

日本経営システム学会 イノベーション指向データ分析 研究部会 2016 年度第 1 回研究会



開催日 : 2017 年 2 月 24 日 (金)

開催場所 : 広島工業大学五日市キャンパス

〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1 新 4 号館 3 階 324 号室, 211 号室

<http://www.it-hiroshima.ac.jp/about/access/itsukaichi/campus.html>

参加費 : 無料

プログラム

開催挨拶

13:00-13:10 松本慎平 (研究部会主査, 広島工業大学)

第 1 部 : 基調講演(講演 40 分, 質疑 10 分)

発表者: 13:10-14:00

山岸秀一氏(広島工業大学) pp.1-8

題目: 「次世代映像符号化と国際標準」

概要: 現在, HD デジタル放送が一般的になり, また, 家庭用の AV 機器も HD 対応が当たり前になっている. さらに, 4K テレビを始めとした HD を超える新しい映像ソースへの需要も増大しており, 4K×2K, 4:4:4 フォーマットといった高品位映像信号を扱うデジタルシネマのサービスも既に始まっているほか, 8K×4K の解像度を持つスーパーハイビジョンの放送も実用化に向けたテスト段階に入っている. このような高品位映像信号に対して, 品質を維持したまま圧縮率を高める技術は次世代映像アプリケーションのキーテクノロジーとなる. 本講演会では, 映像圧縮符号化技術の基本原理について概観し, 次世代映像符号化に向けた技術開発と実用化のための国際標準について紹介する.

第 2 部 : 研究発表会(発表 15 分, 質疑 5 分)

セッション 1 : スケジューリング

座長 : 桑原康浩 (株式会社ファーストステップ)

発表者: 14:10-14:30 西村隼人(広島工業大学) pp.9-10

題目: 開発者の技能を考慮に入れたシステム開発スケジューリング最適化の研究

著者: 西村隼人, 山岸秀一, 松本慎平, 加藤浩介

概要: 生産計画におけるフローショップ・スケジューリング問題もとしたシステム開発のスケジューリング方法を提案する。システム開発に関わる作業者の能力を重みとして処理時間に加えてスケジューリングの定式化を行った。そして、コンピュータによる解析を行った結果、最適解を得ることが出来た。

発表者: 14:30-14:50 谷本和貴 (広島工業大学) pp.11-14

題目: モンテカルロ木探索法を用いたフローショップスケジューリング最適化の研究

著者: 谷本和貴, 松本慎平, 垣内洋介, 加藤浩介, 山岸秀一

概要: 本研究では, 2 人ゲームの対戦アルゴリズム向けで従来積極的に応用が試みられてきたモンテカルロ木探索法に着目し, フローショップスケジューリング問題に対してこれを応用すること, その性能を報告することを目的とする. フローショップスケジューリング問題を一人有限確定完全情報ゲームとして捉え, モンテカルロ木探索法の適用を試みる.

発表者: 14:50-15:10 佐々木直人(広島工業大学) pp.15-16

題目: Satisfiability Modulo Theories (SMT) に基づくソフトウェア開発を想定したビジネススケジューリング

著者: 佐々木直人, 加藤浩介, 垣内洋介, 松本慎平, 山岸秀一

概要: 本研究では, ビジネスの現場におけるスケジューリング, 特に, ソフトウェアのチーム開発におけるチームの各メンバーのスケジューリング問題に焦点をあてる. ソフトウェア開発の特徴を考慮した上で, Satisfiability Modulo Theories(SMT)に基づく定式化を行うとともに, MT ソルバーYices を使用して求解するプログラムを作成する. さらに, いくつかの数値例に対して提案手法を適用し, その有用性を検討する.

セッション 2 : 情報技術活用

座長 : 加藤浩介 (広島工業大学)

発表者: 15:20-15:40 堀川草央里 (広島工業大学) pp.17-20

題目: アイトラッキングによる最適 Web デザインの構造分析に関する研究

著者: 堀川草央里, 松本慎平, 加島智子

概要: 「KAIZEN PLATFORM」を利用することにより, CVR(Conversion Rate)を上げることが可能になる。このことに対して, アイトラッカーを用いた分析を適用すれば, 実際にユーザが Web サイトのどこを見ているかを把握でき, より量的な観点から Web サイトを最適化できるのではないかと考えられる。そこで本研究では, KAIZEN PLATFORM 内に集まった企業のホームページを使用してアイトラッカーを用いた実験を行い, 利用者の属性に応じた注視パターンを明らかにすることを目的とする。

発表者: 15:40-16:00 大前憲太郎(広島工業大学) pp.21-24

題目: 視覚障害者向けユーザインタフェースに関する研究

著者: 大前憲太郎

概要: 本研究では, モーションやジェスチャを用いた視覚障害者向けユーザインターフェースについて述べる。複数の手法を実装・評価して得られた結果について紹介し, 手の動きを用いたユーザインタフェースの利点と課題を明らかにする。

発表者: 16:00-16:20 垣内洋介(広島工業大学) pp.25-26

題目: Python とプロブレムソルバを用いた計算モデリング

著者: 垣内洋介

概要: 解空間が大きい問題に対して, ソルバを用いた解探索を一般的なに行われるが, そのような方法では問題のモデルをいかに作成するかがキーポイントとなる。本発表では様々な問題とそのモデリング方法について実例を交えて紹介する。

発表者: 16:20-16:40 大杉将輝(広島工業大学) pp.27-28

題目: Web 最適化に対する情報科学の貢献

著者: 大杉将輝, 松本慎平

概要: 近年, BtoC ビジネスの主戦場が Web へと変化したことに伴い, コンバージョン率やサイト滞在時間の向上に寄与できるような Web サイトのデザイン設計・構築法がサイト運営者側から望まれている。Web サイトの改善は最適化と呼ばれる。現在, Web 最適化のほとんどは Web エンジニアの経験則に依存して行われている。そこで本発表では, 情報科学的な知見, とりわけ, 人工知能やデータマイニングと呼ばれる領域で取り組まれている技術や手法を Web 最適化にいかに応用すべきか, また, どのような貢献が期待できるのかについて説明することを目的とする。

閉会挨拶

16:40-16:45 加藤浩介(研究部会幹事, 広島工業大学)

懇親会

場所: 人有喜 -宴- 五日市店 <https://r.gnavi.co.jp/y043301/>

時間: 研究会終了後 (17 時頃から 2 時間) 研究会終了後徒歩で移動します

基調講演

次世代映像符号化と国際標準

広島工業大学 山岸秀一

現在、HD デジタル放送が一般的になり、また、家庭用の AV 機器も HD 対応が当たり前になっている。さらに、4K テレビを始めとした HD を超える新しい映像ソースへの需要も増大しており、4K×2K、4:4:4 フォーマットといった高品位映像信号を扱うデジタルシネマのサービスも既に始まっているほか、8K×4K の解像度を持つスーパーハイビジョンの放送も実用化に向けたテスト段階に入っている。このような高品位映像信号に対して、品質を維持したまま圧縮率を高める技術は次世代映像アプリケーションのキーテクノロジーとなる。本講演会では、映像圧縮符号化技術の基本原理について概観し、次世代映像符号化に向けた技術開発と実用化のための国際標準について紹介する。



日本経営システム学会
イノベーション指向データ分析研究部会

次世代映像符号化と国際標準

2017年02月24日(金)

広島工業大学
大学院工学系研究科 情報システム科学専攻
情報学部 知的情報システム学科

山岸 秀一

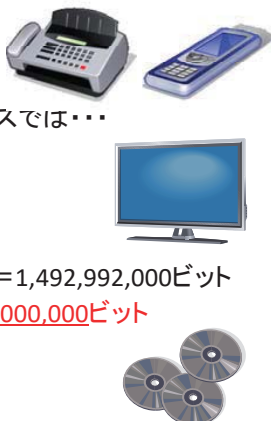
アウトライン

1. 映像符号化技術の歴史
2. デジタル映像符号化技術の基本
3. 業界標準から国際標準化へ
4. 国際標準映像符号化技術の実際
5. 次世代映像符号化技術の国際標準化
6. 次世代映像技術開発への取組み

2

情報量の比較

- 音声の場合,
 - 64 kbit/secの電話サービスでは...
 - 1秒間で, **64,000ビット**
 - 画像(動画)では,
 - 地デジ放送の場合...
 - $1920 \times 1080 \times 8 \times 3 \times 30 = 1,492,992,000$ ビット
 - つまり, 1秒間で, 約**1,500,000,000ビット**
 - 音声の約**2千倍!**
- ⇒ 画像は圧縮が必要!



