

産業応用のための 最適化ベンチマーク問題集



岡本 卓 (SENSY株式会社)

自己紹介



CHIBA
UNIVERSITY



SENSY

- ✓【前職】(9月30日まで)
千葉大学 大学院工学研究院 電気電子工学コース 准教授
- ✓【現職】
SENSY株式会社 CRO (Chief Research Officer) 兼
SENSY 人工知能研究所 代表
千葉大学 グローバルプロミネント研究基幹 特任准教授
(12月から)
- ✓ 電気学会 計算知能技術と産業応用のためのベンチマーク問題
調査専門委員会 委員長

SENSY社はパーソナル人工知能「SENSY」の
開発を進めるAIベンチャーです。

Researcher絶賛募集中!!

背景(1)

● 最適化ベンチマーク問題

- ✓ 最適化手法の性能を図るための問題集
- ✓ 典型的なベンチマーク問題
 - いわゆるRastrigin関数最適化問題など
 - ☹ 実問題を基にしていない
 - ☹ 変数間に相関関係がないなどの問題点
 - ∴ 実問題で「使える」最適化手法のベンチマーク???
- ✓ 有制約問題, 離散変数問題, 混合整数問題
 - CECコンペティション用の問題集など
 - ☺ 実問題から定式化された問題??
 - 問題の収集に主眼
 - ☹ 定式化の過程が明らかでない

産業応用のための最適化ベンチマーク問題

背景(2)

● 例: 非凸連続変数最適化問題

✓ 大域的最適化が必要

➤ メタヒューリスティクス等の研究: 大域的最適化が中心

✓ 最適解の探索(発見)能力が重要

∴ 局所的最適解を複数持つ かつ 大域的最適解が既知

✓ 最適化問題の難しさ: 解空間の次元の高さに依拠

∴ 解空間の次元を自在に変更可能

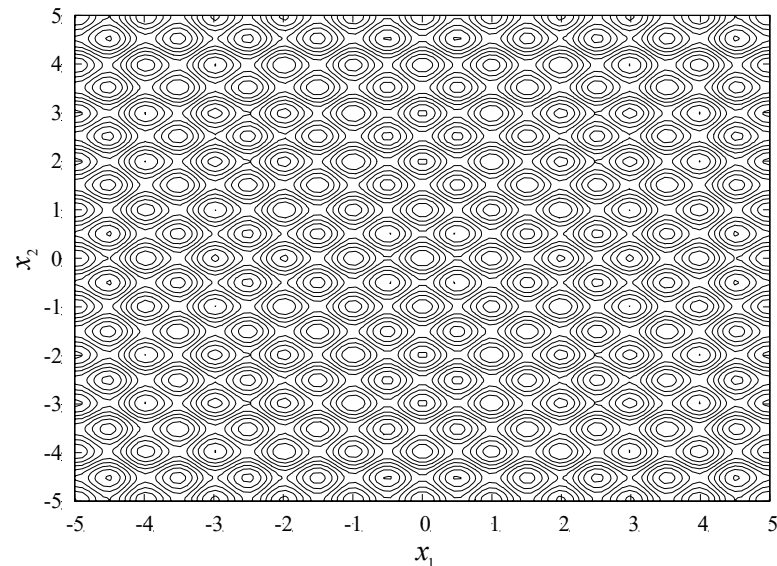
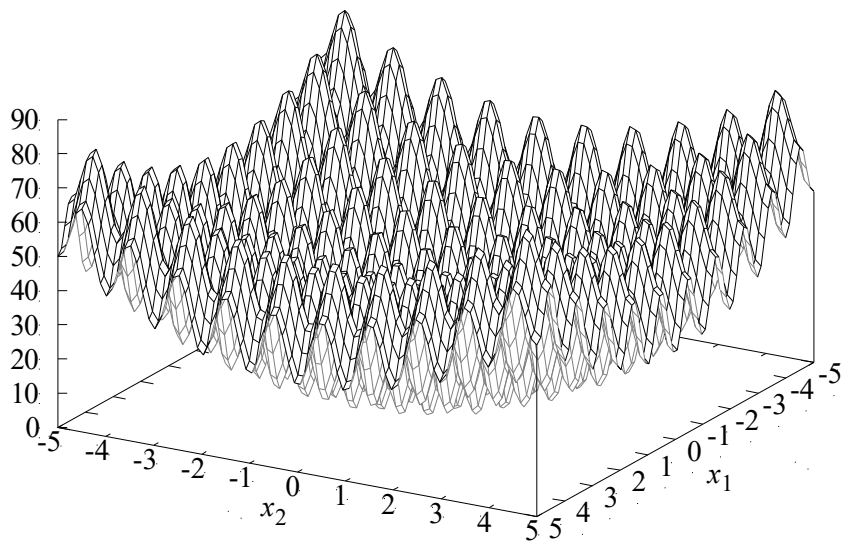
✓ 変数間の相関関係, 関数形が特殊

背景(3)

● 典型的なベンチマーク問題の例

✓ Rastrigin関数最適化問題

$$\underset{x}{\text{minimize}} \sum_{n=1}^N x_n^2 - 10 \cos(2\pi x_n) + 10$$



➤ せめて回転・軸の平行移動は入れてほしい...

