0	0	0	
Line pressure vs. brake torque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0.05	0	0	
Splash shield geometry-front	0.05	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0.05	0	0	0.25	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.25	0	
Drum envelope & attach pts	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bearing envelope & attach pts	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	
Splash shield geometry-rear	0.05	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Air flow under car/wheel space	0	0	0	0	0.25	0	0	0.25	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Wheel material	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Wheel design	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tire type/material	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Vehicle deceleration ratenents	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.25	0	0.05	0	0	0	
Temperature at components	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0.25	0	0	0	0	0.05	
Rotor cooling coefficient	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0.25	0.05	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	
Lining-rear vol and area	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	
Rotor width	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.25	0.05	
Pedal attach pts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Dash deflection	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pedal force (required)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0.05	0.25	0	0.5	0.25	0.05	0	0	0	
Lining material-rear	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0.05	0	0	0.25	0.05	0	0	0	
Pedal mechanical advantage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0.25	0.05	0	0	0	
Lininf-front vol & swept area	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	
Lining material-front	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.05	0	0.5	0.25	0	
Booster reaction ratio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.25	0	0.25	0	0.05	0	0	0	
Rotor diameter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0	0.05	0.05	0	0.25	0.05	0	
Rotor envelope & attach pts	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Rotor material	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0

設計 パラメータ	固有値 分析	提案 手法
Knuckle envelope & attach pts	0.9636	0.7101
Pressure at rear wheel lock up	0.5219	0.9708
Brake torque vs. skidpoint	0.4648	0.7927
Line pressure vs. brake torque	0.6457	0.5907
Splash shield geometry-front	0.7392	0.8854
Drum envelope & attach pts	0.9972	1.0000
Bearing envelope & attach pts	0.9612	1.0000
Splash shield geometry-rear	0.9589	0.8854
Air flow under car/wheel space	0.8679	0.5667
Wheel material	0.9833	1.0000
Wheel design	0.9549	0.6006
Tire type/material	0.8757	1.0000
Vehicle deceleration ratenents	0.1859	1.0000
Temperature at components	0.6162	0.5485
Rotor cooling coefficient	0.7711	0.8072
Lining-rear vol and area	0.7157	1.0000
Rotor width	0.7743	0.8383
Pedal attach pts	0.6696	0.9624
Dash deflection	0.4712	0.7060
Pedal force (required)	0.1989	0.5053
Lining material-rear	0.6789	0.4470
Pedal mechanical advantage	0.4088	0.2776
Lininf-front vol & swept area	0.6620	0.9999
Lining material-front	0.3499	0.2391
Booster reaction ratio	0.4693	0.2141
Rotor diameter	0.7785	0.2846
Rotor envelope & attach pts	0.9868	0.4557
Rotor material	0.8065	0.4805