3

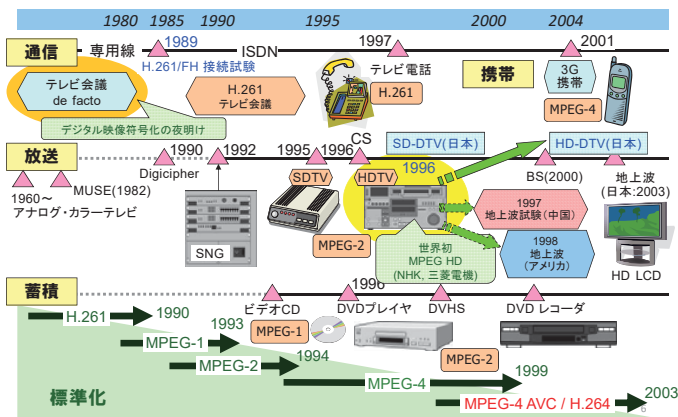
画像・映像の放送, 伝送, 蓄積



4

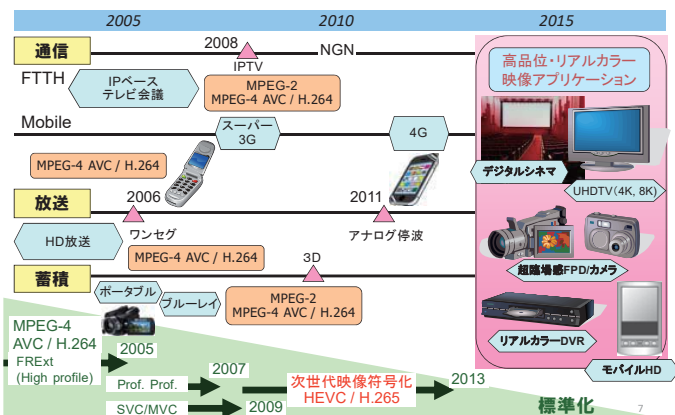
1. 情報通信メディアを支える映像符号化技術 ～映像符号化技術の歴史～

2000年代 デジタル放送, ワンセグ放送, IPTV. → 2003年 MPEG-4 AVC / H.264標準化



5

2010年代 超高精細映像アプリケーションの実現へ → 2013年 HEVC / H.265標準化



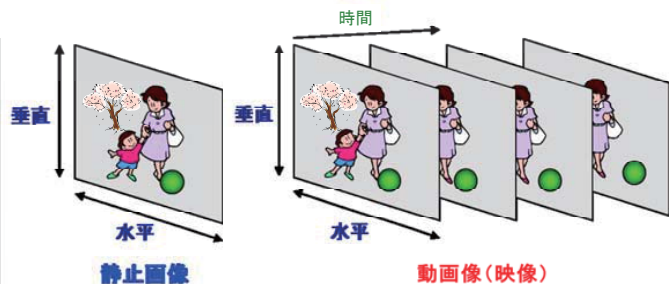
7

2. デジタル映像符号化 ～技術の基本～

8

・ デジタル画像

- 標本化・量子化された画素(ピクセル)が水平・垂直方向に2次元的に並んで画像を形成.
- 動画像(映像)は時間方向の画像の並びとして表現される.



映像符号化の要素技術

① 予測

- 予測誤差の符号化(相関を利用して冗長度を削減).
- フレーム内予測, フレーム間予測, 動き補償予測.

② 直交変換/帯域分割

- 周波数領域における優先付け.
- DCT, Wavelet変換など.

③ 量子化

- 直接的情報量削減.

④ エントロピー符号化

- 統計的性質に基づく可逆的符号化.
- ハフマン符号化, 算術符号化など.

① 予測

・ 空間予測 (spatial prediction)

- 1サンプル前の隣の画素の値を予測値として使う方法(前値予測).
- 画像の自己相関が高く, 近傍の画素のレベルが似通っている確率が高いことを利用.
- 低周波成分に比べて高域成分のエネルギーが少ないことに相当.
- この予測方式は低域成分に対して誤差が少ない方式.
- 予測誤差信号は高域成分が強調された信号になる.



二宮佑一「画像の帯域圧縮と符号化技術」日刊工業新聞社(1994年)

・ 時間予測 (temporal prediction)

- 動画像はコマ間の相関が高い.
- ある画素の予測信号として, 同一位置の前のフレームの信号レベルを用いるときわめて有効.
- 時間的に異なった画像を用いて予測を行う方法を時間(テンポラル)予測という.
- 画像の動いている部分にのみエネルギーが集中.



二宮佑一「画像の帯域圧縮と符号化技術」日刊工業新聞社(1994年)

・ 動き補償予測 (Motion Compensated Prediction)

- 時間(テンポラル)予測は静止している物体の場合はきわめてよく当たるが, 動いている場合には予測誤差が発生.
- 動画では, 物体の移動に伴って画像が変形する量はさほど大きくない. ほぼ平行移動とみなしてよい確率が高い.
- 被写体が回転しているときでも局所的にはほぼ平行移動と見なしてよい.
- 従って前フレームの信号をそのまま使わず, 移動した分だけ位置を補正して予測信号として用いると予測精度が向上する.

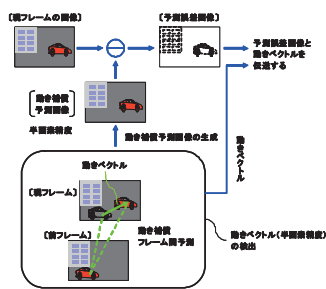
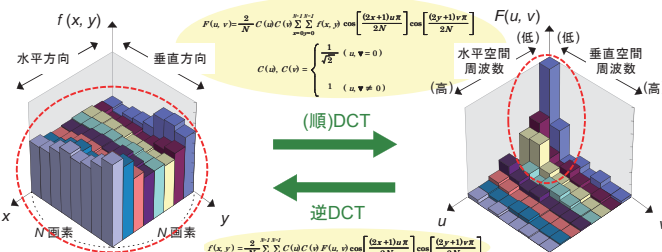


図2-11 動き補償予測の原理

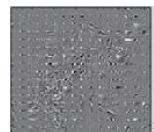
小野定康・村上篤道・浅井亮太郎「動画画像高効率符号化」オーム社(2005年)

② 直交変換/帯域分割

・ DCT: 離散コサイン変換(Discrete Cosine Transform)



変換による信号電力分布の集中



③ 量子化

入力信号 x がある統計的性質に従う場合, 量子化レベル間隔を変えて最適な(量子化損失が最小となる)量子化を行うことが可能.

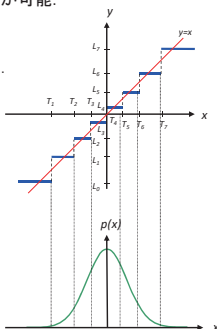
T_1, T_2, \dots, T_{n-1} を量子化の閾値, L_0, L_1, \dots, L_{n-1} を量子化レベルとすると, 入力信号 x の量子化は次の関係式で与えられる.

$$T_{k-1} < x \leq T_k \Rightarrow x \rightarrow L_{k-1}$$

信号 x の振幅分布が確率密度 $p(x)$ に従うときの量子化誤差 $e (=L_k - x)$ の二乗平均値

$$\overline{e^2} = \sum_{k=0}^{n-1} \int_{T_k}^{T_{k+1}} p(x)(L_k - x)^2 dx$$

$p(x)$ が平均値0, 分散 σ^2 の正規(ガウス)分布に従うとき, MS E 歪み測定に対して $\overline{e^2}$ を最小にする最適量子化器を Lloyd-Max量子化器という.



④ エントロピー符号化(最適符号化)

・ 事象の発生確率に応じた符号化.

- 全体のビット数を最小にする符号化.
- 可変長符号の割り当て.
 - 出現頻度の高い事象には短い符号を割り当てる.
 - 出現頻度の低い事象には長い符号を割り当てる.

・ 例

- ハフマン符号化(Huffman Coding)
 - シンボルと符号語を関連付ける可変長符号テーブルを利用.
 - 応用例: MPEG2
- ランレングス符号化(Run-Length Coding)
 - 連続する同一シンボルの(個数, 長さ)の組を符号化.
 - 応用例: FAX
- 算術符号化(Arithmetic Coding)
 - 確率数直線の分割区間を符号化(シンボル系列に適応して可変長符号を生成).
 - 応用例: JPEG2000, MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265

ハフマン符号化

ハフマン符号の構成方法

- 発生確率の小さいシンボルからペアを組んで、0または1を割当てながら符号を積み上げていく。
- 符号語はこの木を逆にたどって生成。
- 次の例では、平均符号長 = 2.25ビット ($<\log_2 6 \approx 2.58$ ビット)。

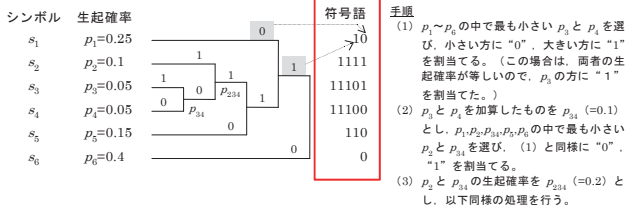
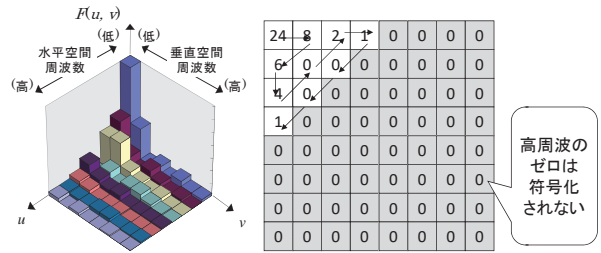


図2-21 ハフマン符号の生成例

小野定康・村上篤道・浅井光太郎「動画画像高効率符号化」オーム社(2005年)

ランレングス符号化



DCT係数を低周波係数から高周波係数へジグザグに走査し、「連続するゼロの数(ゼロラン: 0~63)」と「非ゼロなる値(レベル: -2047~+2047)」の組合せで符号化する
シンボル: (0, 24), (0, 8), (0, 6), (0, 4), (1, 2), (0, 1), (2, 1), EOB(EndOfBlock)

符号語: 00000000011101100000001110100100001000001100001100110101010 10
ビット数: 15 13 9 8 7 3 5 2

図2-17 ジグザグ走査と2次元可変長符号化

小野定康・村上篤道・浅井光太郎「動画画像高効率符号化」オーム社(2005年)

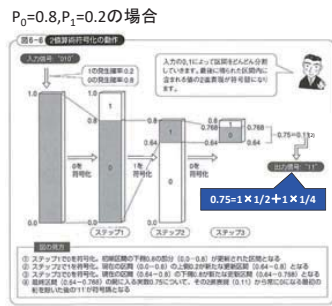
算術符号化(arithmetic coding)

二値算術符号化(binary arithmetic coding)