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(1)

● 産業応用のための最適化ベンチマーク問題(1)

実問題をモデル化 / 定式化

- P1 エネルギープラント運用計画のための最適化ベンチマーク問題
- P2 上水道送水ポンプ運用計画のための最適化ベンチマーク問題
- P3 自動ピッキングシステム運用計画のための最適化ベンチマーク問題
- P4 運転時の不確実性を考慮したエネルギー計画のための最適化ベンチマーク問題
- P5 ボイラ制御におけるPIDコントローラ設計のための最適化ベンチマーク問題
- P6 太陽光発電モジュール直並切り替えの最適化ベンチマーク問題

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(2)

● 産業応用のための最適化ベンチマーク問題(2)

実問題をモデル化 / 定式化

- P7 避難計画のための最適化ベンチマーク問題
- P8 熱源機器運用計画のための最適化ベンチマーク問題
- P9 自律移動ロボットの行動設計最適化ベンチマーク問題
- P10 鉄道分野の最適化ベンチマーク問題

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(3)

● これまでの取り組み(1)

- ✓ 2011年1月-2012年12月
情報知能システムの新展開とその産業応用調査専門委員会
委員長: 松井 哲郎(富士電機)
 - ベンチマーク問題の作成開始
 - 2012年9月: C部門大会シンポジウム
 - 7件の発表
 - P1-P5の概要・定式化等
 - 2013年7月: 技術報告第1287号
 - C部門大会シンポジウムの内容が中心

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(4)

● これまでの取り組み(2)

- ✓ 2013年1月–2014年12月
産業応用のためのシステム最適化とベンチマーク問題
調査専門委員会, 委員長: 石亀 篤司(大阪府立大学)
 - 2013年11月: ソースコードWeb公開
 - P1, P2, P6のコード
 - 2014年3月: 全国大会シンポジウム
 - 7件の発表
 - P1–P3, P6の定式化・解法等
 - 2015年3月: SAMCON2015 Invited Session
 - 6件の発表
 - P1–P3, P6の定式化(英語版), P1の新たな解
 - 2016年2月: 技術報告第1365号
 - SAMCON2015を中心に英語版の定式化の紹介

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(5)

● これまでの取り組み(3)

✓ 2015年4月–2017年3月

システム最適化と産業応用ベンチマーク問題
調査専門委員会, 委員長: 森 一之(三菱電機)

- P1–P3, P6の改良, P7–P9の定式化の検討
- 2016年3月: SAMCON2016 Invited Session
 - 4件の発表
 - P1-2の紹介, P3, P6の解析等
- 2016年12月: システム/産業計測制御合同研究会
 - 4件の発表
 - P8, P9の定式化, P3の解法等
- 2017年3月: 全国大会シンポジウム
 - 6件の発表
 - P1-2, P2-2, P6-3, P8, P9の定式化等

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(6)

● これまでの取り組み(4)

✓ 2017年4月–2019年3月

計算知能技術と産業応用のためのベンチマーク問題
調査専門委員会, 委員長: 岡本 卓 (SENSY株式会社)

➤ 2017年5月: ソースコード公開ページ更新

■ P1-2, P6-3, P9, P8(近日公開)のコード

産業応用のための最適化ベンチマーク問題(7)

● ソースコード公開

✓ URL

<http://www.ssl.te.chiba-u.jp/~okamoto/BP-IA/>

✓ 日本語版と英語版を公開

➤ 英語版はP1-1, P2, P3, P6-2の時点のまま

➤ P6-3, P8, P9は, 1次ソースの英語版がない...

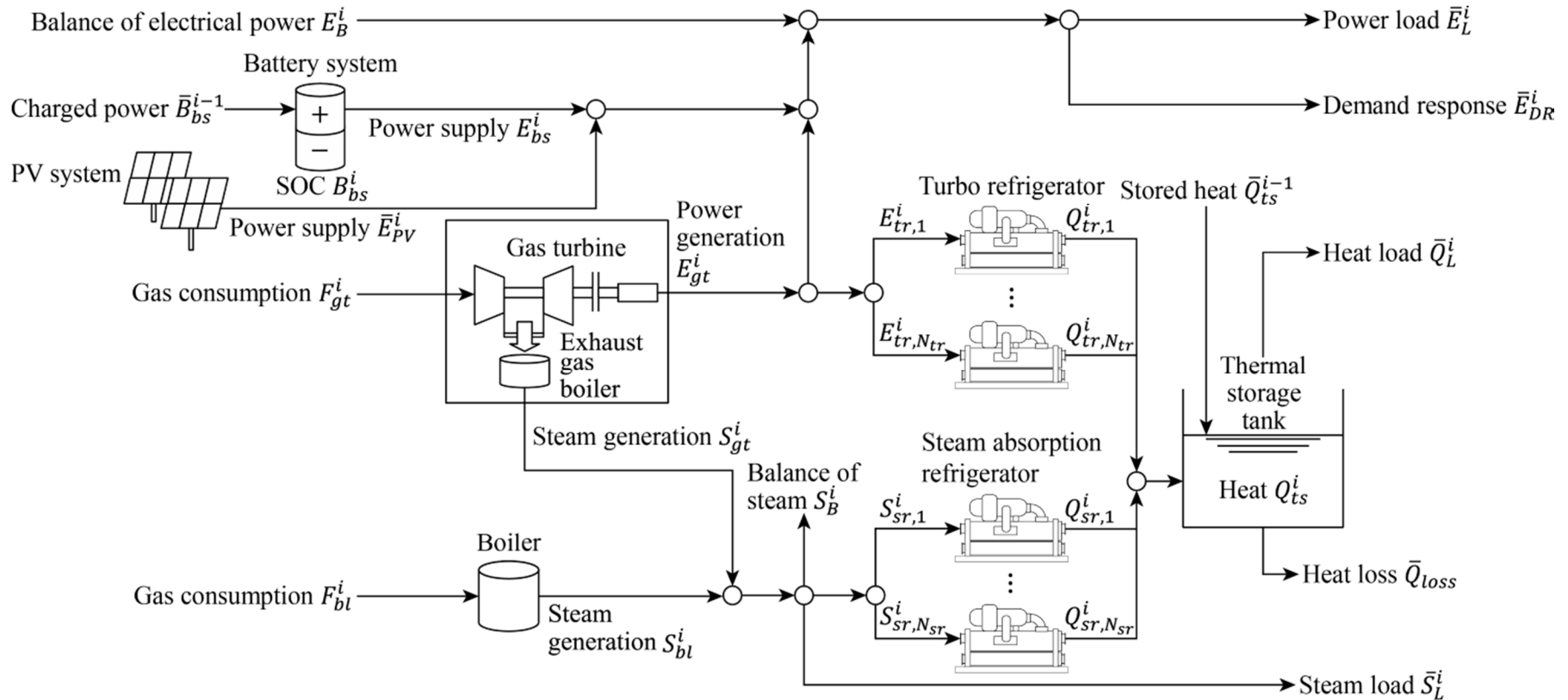
✓ 使用言語: C/C++ (一部はMATLAB)