ベクトル b の解釈



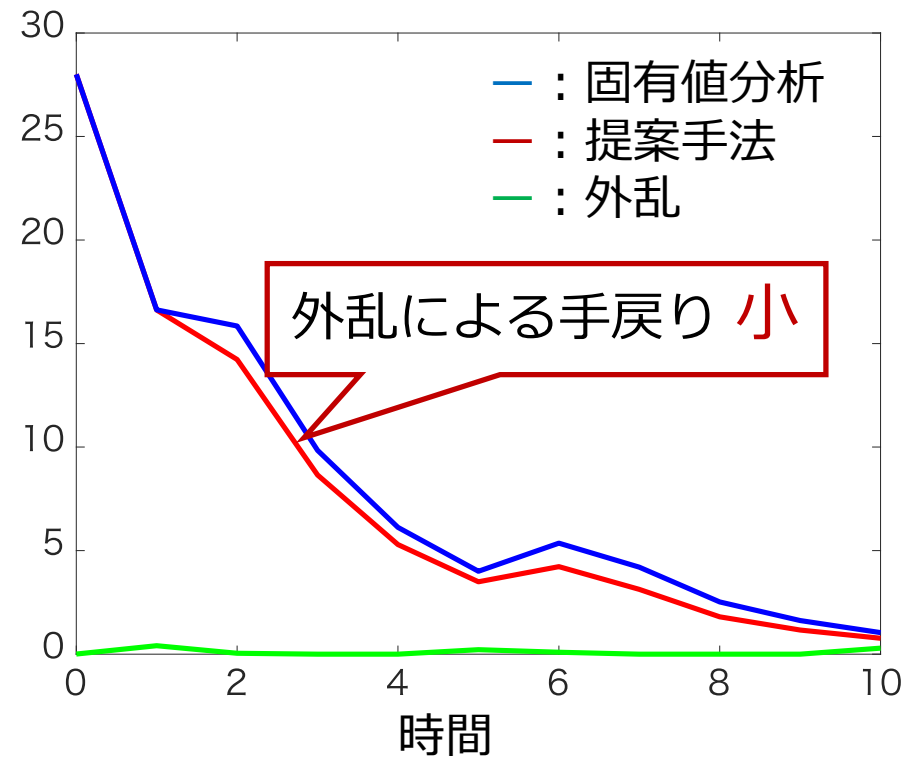
b_i の値の大小 = 外乱に対する強弱

ロバスト性解析が可能

設計 パラメータ	固有値 分析	提案 手法
Knuckle envelope & attach pts	0.9636	0.7101
Pressure at rear wheel lock up	0.5219	0.9708
Brake torque vs. skidpoint	0.4648	0.7927
Line pressure vs. brake torque	0.6457	0.5907
Splash shield geometry-front	0.7392	0.8854
Drum envelope & attach pts	0.9972	1.0000
Bearing envelope & attach pts	0.9612	1.0000
Splash shield geometry-rear	0.9589	0.8854
Air flow under car/wheel space	0.8679	0.5667
Wheel material	0.9833	1.0000
Wheel design	0.9549	0.6006
Tire type/material	0.8757	1.0000
Vehicle deceleration ratenents	0.1859	1.0000
Temperature at components	0.6162	0.5485
Rotor cooling coeficient	0.7711	0.8072
Lining-rear vol and area	0.7157	1.0000
Rotor width	0.7743	0.8383
Pedal attach pts	0.6696	0.9624
Dash deflection	0.4712	0.7060
Pedal force (required)	0.1989	0.5053
Lining material-rear	0.6789	0.4470
Pedal mechanical advantage	0.4088	0.2776
Lininf-front vol & swept area	0.6620	0.9999
Lining material-front	0.3499	0.2391
Booster reaction ratio	0.4693	0.2141
Rotor diameter	0.7785	0.2846
Rotor envelope & attach pts	0.9868	0.4557
Rotor material	0.8065	0.4805