- 信号を理論限界まで圧縮可能な符号化方式。

符号化方法

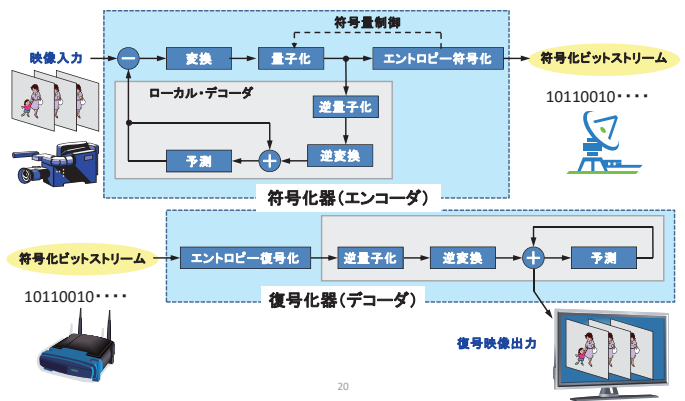
- 前もって入力信号を0,1の二値(バイナリ)化しておく。
- また、二値信号(0または1)の発生確率(P_0, P_1)は与えられているものとする。
- 入力信号を構成する二値信号(0または1)の各発生確率に応じて実数0.0から1.0の間で区間を順次縮めていく。
- 最終区間を特定する実数値の2進表現を符号語とする。



19

大久保崇監修「H.264/AVC教科書」インプレス(2006年)

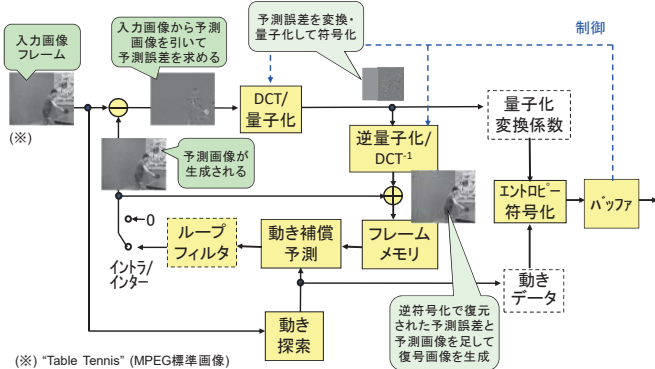
映像符号化システムの一般構成



20

MC+DCTハイブリッド映像符号化

現存するほぼ全ての映像符号化標準の基礎



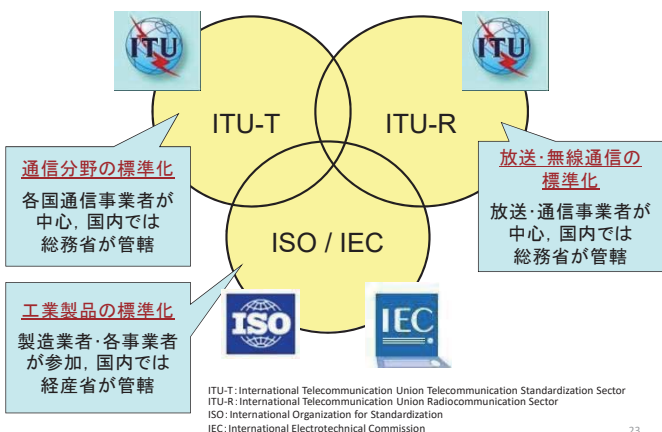
(※) "Table Tennis" (MPEG標準画像)

MC: Motion Compensation (動き補償)

21

3. 業界標準から国際標準へ

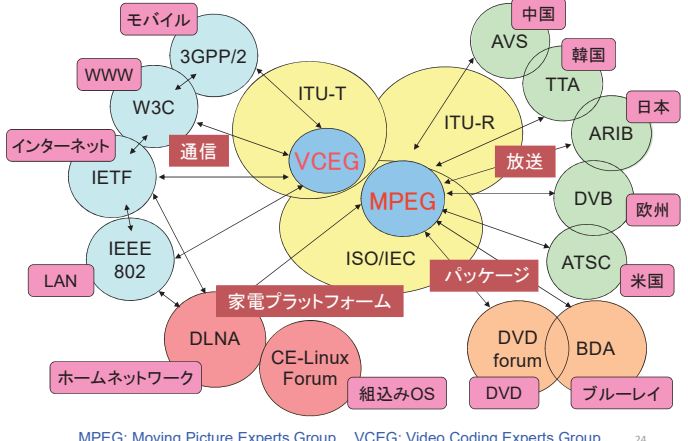
ICT分野の伝統的標準化組織



ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector
ITU-R: International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
ISO: International Organization for Standardization
IEC: International Electrotechnical Commission

23

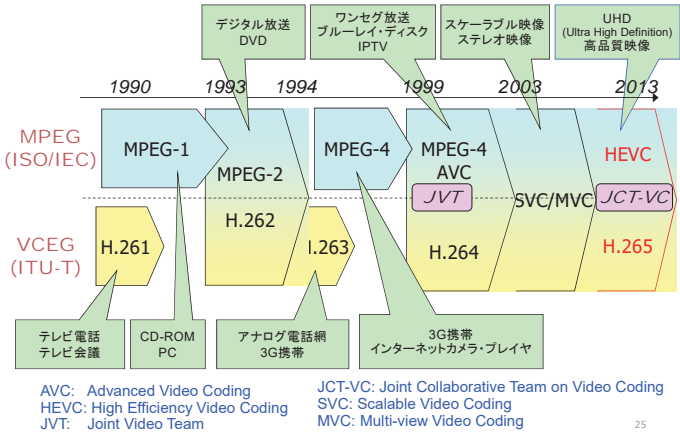
国際標準化機関



MPEG: Moving Picture Experts Group, VCEG: Video Coding Experts Group

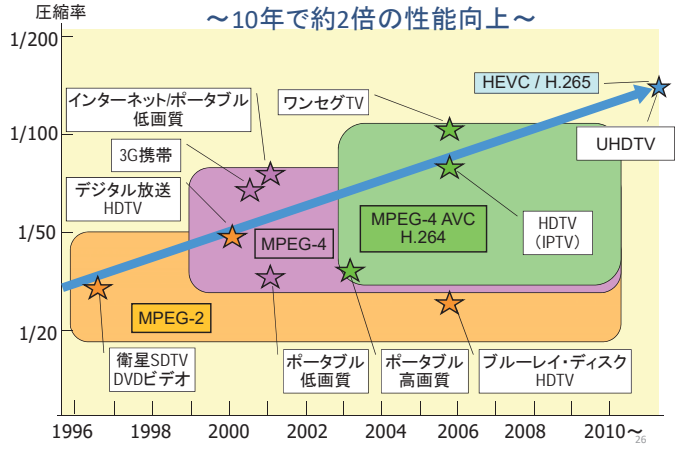
24

MPEGとVCEGの協調関係



25

標準方式による圧縮効率の向上 ～10年で約2倍の性能向上～

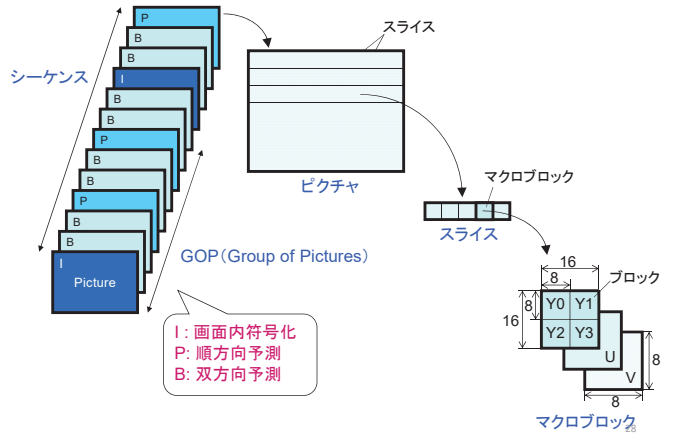


26

4. 国際標準映像符号化技術の実際

～MPEG-2, MPEG-4, AVC/H.264～

MPEG-2: デジタル映像信号の階層構造

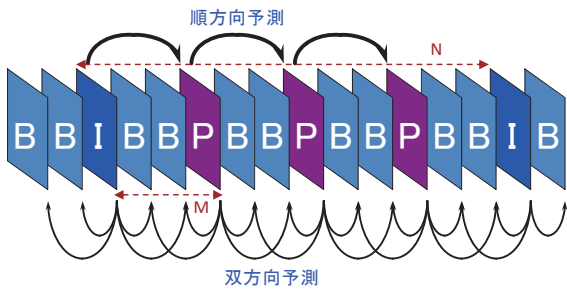


27

双方向動き補償

- GOP構造 (Group Of Picture)

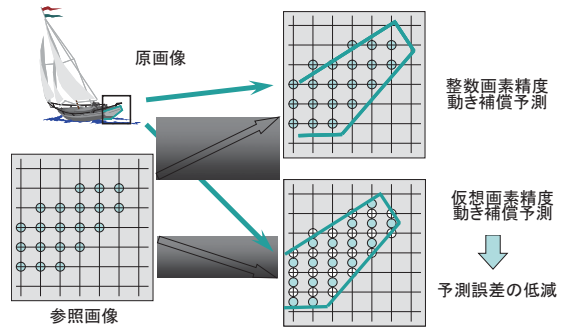
例) N = 12 (ピクチャの間隔)
M = 3 (I, Pピクチャの間隔)