✓ 定式化だけでなく解も公開

✓ 直接使うというよりは, 得られた解のチェックに使うことが多い

エネルギープラント運用計画のためのBP(1)

● 問題概要



✓ 担当: 鈴木委員(富士電機), 岡本

✓ エネルギープラントの24時間運用計画

➤ 発電機, ボイラ, 冷凍機, 蓄電池, 蓄熱槽, PVで構成

エネルギープラント運用計画のためのBP(2)

● 定式化

✓ 決定変数

- 発電機, ボイラ, 冷凍機, 蓄電池の運転状態・運転量

✓ 目的関数: 電力・ガス購入コスト, CO2排出コスト

✓ 制約条件

- 各エネルギー(電力・蒸気・冷熱)の需給バランス
- 各機器の機械的制約(運転量上下限制約)
- 各機器の運用制約(連続運転制約)
 - 起動・停止後 L 時間以上運転状態を維持
 - 離散変数(0-1変数)の導入
- デマンドレスポンスへの対応

エネルギープラント運用計画のためのBP(3)

● 問題の規模・クラス

- ✓ 問題のクラス: 混合整数非線形計画問題
 - 非線形性: 蒸気吸収式冷凍機の入出力特性
- ✓ 決定変数の数: 264(連続: 144, 離散: 120)
 - 発電機, ボイラ, 蓄電池, 蒸気吸収式冷凍機: 各1台, ターボ冷凍機: 2台
- ✓ 不等式制約条件数: 363(線形: 363, 非線形: 0)
- ✓ 等式制約条件数: 134(線形: 0, 非線形: 134)

エネルギープラント運用計画のためのBP(4)

● 現状と課題

✓ Ver. 1 (PV・蓄電池等がないもの)

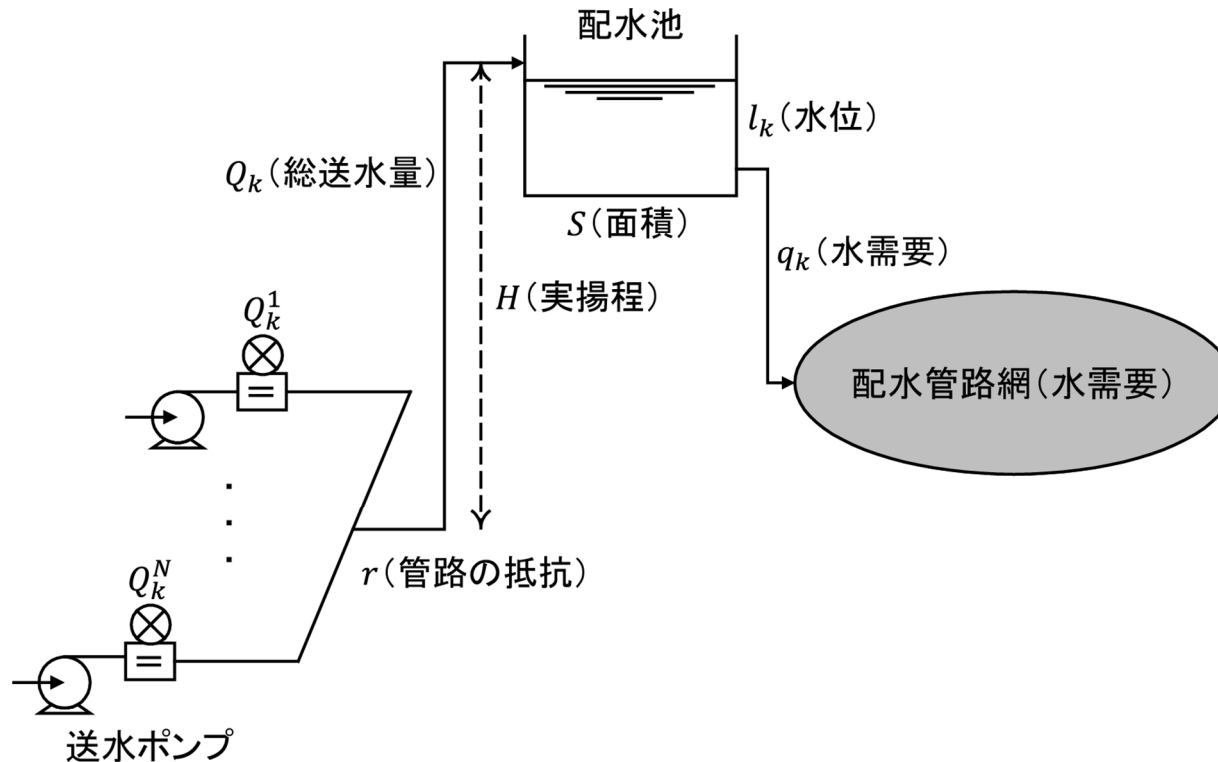
- 区分線形化＋混合線形計画ソルバー(Gurobi)で高速に解が得られる
- スマートコミュニティモデルのベースとして採用
- 定式化の解説に有用
 - エネルギーフロー図
 - 独立変数・従属変数の説明