$$u(k+1) = Au(k) + bw(k)$$

残り仕事量
の和



まとめ

- ロバスト性の定量的評価指標
- ロバスト最適化問題
- 凸最適化問題

今後の展望

- DSM, WTMの他の分析手法への応用

ロバスト性が低い要素の特徴は？

→ ネットワーク内での各要素の特徴を調べる

➤ 次数中心性 : 各要素のつながりの数

— 入次数中心性

— 出次数中心性

➤ 近接中心性 : ある要素から各要素への距離

— 入次数中心性

— 出次数中心性

➤ 媒介中心性 : 情報を橋渡しする度合い

➤ ページランク : プロジェクト内で重要な情報の集まりやすさ

ネットワーク内での中心性との比較

設計 パラメータ

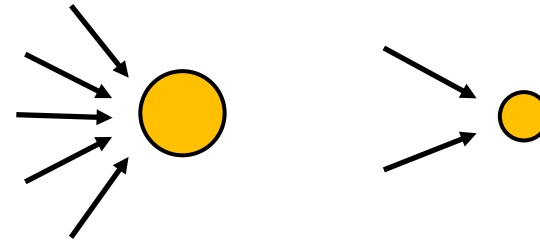
	centrality	indegree	outdegree	incloseness	outcloseness	betweenness	pagerank	eigenvector	proposed
Knuckle envelope & attach pts		0.5275	0.7705	0.6121	0.6126	0.6366	0.4673	0.9636	0.7101
Pressure at rear wheel lock up		0.8770	0.5975	0.7912	0.6458	1.0000	0.9185	0.5219	0.9708
Brake torque vs. skidpoint		0.7705	0.5975	0.7839	0.6603	0.9927	0.9021	0.4648	0.7927
Line pressure vs. brake torque		0.5975	0.7705	0.6613	0.6813	0.9787	0.7840	0.6457	0.5907
Splash shield geometry-front		0.8770	0.4129	0.6997	0.5499	0.6223	0.8071	0.7392	0.8854
Drum envelope & attach pts		0.8770	0.8770	0.7469	0.6813	1.0000	0.8915	0.9972	1.0000
Bearing envelope & attach pts		0.8770	0.6780	0.7486	0.6015	0.9957	0.9091	0.9612	1.0000
Splash shield geometry-rear		0.8770	0.5975	0.6997	0.6299	0.8020	0.8071	0.9589	0.8854
Air flow under car/wheel space		0.5975	0.6780	0.6238	0.6232	0.3724	0.6029	0.8679	0.5667
Wheel material		0.8770	0.8770	0.7631	0.6999	0.9479	0.8934	0.9833	1.0000
Wheel design		0.5275	0.7705	0.6789	0.6427	0.7622	0.6628	0.9549	0.6006
Tire type/material		0.8770	0.7705	0.7242	0.6299	0.4848	0.9020	0.8757	1.0000
Vehicle deceleration ratenents		0.8770	0.4664	0.7631	0.6266	0.6141	0.8934	0.1859	1.0000
Temperature at components		0.4664	0.5975	0.5819	0.5976	0.4120	0.5507	0.6162	0.5485
Rotor cooling coeficient		0.7705	0.5275	0.6703	0.5349	0.4005	0.8191	0.7711	0.8072
Lining-rear vol and area		0.8770	0.6780	0.6238	0.6488	0.8334	0.7772	0.7157	1.0000
Rotor width		0.5975	0.5275	0.5997	0.5546	0.3074	0.5470	0.7743	0.8383
Pedal attach pts		0.8770	0.7705	0.7568	0.7125	1.0000	0.8556	0.6696	0.9624
Dash deflection		0.7705	0.7705	0.7068	0.7125	0.8283	0.8150	0.4712	0.7060
Pedal force (required)		0.6780	0.4664	0.6348	0.6547	0.4881	0.6151	0.1989	0.5053
Lining material-rear		0.3662	0.5975	0.4922	0.6488	0.6248	0.4320	0.6789	0.4470
Pedal mechanical advantage		0.5275	0.6780	0.5356	0.6738	0.5986	0.3970	0.4088	0.2776
Lininf-front vol & swept area		0.8770	0.6780	0.6200	0.6488	0.8523	0.7928	0.6620	0.9999
Lining material-front		0.3252	0.5275	0.4854	0.6232	0.4247	0.3946	0.3499	0.2391
Booster reaction ratio		0.5275	0.5975	0.5356	0.6685	0.9736	0.3771	0.4693	0.2141
Rotor diameter		0.1640	0.4664	0.4324	0.6162	0.2534	0.1865	0.7785	0.2846
Rotor envelope & attach pts		0.5975	0.8770	0.5521	0.6862	0.8831	0.5501	0.9868	0.4557
Rotor material		0.5975	0.5975	0.5356	0.6015	0.3269	0.4941	0.8065	0.4805

設計 パラメータ ページ ランク 提案 手法

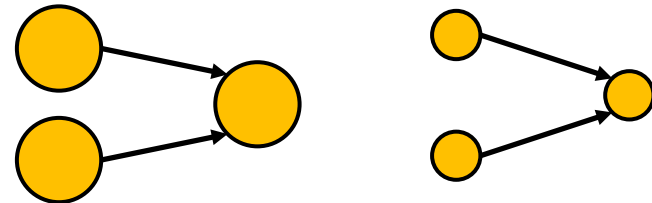
Knuckle envelope & attach pts	0.4673	0.7101
Pressure at rear wheel lock up	0.9185	0.9708
Brake torque vs. skidpoint	0.9021	0.7927
Line pressure vs. brake torque	0.7840	0.5907
Splash shield geometry-front	0.8071	0.8854
Drum envelope & attach pts	0.8915	1.0000
Bearing envelope & attach pts	0.9091	1.0000
Splash shield geometry-rear	0.8071	0.8854
Air flow under car/wheel space	0.6029	0.5667
Wheel material	0.8934	1.0000
Wheel design	0.6628	0.6006
Tire type/material	0.9020	1.0000
Vehicle deceleration ratenents	0.8934	1.0000
Temperature at components	0.5507	0.5485
Rotor cooling coeficient	0.8191	0.8072
Lining-rear vol and area	0.7772	1.0000
Rotor width	0.5470	0.8383
Pedal attach pts	0.8556	0.9624
Dash deflection	0.8150	0.7060
Pedal force (required)	0.6151	0.5053
Lining material-rear	0.4320	0.4470
Pedal mechanical advantage	0.3970	0.2776
Lininf-front vol & swept area	0.7928	0.9999
Lining material-front	0.3946	0.2391
Booster reaction ratio	0.3771	0.2141
Rotor diameter	0.1865	0.2846
Rotor envelope & attach pts	0.5501	0.4557
Rotor material	0.4941	0.4805

ページリンク：重要な情報の集まりやすさ

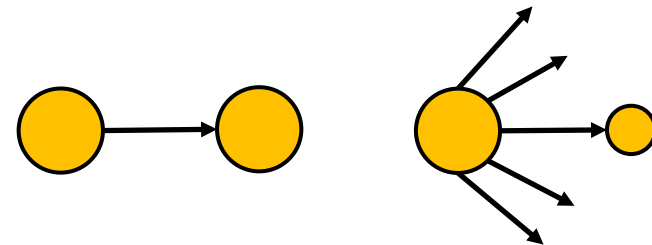
1)



2)



3)



重要な情報が集まるタスクと
ロバスト性は相関がある