29

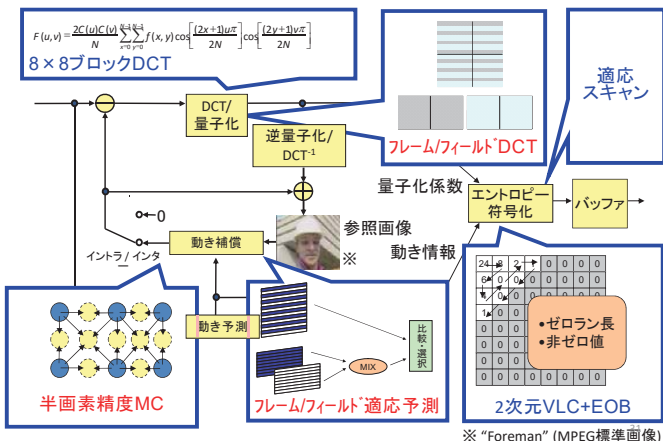
仮想画素精度 動き補償予測

- MPEG-1やMPEG-2では1/2画素精度が、MPEG-4 AVC / H.264では1/4画素精度の動き補償予測が用いられる。
- 仮想画素精度の動き補償予測は、予測信号に対するローパス効果を与える。



30

MPEG-2映像符号化ブロック図



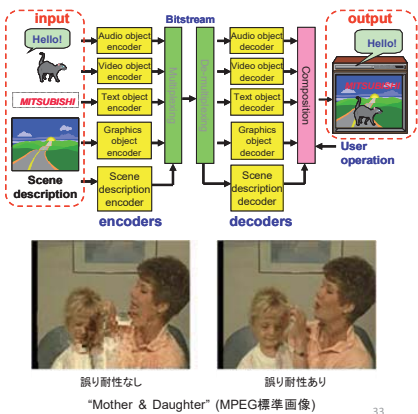
MPEG-2応用製品・アプリケーション



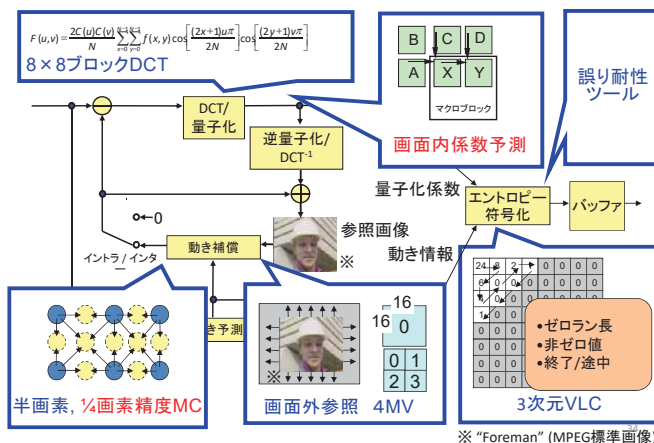
MPEG-4 Visual

特徴

- **超低ビットレート符号化**
 > 狭帯域映像通信・ストリーミング.
- **オブジェクト符号化**
 > ビットストリーム・レベルでのメディアの柔軟な編集・加工.
- **誤り耐性強化**
 > 誤りのある伝送路(10⁻⁴ BER)での画質改善.
 > 携帯マルチメディア(テレビ電話、放送など)に適合.



MPEG-4映像符号化ブロック図



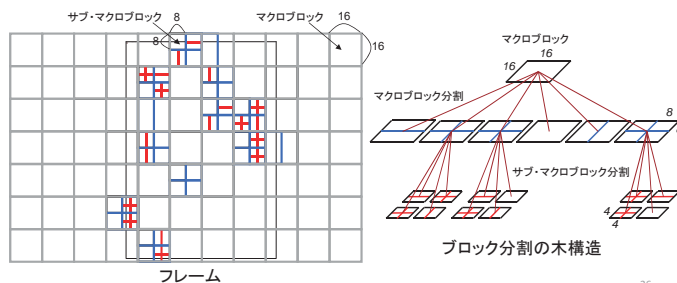
MPEG-4応用製品・アプリケーション



MPEG-4 AVC / H.264

動き補償予測のブロックサイズ最適化

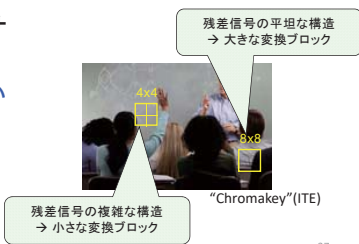
- マクロブロック内のブロック分割は、マクロブロック、マクロブロック分割およびサブ・マクロブロック分割の3階層木構造を取る.
- 最適なブロック分割は、この木構造に沿って、動き補償予測効率と動きベクトル符号長のバランスを評価 (R-D評価) して選択される.



整数変換

- 量子化処理とリンクしたDCTの整数近似.
 > 符号化と復号における逆変換演算精度のミスマッチなし.
- 適応的な変換ブロックサイズ (High Profile).
 > 量子化マトリックスを用いた適応的4x4/8x8変換ブロックサイズ.
 > HDTV信号の局所的信号特性に適合.

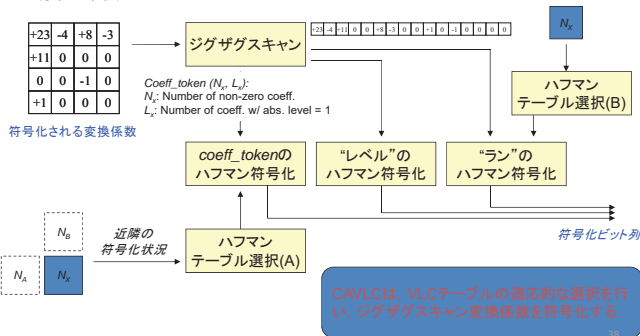
$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$



コンテキスト適応型可変長符号化方式

(CAVLC: Context-Adaptive VLC for transform coefficients)

- 画像信号の局所統計に依存した適応的なハフマンテーブルの選択による符号化効率の改良.



コンテキスト適応型二値算術符号化方式

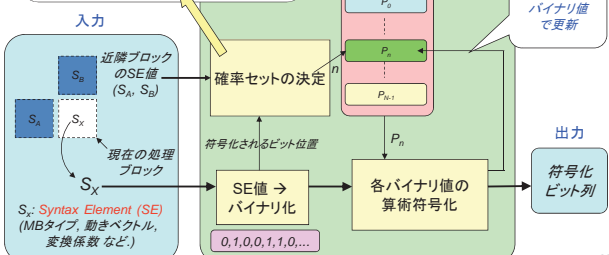
(CABAC: Context-adaptive Binary Arithmetic Coding)

例: 動きベクトル

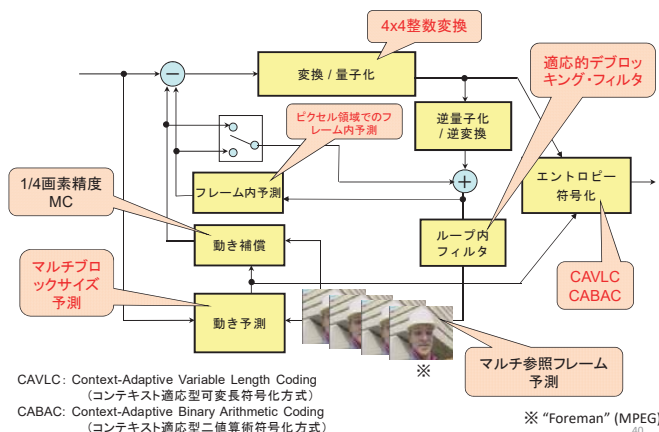
$$c_k(C) = |mov_x(A)| + |mov_x(B)|$$

$$ctx_mod(C, k) = \begin{cases} 0, & \text{for } c_k(C) < 3; \\ 1, & \text{for } c_k(C) > 32; \\ 2, & \text{else} \end{cases}$$

- 各シンボルの出現確率を動的に評価することで符号化利得を得る.



MPEG-4 AVC / H.264映像符号化ブロック図



AVC/H.264アプリケーションの例

デジタル放送

- 衛星放送
- IPTV
- ワンセグ
 - ・ 携帯端末向け地上波デジタル放送

DVD

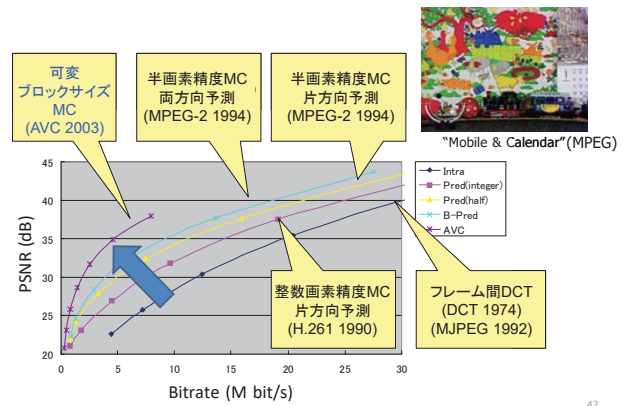
- ブルーレイ

その他

- HDビデオカメラ (AVCHD)
- ポータブルビデオプレイヤー (iPod, PSP)やその変換機



MPEG-4 AVC / H.264 符号化達成性能



5. 次世代映像符号化技術の国際標準化 ～ HEVC (High Efficiency Video Coding) / H.265 ～

2013年1月 国際標準化完了

特徴

- アプリケーション領域
 - 高精細・高品質コンテンツ
 - モバイル
- 映像フォーマット
 - QVGA (320 × 240) ～ 8K × 4K
- MPEG-4 AVC/H.264の2倍の圧縮性能。

データ構造

- 4種類のデータ構造.
 - ブロック形状に対する設定の自由度が高まる.
- CTU (coding tree unit)
 - 符号化処理の基本単位.
 - 8 × 8, 16 × 16, 32 × 32, 64 × 64 (画素) から選択可能.
- CU (coding unit)
 - 予測処理・変換処理等の符号化ツールを適用する基本単位.
- PU (prediction unit)
 - イントラ予測・インター予測に関する情報を共有する基本単位.
- TU (transform unit)
 - 予測誤差に対する直交変換に関する情報を共有する基本単位.