✓ Ver. 2: コードを公開したばかり。

- CO2排出権取引を考慮したので、2030年時点を想定。少し設定に無理があるかもしれない...

上水道送水ポンプ運用計画のためのBP(1)

● 問題概要



- ✓ 担当: 横川委員 (東芝), 岡本
- ✓ 送水ポンプの24時間運用計画

上水道送水ポンプ運用計画のためのBP(2)

● 定式化

- ✓ 決定変数
 - 送水ポンプの運転状態
- ✓ 目的関数: 起動停止回数, 消費電力量
- ✓ 制約条件
 - 水需要を満たす
 - 配水池水位を所定の範囲に保つ

● 問題の規模・クラス

- ✓ 問題のクラス: 非線形離散変数2目的最適化問題
- ✓ 決定変数の数: 24 (連続: 0, 離散: 24)
- ✓ 不等式制約条件数: 73 (線形: 24, 非線形: 49)
- ✓ 等式制約条件数: 0 (線形: 0, 非線形: 0)

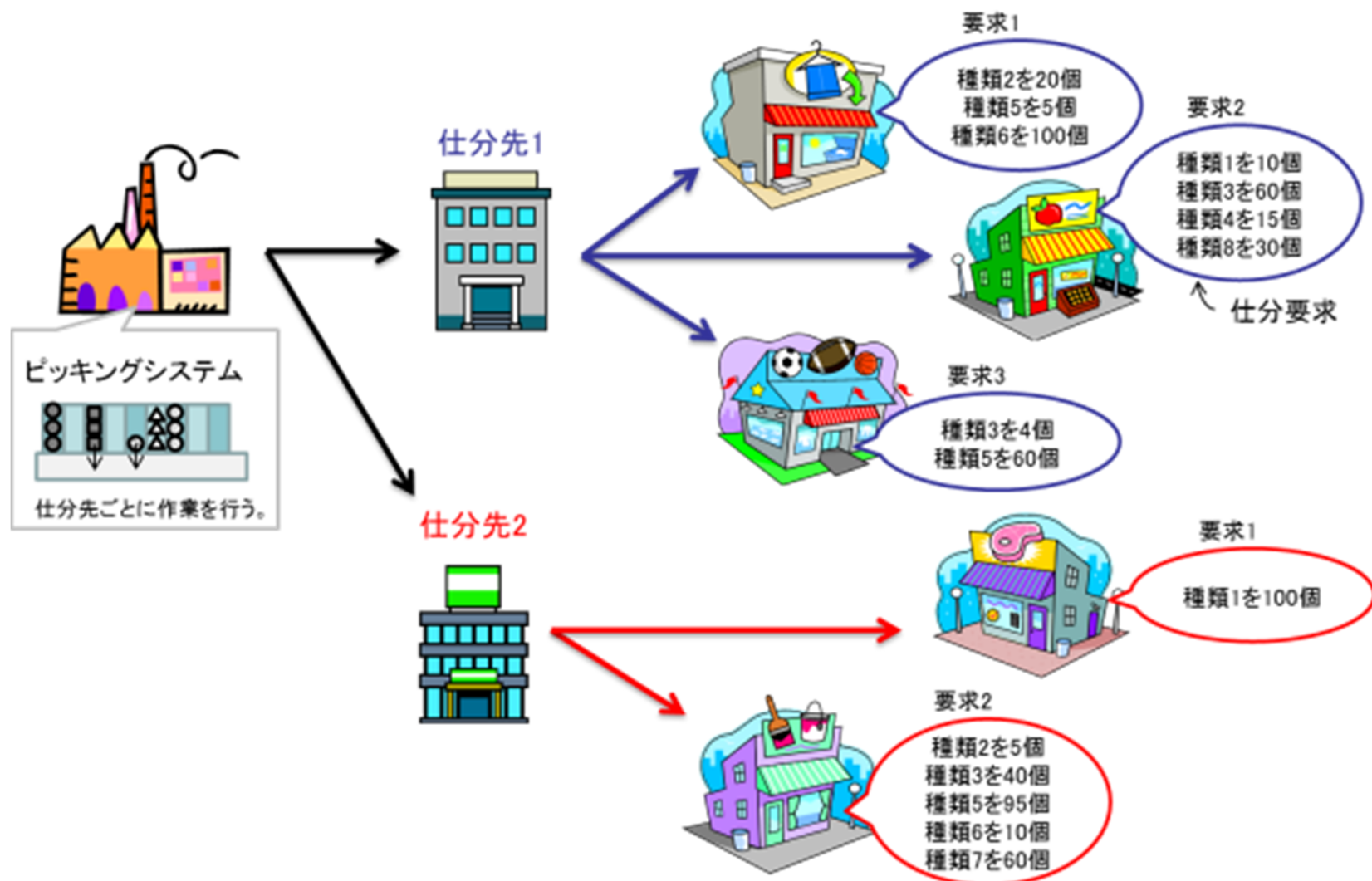
上水道送水ポンプ運用計画のためのBP(3)

● 現状と課題

- ✓ A*探索アルゴリズム・分枝限定法で高速に求解
- ✓ Ver. 2
 - 2ポンプ場, 2配水池の問題に拡張
 - 配水池水位の最大値を目的関数に追加(3目的)
 - 定式化は完了。パラメータ調整の段階。

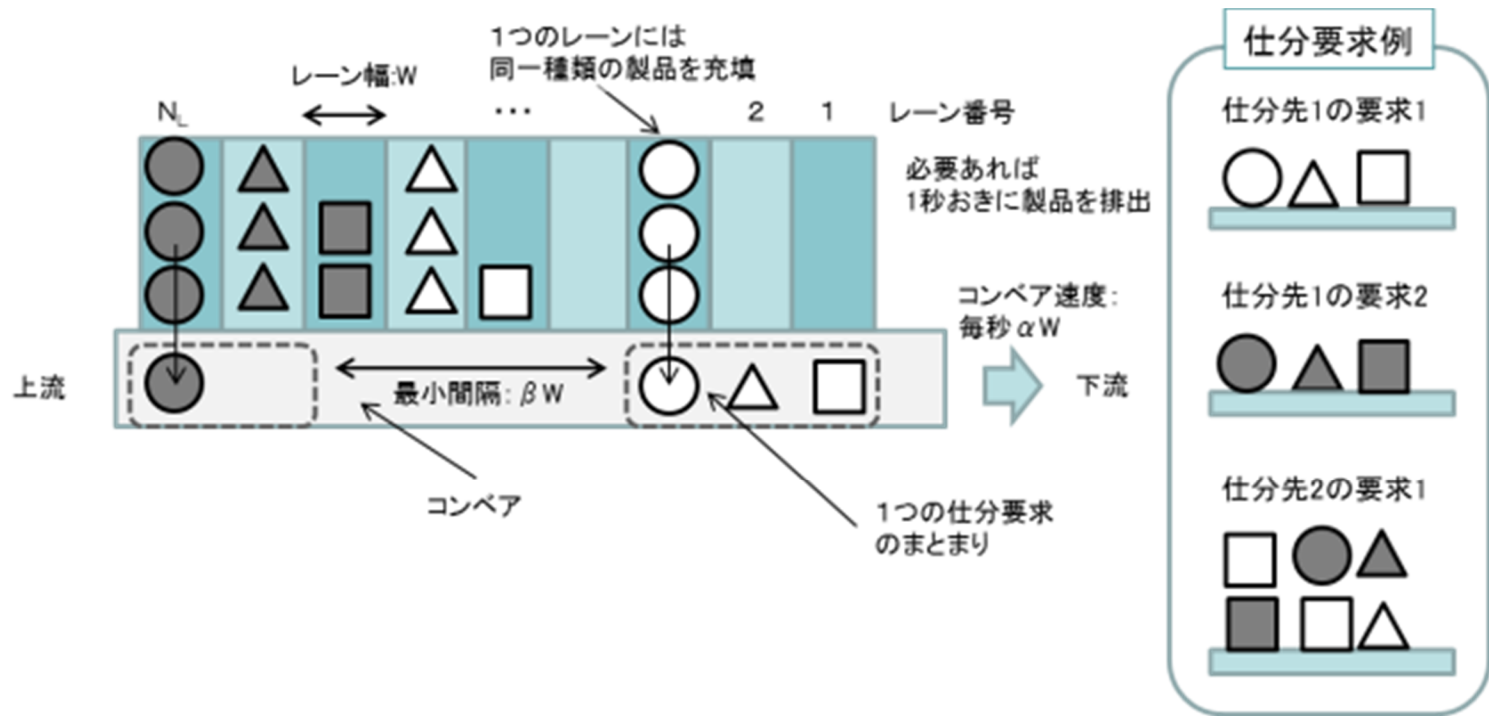
自動ピッキングシステム運用計画のためのBP(1)

● 問題概要(1)



自動ピッキングシステム運用計画のためのBP(2)

● 問題概要(2)