イントラ予測

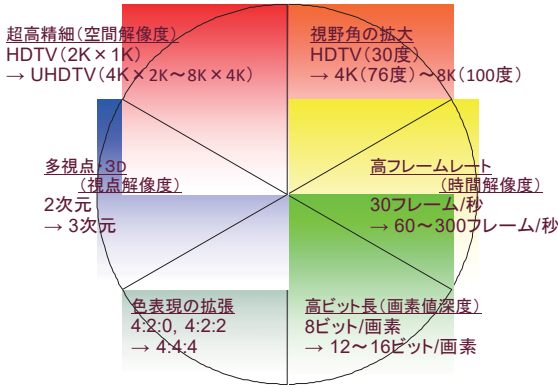
- 方向性予測, planar予測, 直流成分(DC)予測の3通りのアルゴリズムを採用.
- 符号化済みの近傍画素の復号値を参照する外挿予測.
- 予測方向が, H.264/AVC のサポートしていた8方向から**33方向**へと大幅に増加.

直交変換

- DCT ベースの整数変換
 - 4種類のサイズ (4 × 4, 8 × 8, 16 × 16, 32 × 32) をサポート.
- DST ベースの整数変換
 - イントラ符号化の輝度信号の4 × 4サイズのTUに限定して用いられる.
 - イントラ予測の残差信号の振幅値が参照画素位置から離れるほど増加する性質があり, 4 × 4輝度信号イントラ予測誤差で顕著となる.

6. 次世代映像技術開発への取り組み

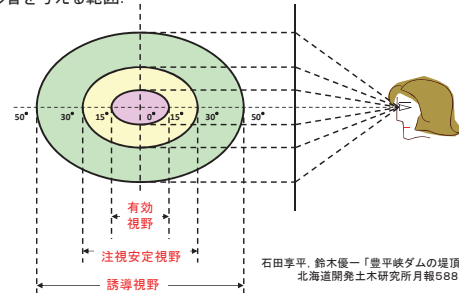
新しい映像表現



49

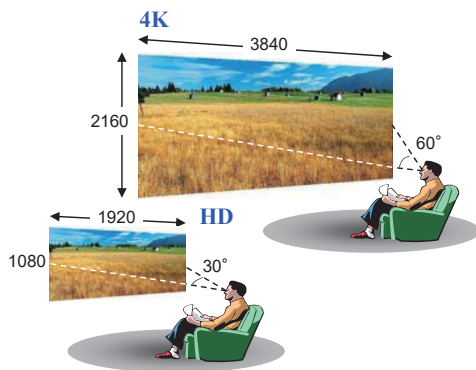
視野

- **有効視野** → **HDTV**
眼球運動だけで情報注視し、瞬時に特定情報を雑音内より受容できる範囲。
- **注視安定視野** → **4K**
頭部運動が眼球運動を助ける状態で発生し、無理なく注視が可能な範囲。
- **誘導視野** → **8K**
呈示された情報の存在が判定出来る程度の識別能力しかないが、人間の空間座標感覚に影響を与える範囲。

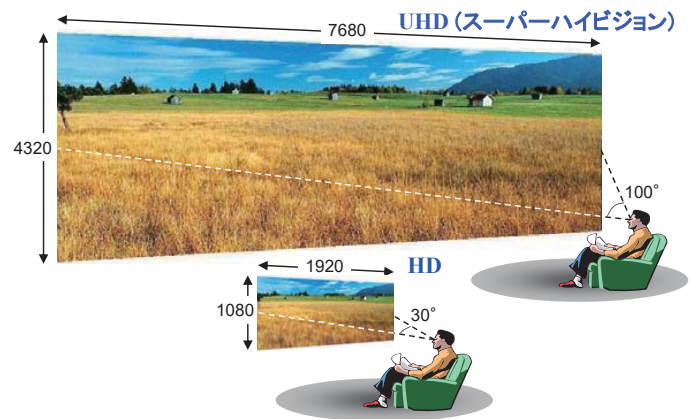


石田幸平、鈴木優「豊平峡ダムの堤頂手摺り設計に関する考察」
北海道開発土木研究所月報588、2002年5月より 50

空間解像度と視野角



空間解像度と視野角



色信号特性

色空間変換

➢ RGB色空間の画像信号を人間の視覚特性を考慮した変換手法により別の色空間(輝度+色差)の信号に変換し、色差信号を間引く(サブサンプリング)ことで情報量を減らす。

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_y R + (1-k_y-k_v)G + k_v B \\ 0.5(B-Y) \\ (R-Y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_y & 1-k_y-k_v & k_v \\ -0.5k_y & -0.5(1-k_y-k_v) & 0.5 \\ 0.5 & -0.5(1-k_y-k_v) & -0.5k_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y + \frac{1-k_y-k_v}{0.5}V \\ \frac{2k_y(1-k_v)Y - 2k_v(1-k_y)U}{1-k_y-k_v} \\ \frac{Y - \frac{1-k_y-k_v}{0.5}V}{1-k_y-k_v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2(1-k_y) \\ -2k_y(1-k_v) & -2k_v(1-k_y) & 0 \\ 1 & -k_y-k_v & 1-k_y-k_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

(a) 変換・逆変換式

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.1146 & -0.3854 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4542 & -0.0458 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

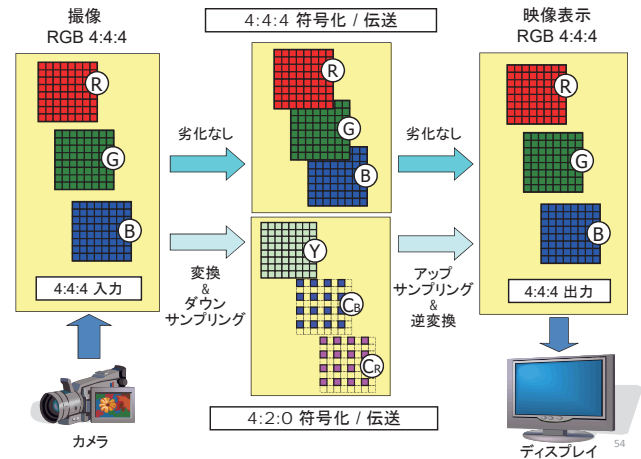
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ -1 & -0.344 & -0.714 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

$$(k_y, k_v) = (0.299, 0.114)$$

YUVをYCbCrと表します。
(b) ITU-R BT.709方式 (c) ITU-R BT.601方式

図2 RGBとYUV間の変換・逆変換式
山岸「知っておきたいキーワード4:4:4と4:2:0」
映像情報メディア学会誌Vol.62, No.10, pp.1542-1546(2008)

カラーサンプリング



まとめ

1. 映像符号化技術の歴史
- テレビ電話から高品位映像アプリケーションまで
2. デジタル映像符号化技術の基本
- 予測, 直行変換, 量子化, エントロピー符号化
3. 業界標準から国際標準化へ
- ITUT (VCEG)とISO/IEC (MPEG)の活動
4. 国際標準映像符号化技術の実際
- MPEG-2, MPEG-4, AVC/H.264
5. 次世代映像符号化技術の国際標準化
- HEVC/H.265
6. 次世代映像技術開発への取組み
- 超高精細, 視野角の拡大, 高フレームレート, 高ビット長,
- 色表現の拡張, 多視点・3D(視点解像度)

55

開発者の技能を考慮に入れたシステム開発スケジューリング最適化の研究

広島工業大学 西村 隼人,
 広島工業大学 山岸 秀一,
 広島工業大学 松本 慎平
 広島工業大学 加藤 康介

Study on the optimization of system development scheduling in consideration of the skill of developers

Hiroshima Institute of Technology Hayato Nishimura,
 Hiroshima Institute of Technology Shuichi Yamagishi,
 Hiroshima Institute of Technology Shimpei Matsumoto,
 Hiroshima Institute of Technology Kosuke Kato

1 研究目的

システム開発において、技術力不足や関係者間でのスケジュール調整の手間取りなどにより、プロジェクトの遅延がおこる可能性がある。そのため、納期を守れないなどの契約違反が起き、高額な損害賠償を要求されるリスクが発生する。従って、システム開発におけるスケジュール管理やタスク管理は非常に重要な課題である。ところで、「モノの生産」の分野では、仕事（ジョブ）を機械に効率的に割り振ることで、完了時刻や納期遅れ等を最小化することを目的としたスケジューリング問題が研究されている[1]。そこで、本研究では「モノの生産」でのスケジュール管理の手法を「システム開発」に適用することを目的とする。ただし、システム開発では設計やプログラミングといった工程（「モノの生産」の「機械」に該当）を動かす人のアサインが可能である。人には能力差があり、従来のモノの生産スケジューリングに、機械の運転手的な役割をする人のパラメータを加えたスケジューリング問題を考える必要がある。さらに、各工程の担当者は変えることができることも考慮しなければならない。そこで、これらのことを踏まえて、システム開発における最適なスケジュール管理の方法を検討し提案する。

2 研究の概要

システム開発に携わる各人をメンバと呼び、このメンバが複数集まってチームを構成する。そして、スケジューリングを考える上で、次のような条件を設定する。

- ①チームはソフトウェア開発の全体を担当し、同時に複数のソフトウェア開発に携わる。
- ②ソフトウェア開発は工程で分割され、各工程に担当メンバを1人ずつ割り当てる。そして、メンバは各工程の作業を行う。

③ソフトウェア開発を構成する工程の作業順序は、すべて同一である。

④各メンバは同時に1つの工程しか担当できず、一旦ある工程の作業を開始すると完了するまで、その工程の作業を行う。

⑤各ソフトウェア開発において、それを構成する工程の作業は同時に1つしか実行できない。

この条件の下で、全てのソフトウェア開発工程が完了する時刻を最早にするスケジューリング（各メンバが、どの順序で各ソフトウェアの担当工程の、どの作業を行うか）を考えると、「モノの生産」におけるフローショップ・スケジューリング問題に該当する。そこで、仕事数を n 、工程数を m とし、仕事を J_j ($j = 1, 2, \dots, n$)、工程を M_i ($i = 1, 2, \dots, m$) のように表し、工程 i での仕事 j の処理時間を p_{ij} とし、次に示す順列フローショップ・スケジューリング問題（FSSP）の定式化に当てはめる[2]。仕事 j が k 番目に処理されることを1、そうでなければ0の値をとる変数 x_{jk} 、工程 i に関して k 番目に処理される仕事の開始時刻 s_{ik} 、工程 i に関して k 番目に処理される仕事の完了時刻 f_{ik} ($i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$) を決定変数として、全仕事の全行程が完了する時刻を最小化目的関数とする次のような数理計画問題として定式化される。

$$\text{minimize } f_{mn} \quad (0)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^n x_{jk} = 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jk} = 1, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$f_{ik} \leq s_{i,k+1}, i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

$$s_{ik} + \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{jk} \leq f_{ik}, i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$f_{ik} \leq s_i + 1, k, i=1, 2, \dots, m-1; k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\}, j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$s_{ik} \geq 0, i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$f_{ik} \geq 0, i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

ここで目的関数 f_{mn} は、最終工程 m に関して n 番目 (最後) に処理される仕事の完了時刻を表す。また、制約条件(1)は仕事 j の処理回数は一回だけであることを表し、(2)は k 番目に処理される仕事は1個だけであることを表す。(3)は各工程について同時に処理される仕事はないことを表し、(4)では各工程は開始したら完了するまで遂行することを表す。(5)は各仕事について同時に処理される工程はないことを表し、(6)は決定変数 x_{jk} が 0-1 変数、(7)、(8)は決定変数 s_{ik} 、 f_{ik} が非負であることを表す。さらに、できるだけ遊休時間を減らすために、目的関数に以下のような拡張項を追加することで、次のような条件式が得られる。

$$\text{minimize } f_{mn} + \rho f_{1n} + \rho f_{2n} + \dots + \rho f_{mn} \quad (0)'$$

subject to

制約条件 (1) ~ (8)

ここで、 ρ は微小な正の定数である。

本研究では人の能力を考慮に入れるために、各メンバの能力と配置の式を定式化に加える。工程 i にメンバ w が配置されるときを 1、そうでなければ 0 の値をとる変数 y_{iw} を決定変数に追加する。そのために (4) を以下の式に変更する。

$$s_{ik} + \sum_{j=1}^n p_{ijw} x_{jk} \cdot f_{ik} \leq M(1 \cdot y_{iw}), i=1, 2, \dots, m, \\ k=1, 2, \dots, n; w=1, 2, \dots, m \quad (4)'$$

ここで、 M は大きな正の定数である。また、メンバ w による工程 i での仕事 j の処理時間を p_{ijw} とし、以下の式を追加する。

$$\sum_{w=1}^m y_{iw} = 1, i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$y_{iw} \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, m; w=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

ここで、(9)は工程 i に配置されるメンバ w は一人だけであることを表し、(10)は決定変数 y_{iw} が 0-1 変数であることを表す。

3 検証実験

提案手法を、線形混合整数計画ソルバー「lp_solve 5.5.2.3」により求解する。ここで (株) NTT データ数理システムのサイト [3] で公開されている小規模な例題を取り上げる。この問題は、仕事数が 3、工程 (機械) 数が 3 で、表 1 に示すように工程 M_i (i

= 1, 2, 3) と仕事 J_j ($j = 1, 2, 3$) による処理時間が p_{ij} で表される。この例題の最早作業完了時刻は 28 である。ここで、メンバの人数が 3 である場合を考え、各人を A_w ($w = 1, 2, 3$) とする。表 2 に示す A_w の各工程に対する能力を d_{wi} として処理時間に乗算する。以上の条件で、各メンバをいずれかの工程に割り振り、処理時間を計算して定式化を行い、求解した結果を表 3 に示す。理論値どおりの結果が得られ、提案手法の妥当性が検証された。

表 1 フローショップ・スケジューリング問題の処理時間

	M_1	M_2	M_3
J_1	5(= p_{11})	8(= p_{21})	4(= p_{31})
J_2	5(= p_{12})	4(= p_{22})	6(= p_{32})
J_3	6(= p_{13})	5(= p_{23})	5(= p_{33})

表 2 メンバの能力値

	M_1	M_2	M_3
A_1	1(= d_{11})	2(= d_{12})	3(= d_{13})
A_2	3(= d_{21})	1(= d_{22})	2(= d_{23})
A_3	2(= d_{31})	3(= d_{32})	1(= d_{33})

表 3 求解結果

	工程 (M_i)			最早完了時刻 (f_{mn})	仕事 (J_j) の処理順序
	M_1	M_2	M_3		
メンバ (A_w) の配置	A_1	A_2	A_3	28	J_1, J_2, J_3

4 まとめ

「モノの生産」におけるフローショップ・スケジューリング問題をシステム開発のスケジューリングに適用し、開発に関わる人の能力を重みとして処理時間に加えて定式化を行った。そして、コンピュータによる解析を行った結果、最適解を得ることが出来た。今後は人の能力による処理時間の変化と、工程への配置の方法を定式化に加える方法を検討したい。

参考文献

- [1] 石淵久生, 村田忠彦: 多目的フローショップ・スケジューリング問題のための遺伝的局所探索法, 日本経営工学論文誌, vol. 48, no. 6, pp. 301-313 (1998) .
- [2] 久保幹雄 他: 新しい数理最適化: Python 言語と Gurobi で解く, 近代科学者 (2012) .
- [3] 株式会社 NTT データ数理システム 2. 25. 1 オープンショップ問題:
<http://www.msi.co.jp/nuopt/docs/v18/examples/html/02-25-01.html>

フローショップスケジューリング問題に対する 一人モンテカルロ木探索法の応用に関する研究

広島工業大学	谷本 和貴
広島工業大学	松本 慎平
広島工業大学	垣内 洋介
広島工業大学	加藤 浩介
広島工業大学	山岸 秀一

A Study on the Application of Single-Player Monte-Carlo Tree Search for Flow-Shop Scheduling Problem

Hiroshima Institute of Technology	Kazuki Tanimoto
Hiroshima Institute of Technology	Shimpei Matsumoto
Hiroshima Institute of Technology	Yosuke Kakiuchi
Hiroshima Institute of Technology	Kosuke Kato
Hiroshima Institute of Technology	Shuichi Yamagishi

1 研究目的

最適化問題のひとつにスケジューリング問題があり、その解法は古くから考えられてきた[1]。スケジューリング問題は容易に解けるものから極めて難しいものまで幅広く存在している。容易な問題では、最短経路問題、各種フロー問題などのネットワーク問題へと置き換えることで、効率的なアルゴリズムを適用できるため、十分実用的に解くことができる[2]。しかし、計算量理論が確立されて以後、大規模で複雑なスケジューリング問題では現実的な時間で最適解を得ることは極めて困難であることが指摘されている。特に生産スケジューリングにおいては、理論的な研究の多くは数理的に単純化された問題を取り扱ったものがほとんどであり、様々な制約が複雑に絡み合っている。加えて、現実的諸問題の解決を目指す場合、長期に渡っての運用を考慮しなければならない。たとえば、解法を設計する時点では確認されなかった

要因であっても、実運用の段階で無視できない重要な要因として顕在化する可能性は非常に高い。特に、運用時に至って事前に予測・考慮されていないことが起こる場合や、問題の構成要素が予め確定的に与えられていない場合も少なくない。したがって、現実的諸問題を解く場合、問題に関わる様々な要因を詳細に記述し明確に定式化することはほぼ不可能であるため、厳密的解法によるアプローチではなく、現実的な時間で有効な近似解を求めるアプローチが多くの場合で採用されている[3]。とりわけ近似解法としては、ソフト最適化に基づくメタヒューリスティック解法が有効であると考えられている。

本研究では、一人完全情報ゲームの解法として提案された Single Palyer MCTS (SP-MCTS)に着目し[4]、これをフローショップスケジューリング問題の解決に応用することを目的とする。実験の結果、SP-MCTS はメタヒューリスティック解法として有効であることを確認した。

2 フローショップスケジューリング問題

フローショップスケジューリング問題の基本モデルは以下のように定義される[5].

定義: m 台の機械(M_1, M_2, \dots, M_m)で n 個のジョブ(J_1, J_2, \dots, J_n)が加工されるが、各ジョブは m 台全ての機械を M_1 から順々に訪問し、これら機械を訪問する順序は全てのジョブで同一である。また、各ジョブの各機械における加工時間は所与である。このとき、与えられた評価尺度を最適にするようなジョブの処理順序を求める問題。

上記の定義ではジョブの追い抜きを許すが、その場合の実行可能スケジュール数は $(n!)^m$ であり、 m や n の増加に対して総スケジュール数が爆発的に増加する。実際には、正規目的関数に対しては最上流側の2台の機械(M_1, M_2)上のジョブの順序は同一と考えて良く、さらに、目的関数が総所要時間の場合は最下流側の機械(M_{m-1}, M_m)上でも同一と考えて良く[6]、このような場合の総スケジュール数は $(n!)^{m-2}$ であるが、いずれにせよ総スケジュール数は非常に多い。そこで、最適スケジュールを見つけることを敢えて諦めて、ジョブの追い抜きを許さないスケジュール(順列スケジュール)に限って対象とし、その中での最適スケジュールを得る問題がある。多くの研究は、この追い越し禁止のフローショップ問題(順列フローショップ, permutation flow shop などとも呼ばれる)を対象としており、本研究もこのフローショップ問題を SP-MCTS の応用対象として取り扱うものとする。

3 一人モンテカルロ木探索法

本研究で取り扱う SP-MCTS[4]は、囲碁、将棋といった二人零和有限確定完全情報ゲームで優れた成果を上げている Monte-Carlo Tree Search (MCTS)を改良したものであり、基本的なアルゴリズムは MCTS と同様である。評価関数が不要な