- ✓ 担当:河野委員, 小熊委員(IHI), 飯間委員(京都工芸繊維大学)
- ✓ 製品の仕分要求を満たしながら製品を排出
- ✓ 製品のレーンへの割付問題と処理順序と排出時刻を決定するスケジューリング問題を同時に考慮

自動ピッキングシステム運用計画のためのBP(3)

● 定式化

✓ 決定変数

- 仕分先・仕分要求への作業順序割当
- レーンへの製品種類・製品割当
- 製品のレーンからの排出時刻

✓ 目的関数: 仕分作業の最大完了時刻

✓ 制約条件

- 作業順序の重複
- レーンへの製品種類・製品割当についての制約
- 仕分要求内での製品間隔は最小距離未満
- 仕分要求間での製品間隔は最小距離以上
- 1つの仕分先製品間に異なる仕分先のものを入れない
- コンベア上で製品を重ねない

自動ピッキングシステム運用計画のためのBP(4)

● 問題の規模・クラス

- ✓ 問題のクラス: 非線形離散変数最適化問題
- ✓ 決定変数の数: 925,500 (連続: 0, 離散: 925,500)
- ✓ 不等式制約条件数: 89,075 (線形: 100, 非線形: 88,975)
- ✓ 等式制約条件数: 19,100 (線形: 10,100, 非線形: 9,000)

自動ピッキングシステム運用計画のためのBP(5)

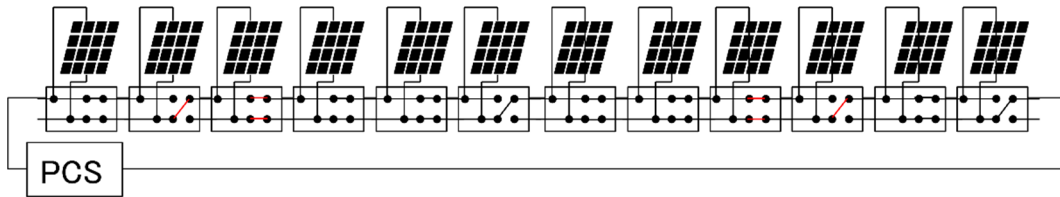
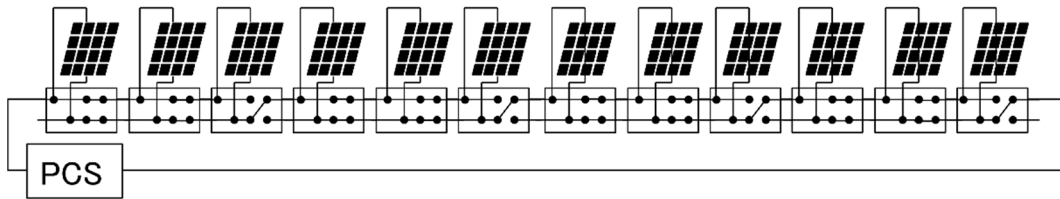
● 現状と課題

- ✓ いくつかの文献でベンチマーク問題として採用
 - 電学論C, システム/産業計測制御研究会
 - International Symposium on Scheduling 2015(2件)
 - Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing
 - 計測自動制御学会 システム・情報部門大会 (SSI)
- ✓ 大規模問題で最適解(と思われる解)が見つからない??
 - ただし, 緩和問題の解から(ある種の)下界値はわかっている

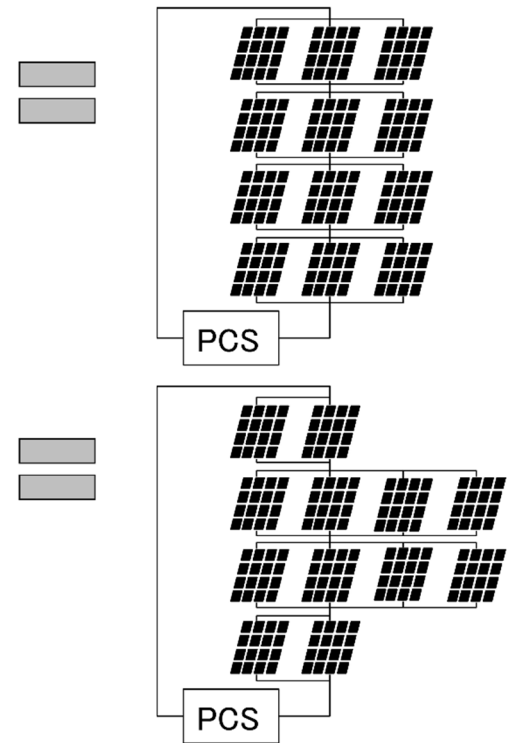
太陽光発電モジュール直並切替のためのBP(1)

● 問題概要

The connection sample by series-parallel switching device



Logical connection image



Explanatory notes

- Connected in series with the right device
- Connected in parallel with the right device

- ✓ 担当: 林委員(明電舎)
- ✓ PVモジュール間の配線を動的に再構成できる
- ✓ PVモジュールの直列並列配置と電流・電圧量を決定

太陽光発電モジュール直並切替のためのBP(2)

● 定式化

✓ 決定変数

- モジュール間の接続方法
- モジュールの電流・電圧の大きさ

✓ 目的関数:モジュール全体の発電量

✓ 制約条件

- PVモジュールの電流・電圧特性
- 層(並列接続されたモジュール群)内の電圧は一定
- 各層の出力電流は一定
- 層の数は一定
- 仕様に起因した範囲(上下限)制約

太陽光発電モジュール直並切替のためのBP(3)

● 問題の規模・クラス

- ✓ 問題のクラス: 非線形混合整数計画問題
- ✓ 決定変数の数: 116 (連続: 63, 離散: 53)
- ✓ 不等式制約条件数: 164 (線形: 164, 非線形: 0)
- ✓ 等式制約条件数: 63 (線形: 9, 非線形: 54)

太陽光発電モジュール直並切替のためのBP(4)

● 現状と課題

✓ Ver. 1, 2

➤ Tabu Search + SQPで解が得られる

■ 連続変数の多くが制約条件で決まってしまう

■ (恐らく)最適解が得られている

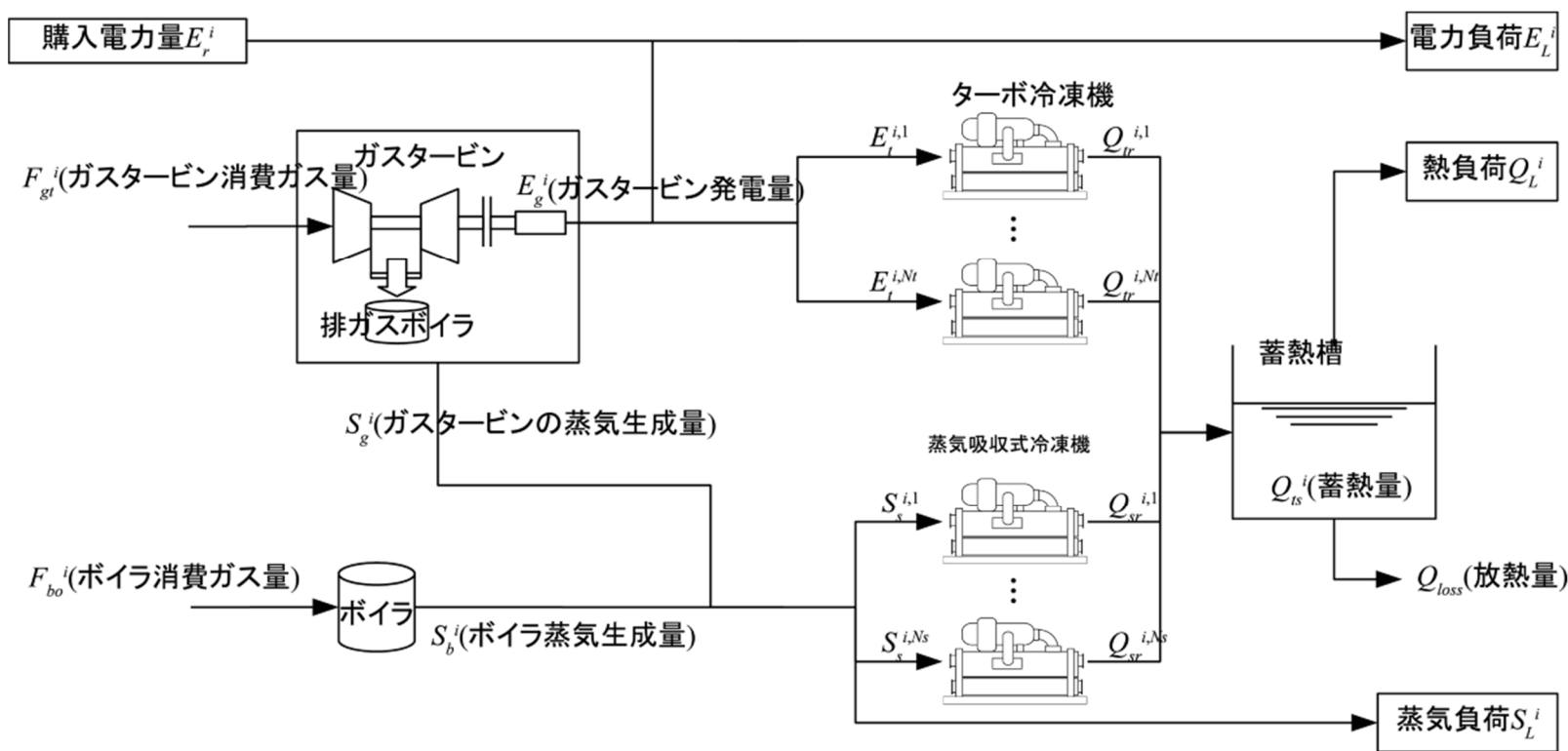
✓ Ver. 3

➤ 1分刻み8日分の時系列データ(11,520パターン)を公開

➤ 切替コストを考慮した評価が可能

熱源機器運用計画のためのBP(1)

● 問題概要



✓ 担当: 西口委員 (アズビル)

✓ P1-1のFork

✓ 熱源機器優先順位制約,
月ごとの代表日を考慮した年間エネルギー制約を導入

熱源機器運用計画のためのBP(2)

● 定式化

✓ 決定変数

- 発電機, ボイラ, 冷凍機の運転状態(24時間 × 12日)
- 熱源優先順位パターンの選択

✓ 目的関数: 電力・ガス購入コスト

✓ 制約条件

- 各エネルギー(電力・蒸気・冷熱)の需給バランス
- 各機器の機械的制約(運転量上下限)
- ガス年間負荷率制約(ピーク月に対する平均使用量)
- 熱源機器の負荷率制約(等負荷に近づける)
- 熱源機器優先順位制約(起動の順番)