最良優先探索法である MCTS は、葉ノードにモンテカルロ評価を与えていき探索木を構成する[7]。一般的に、MCTS はルートのみ状態から始める。設定された計算時間を消化するか決められたノード数に到達するか解の満足度水準に到達するまで、4つの手順を繰り返し実行する。

- 探索木のルートから始まり、UCT が最大のノードを葉ノードに到達するまで繰り返し選択する選択戦略
- 選択されたノードから終了までモンテカルロシミュレーションする実験戦略
- 探索木に子ノードを追加する拡張戦略
- 実験戦略で得た結果を用いて、葉ノードからルートまで UCT を逆方向に更新する逆伝播戦略

本研究では、拡張戦略で追加されたノード数(拡張ノード数)を記憶しておき、拡張ノード数がある値に達するまで4つの手続きを繰り返し実行する。それぞれの手順の詳細を以下に示す。

選択戦略: この戦略では、探索木のルートノードから始まり、ひとつの子ノードを再帰的に選択する処理を構築された葉ノードに到達するまで繰り返し実行する。シミュレーション開始時では探索木はルートノードしか持っていないため、必然的にルートノードが選択される。複数回のシミュレーションが実行された後、探索木にはいくつかの子ノードが生成される。ここで、子ノードを持つノードを親ノードと定義する。本論文では、親ノードも選択対象に含めて UCT が最大のノードを選択する。なお、本研究は次の例外を用意することで葉ノードを作ることのできるノードだけを選択対象とした。

- 子ノードを新規に拡張可能なパターンが存在しないノードは選択されない。
- プレイアウトまでの全てのパターンが展開済みのノードは選択されない。

本研究では, Schadd らにより提案された SP-MCTS のために改良された UCT を利用した [4].

実験戦略: 選択戦略で選ばれた最大の UCT を持つノードを葉ノードとする. この戦略では, 葉ノードを起点にして, 発見的手法を組み合わせた擬似ランダムシミュレーションによりプレイアウトまで探索木を展開する.

拡張戦略: この戦略では, これまでに構築された探索木に新しいノードを追加する. 本研究では, 1 回のシミュレーションにつき 1 つの子を拡張する Coulom の手法を採用した [7]. 実験戦略で葉ノードからシミュレーションを行った際, 最初に出現したノードを探索木にひとつ追加する. 状態を記憶したノードが新規に追加される.

逆伝播戦略: この戦略では, シミュレーションの起点となった葉ノードからルートノードまで UCT を順に更新する. 新しいシミュレーション結果を得た葉ノードには, ひとつの子ノードが新たに拡張されている. また, 選択戦略で選ばれた全てのノードは記憶されている. したがって, 拡張された子ノードからルートまで逆に辿りながら UCT を更新していく.

4 実験及び結果

SP-MCTS のフローショップ問題に対する有効性を確認するため, フローショップスケジューリングのベンチマーク問題¹[8]に対して SP-MCTS を適用した. 問題データとしては, Taillard, 20 jobs 5 machines, 20 jobs 10 machines, 20 jobs 20 machines の Test #1 を対象とし, それぞれ 100 試行実験し解を導出した. なお, 全ての問題にお

¹

<http://mistic.heig-vd.ch/taillard/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>

いて, 混合整数計画問題として定式化し lp_solve² で求解したところ, 厳密解を得ることは困難であった. 本研究では, SP-MCTS の有効性について,

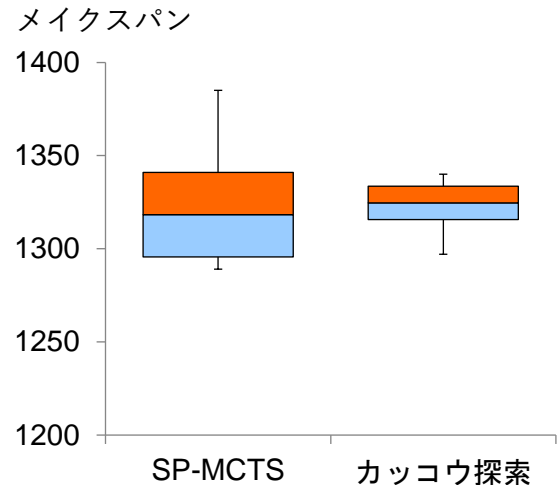


図 1 Taillard 20 jobs 5 machines での結果

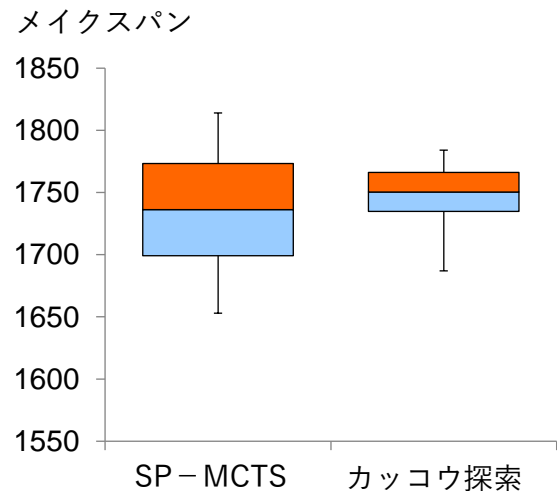


図 2 Taillard 20 jobs 10 machines での結果

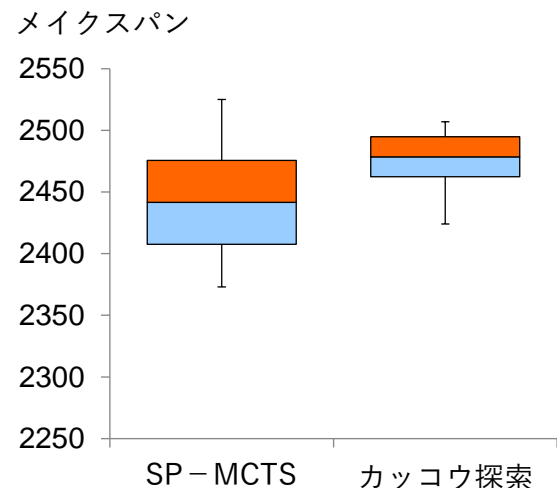


図 3 Taillard 20 jobs 20 machines での結果

既存のメタヒューリスティック手法による解を基準に述べることにした。メタヒューリスティック手法として、本研究においては、実装が容易であり、かつ、有効な解を高速に得ることが可能な手法である POSH WALF のカッコウ探索³に着目し、解を導出した。カッコウ探索のパラメータは、先に引用した POSH WALF のデフォルト設定に基づき、試行回数を 50000、巢の個数を 7、托卵が発見された場合に廃棄される巢の数を 2、托卵が発見される確率を 0.2 とした。カッコウ探索と条件を合わせるため、SP-MCTS の処理打ち切りノード数を 50000 とし、UCT のパラメータは文献 [4]に従い、 $C=1$, $D=20000$ とした。

実験の結果を図 1-3 に、詳細な値を表 1-3 にそれぞれ示す。図 1-3 において、ひげは最大・最小、箱は標準偏差、中央は平均値とする。図 1 と表 1 に示す問題の上界値(これまで得られた解で最良の値)は 1278、下界値(厳密解)は 1232、図 2 と表 2 に示す問題の上界値は 1582、下界値は 1448、図 3 と表 3 に示す問題の上界値は 2297、下界値は 1911 である。

5 結論

本研究では、SP-MCTS [4]に着目し、これをフローショップスケジューリング問題の解決に応用すること、その有効性について、既存のメタヒューリスティック手法を基準に評価することを目的に取り組んだ。実験結果より、SP-MCTS のメタヒューリスティック手法としての有効性を明らかにするとともに、その特徴を確認した。

参考文献

- [1] Joseph Y-T. Leung, Handbook of SCHEDULING Algorithms, Models, and Performance Analysis, CHAPMAN & HALL/CRC, 2004.
[2] P. Brucker, Scheduling Algorithms,

Springer-Verlag, Berlin, 1998.

- [3] B. L. MacCarthy and J. L. Liu, Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling, International Journal of Production Research, 31(1), pp. 59-79, 1993.
[4] M. Schadd, M. Winands, H. Heric and H. Aldewereld, Addressing NP-Complete Puzzles with Monte-Carlo Methods, Proc. of the AISB 2008, Vol. 9, pp. 55-61, 2008.
[5] 今泉淳, フローショップスケジューリング問題とその諸変形: モデルとその分類, 経営研究所論集, 第 23 号, pp. 259-274, 2000.
[6] 鍋島一郎, スケジューリング理論, 森北出版, 1974
[7] R. Coulom, Computing elo ratings of move patterns in the game of go, In Computer Games Workshop, Amsterdam / The Netherlands, 2007
[8] E. Taillard, Benchmarks for basic scheduling problems, EJOR, Vol. 64, No. 2, pp. 278-285, 1993

表 1 Taillard 20 jobs 5 machines での結果

5x20	最小値	最大値	平均
SP-MCTS	1289	1385	1318.3
カッコウ探索	1297	1340	1324.6

表 2 Taillard 20 jobs 10 machines での結果

10x20	最小値	最大値	平均
SP-MCTS	1653	1814	1736.3
カッコウ探索	1687	1784	1750.5

表 3 Taillard 20 jobs 20 machines での結果

20x20	最小値	最大値	平均
SP-MCTS	2373	2525	2441.6
カッコウ探索	2424	2507	2478.6

³ <http://posh-wolf.herokuapp.com/problem>

Satisfiability Modulo Theories (SMT) に基づく ソフトウェア開発を想定したビジネススケジューリング

広島工業大学情報学部 佐々木直人, 加藤浩介, 垣内洋介, 松本慎平, 山岸秀一

Business Scheduling for Software Development Based on Satisfiability Modulo Theories (SMT)