熱源機器運用計画のためのBP(3)

● 問題の規模・クラス

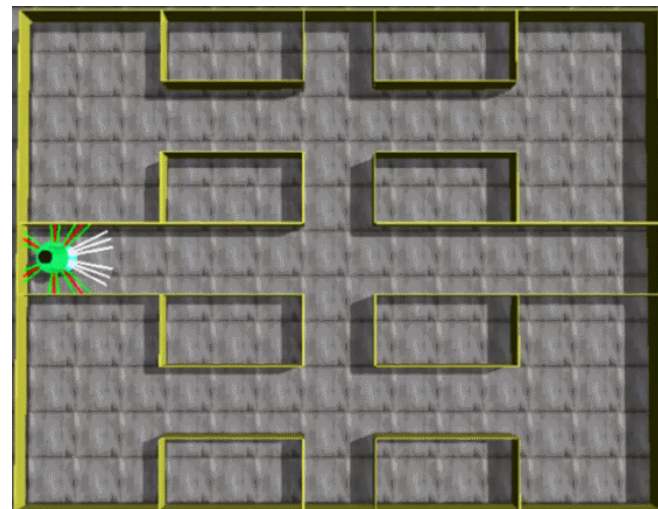
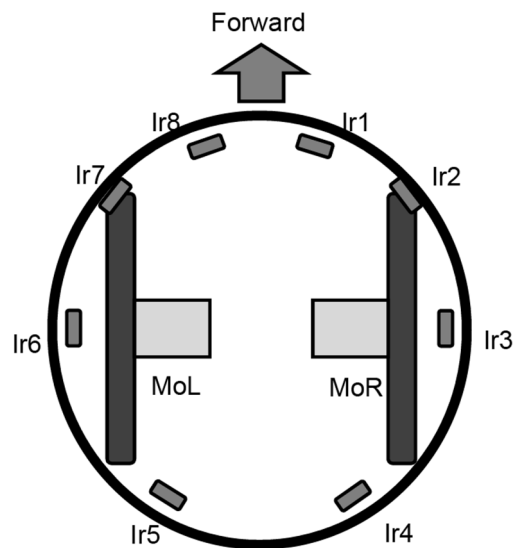
- ✓ 問題のクラス: 混合整数非線形計画問題
- ✓ 決定変数の数: 3024 (連続: 1440, 離散: 1584)
- ✓ 不等式制約条件数: 8641 (詳細不明)
- ✓ 等式制約条件数: 312 (詳細不明)
- ※ 上記はプログラム上でカウントしたもの

● コードの公開

- ✓ ソースコードの実装完了
- ✓ 実装が正しいか, 有意な問題設定であるかを検証
- ✓ 検証が終わった時点でコードを公開

自律移動ロボットの行動設計BP(1)

● 問題概要



- ✓ 担当: 元木委員 (関東学院大学)
- ✓ Open Dynamic Engineを用いた自律移動ロボット (e-puckを想定) の3Dシミュレータを公開
 - Webots相当 (場合によっては速い??) のシミュレータ
- ✓ ロボットの行動則を設計

自律移動ロボットの行動設計BP(2)

● 定式化

- ✓ 反応行動の設計問題
 - 左壁沿い行動則の設計
- ✓ 行動計画の設計問題
 - 目標到達行動則(スタートからゴールに移動)の設計
- ✓ 評価関数が算出可能で, 評価関数値を大きくすることが目標
- ✓ 行動則出力器の構成は使用者に委ねられる
 - ルールベース
 - 機械学習(ニューラルネットワーク, 強化学習等)

まとめと展望(1)

● 産業応用のための最適化ベンチマーク問題

P1 エネルギープラント運用計画のためのBP

P2 上水道送水ポンプ運用計画のためのBP

P3 自動ピッキングシステム運用計画のためのBP

P6 太陽光発電モジュール直並切り替えのBP

P8 熱源機器運用計画のためのBP

P9 自律移動ロボットの行動設計BP

✓ 鉄道関連のベンチマーク問題の作成

✓ 上水道送水ポンプ運用計画ベンチマーク問題の改良

まとめと展望(2)

● 今後の展望(1)

- ✓ 混合整数非線形計画問題(MINLP)が多い(3問)
 - 「運用計画」はこのクラスになりやすい
 - MINLPに対する定番手法がなく, 開発が求められる
- ✓ コンペティションの開催
 - MINLPの問題は少し簡単かもしれない
 - 無意識にソルバに迎合??
 - 少ないデータ点(カタログ値)を近似
 - 線形関数・2次関数となりがち
 - モデル化から見直すべき
 - 自動ピッキングシステム運用計画のためのBPは決定変数の数が多く, 良い対象問題になるかも。

まとめと展望(3)

● 今後の展望(2)

✓ 新問題の発掘・定式化

➤ 定式化を含めたベンチマーク問題

- モデリングと定式化のためのデータとKPIのみが提供
- KPIは言語的なイメージのみ
- KPIを最良にする

➤ 関数近似を用いたベンチマーク問題

- 応答曲面法・サロゲートモデルの評価
- 評価基準に目的関数評価回数を入れて、その重みを大きくする