Faculty of Applied Information Science, Hiroshima Institute of Technology

Naoto Sasaki, Kosuke Kato, Yosuke Kakiuchi, Shimpei Matsumoto, Shuichi Yamagishi

1 はじめに

ビジネスの現場において、納期を守れないなどの契約違反があると高額な損害賠償を請求される場合もあるため、個人またはチームのスケジュール管理やタスク管理は重要である。本研究では、ソフトウェア開発における自動スケジュール生成・管理、特に、チーム開発におけるチームに所属するメンバの自動スケジュール生成・管理に焦点をあてる。

現状で多くのスケジューラソフトが存在するが、個人ごとのスケジュール管理や個人の習慣づけのための繰り返し作業の管理を目的としていたり、実際のスケジュールは手入力をしたり、というものが多く、チーム開発における各メンバの自動スケジュール生成・管理の機能をもつものは見当たらない。

そこで、本研究では、このような機能をもつビジネススケジューラの開発を目標とする。特に、ある状況でのソフトウェアのチーム開発におけるスケジュール生成は、いわゆるオープンショップスケジューリング問題としてとらえることができるため、線形混合 0-1 計画問題として定式化され、線形混合整数計画ソルバーによる求解が可能であるが、問題規模が大きくなるにつれて処理時間が急激に増加する、あるいは、定式化の柔軟性・拡張性が乏しいという問題点がある。本研究では、

Satisfiability Modulo Theories (SMT) に基づく定式化を行い、その解法について検討する。

2 ソフトウェア開発におけるスケジューリング

次のような状況を考える。チームはソフトウェア開発におけるコーディングを担当しており、同時に複数のソフトウェアのコーディングに携わるものとする。その際、コーディングは機能単位または関数単位のモジュールに分割され、各モジュールの担当メンバ（1 名）は定まっており、各ソフトウェアの各モジュールのコーディングを行い、各ソフトウェアのモジュールの作成順序に制限はないものとする。ここで、次のような制約を仮定する。①各メンバは同時に 1 つのモジュール作成しか担当できない、②一旦あるモジュールの作成を開始すると完了するまでそのモジュール作成を行うものとする。③各ソフトウェアのモジュールは同時に 1 つしか作成できないものとする。

この状況において、すべてのソフトウェアの全モジュールの作成が完了する時刻を最早にするスケジュール（各メンバがどの順序でモジュールを作成するか）を求めることを考える。ここで、ソフトウェアを仕事、モジュール作成を作業、担当メンバを機械と考えると、この問題はオープンショップスケジューリング問題(OSSP) となり、線形混合 0-1 計画問題として定式化され、線形混合

整数計画ソルバー lp_solve 等により求解可能である。しかし、前述のように問題規模が大きくなるにつれて処理時間が急激に増加する、定式化の柔軟性及び拡張性が乏しいという問題点がある。本研究では、ソフトウェア開発の状況をより反映させるため、目的を各ソフトウェアに設定された納期に対する遅れを最小化することに変更する。ここで、柔軟性及び拡張性を考慮して、SMT に基づく定式化を行い、その解法について検討する。ここで、SAT (SAT is feasibility problem) が命題論理式の充足可能性を扱うのに対し、SMT は述語論理式の充足可能性を扱うことができ、問題の表現力が高いという特徴がある。

3 SMT に基づく定式化と求解方法

ソフトウェア (OSSP の仕事に相当) が n 、メンバ (OSSP の機械に相当) が m である場合を考えて、ソフトウェアを $J_j, j = 1, 2, \dots, n$ 、メンバを $M_i, i = 1, 2, \dots, m$ のように表す。 M_i が実行する J_j の作業の実行時間を p_{ij} とする。さらに、 M_i が実行する J_j の作業の開始時刻を s_{ij} 、 M_i が実行する J_j の作業の完了時刻を $f_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ を決定変数とする。本研究では、上記のスケジューリング問題の制約 (OSSP の制約と同じ) を SMT に基づき、次のように定式化する。

$$\begin{aligned} & ((f_{ik} \leq s_{ij}) \vee (f_{ij} \leq s_{ik})), \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ & k = (j+1), (j+2), \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & ((f_{kj} \leq s_{ij}) \vee (f_{ij} \leq s_{kj})), \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ & k = (i+1), (i+2), \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_{ij} = s_{ij} + p_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$s_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$f_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

ここで、制約条件(1)は、各メンバは複数のソフトウェアに関する作業を同時に実行することができないことを表し、制約条件(2)は各ソフトウェアに関する複数のメンバによる作業は同時に実行できないことを表す。制約条件(3)は各メンバがあるソフトウェアの作業を実行するとき、その作業の完了時刻はその作業の開始時刻にその作業の実行時間を加えた時刻より遅いことを表す。制約条件(4),

(5)は時刻を表す決定変数 s_{ij}, f_{ij} が非負であることを表す。

一方、目的は、ソフトウェア j に設定された納期 d_j に対する遅れ L_j を次のように定義し、

$$L_j = \begin{cases} f_{i_{\max}, j} - d_j & (f_{i_{\max}, j} - d_j \geq 0) \\ 0 & (f_{i_{\max}, j} - d_j < 0) \end{cases}$$

L_j の和の最小化することとする (この問題を納期遅れ OSSP とよぶ)。ここで、 $f_{i_{\max}, j}$ は $f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}$ の最大値、すなわち、ソフトウェア j の全作業の完了時刻を表す。先述の SMT に基づく定式化にこの目的を反映させるために、次のような制約を加える。

$$L_1 + L_2 + \dots + L_n \leq \tau \quad (6)$$

このようにすることで、(1)~(5)を満たし、かつ、納期遅れの和が τ 以下であるスケジュールが存在するかどうかを判定する問題になり、(1)~(6)を満たす最小の τ を求めれば、本問題の納期遅れ和の最小値が得られる。

上記の納期遅れ OSSP は SMT に基づいて記述されており、求解には SMT ソルバーが利用可能である。利用可能な SMT ソルバーとしては、OpenSMT, Yices, Z3 など存在する^[1]。

4 おわりに

本研究では、ビジネスの現場におけるスケジューリング、特に、ソフトウェアのチーム開発におけるチームの各メンバの自動スケジュール生成・管理に焦点をあてた。ソフトウェア開発のある助教におけるスケジューリング問題を柔軟性の高い SMT に基づいて定式化するとともに、求解手法として利用可能な SMT ソルバーを紹介した。

今後の展望としては、目的として総人件費最小化、労働時間平準化等についての考慮、さらに、多目的スケジューリング、多重レベルスケジューリングなどへの拡張が考えられる。

参考文献

- [1] 梅村晃広：“SAT ソルバ・SMT ソルバの技術と応用”，コンピュータソフトウェア，Vol. 27, No. 3, pp. 24-35(2010)

アイトラッキングによる Web デザインの分析に関する研究

広島工業大学

堀川 草央里

広島工業大学

松本 慎平

近畿大学

加島 智子

A Study on the Analysis of Web Design with Eye Tracking

Hiroshima Institute of Technology

Saori Horikawa

Hiroshima Institute of Technology

Shimpei Matsumoto

Kindai University

Tomoko Kashima

1 研究目的

近年、BtoC ビジネスの主戦場が Web へと変化したことに伴い、Web サイトへのアクセス数のうち、商品購入や資料請求、会員登録等に至った割合のことである CVR(Conversion Rate)や、サイト滞在時間の向上に直結する Web サイトのデザイン設計・構築法がサイト運営者側から望まれている。Web サイトの改善は最適化と呼ばれる。具体的には、企業など様々な Web サイトにおいて、Web サイトから結び付く売上やユーザの反応といったログデータを収集したうえで、“ユーザがサイト内で興味を持った箇所の明確化”や“ユーザの興味関心を喚起させる戦略”を考慮して Web サイトのデザインやページ間の関係を改善する Web 開発の諸活動を“Web 最適化”と呼ばれることが多い。一方で、企業のウェブサイトの場合、自社で制作をしていない場合が多い[1]。このようなウェブサイトの場合、十分な額の製作費をかけて制作された Web サイトの場合、ユーザの反応が良くないという理由だけでウェブサイトを再構築・最適化することは現実的ではない。そこで、こういった場合に有用であると考えられているウェブサービスとして、“KAIZEN PLATFORM”¹がある。KAIZEN PLATFORM は、A/B テストを行うための

ツールと同時に、学生や一般ユーザは勿論、社会人の副業として、Web ディレクターやクリエイター及びそのテクニカルなサポートを包括的に提供しているサービスである。KAIZEN PLATFORM を利用することにより、CVR を容易な仕組みにより向上させることが可能となる。

本研究では、“KAIZEN PLATFORM”による A/B テスト結果に着目した。この A/B テスト結果に対して、通常のアイトラッカーを用いた実験を行うことにより、実際にユーザが Web サイトを閲覧した履歴の追跡結果と A/B テストの結果を対応付けることができるようになる。これにより、A/B テストで導かれた結果の根拠をより客観的な観点から理解できることから、Web サイト最適化をシステムティックに可能とする知見獲得に繋げられるのではないかと考えた。本研究では、現時点で述べられている CVR が良い Web サイトの特徴[2,3]に即してデザインされ Web サイトと、そうでないデザインとを比較して実験を行った。

2 実験方法

2.1 方針

Web デザインの質を客観的に理解するにあたって、本研究はアイトラッキングに着目した。アイトラッカーにより、Web サイトのデザインの良し悪しを科学的に分析し、心理面への影響を探る

¹ <https://kaizenplatform.com/ja/>

ことができると言われている[4,5]. 加えて, アイトラッカーを用いることで, 結果として人の目の動きを記録した詳しいデータを見せることが可能であるため, 現時点で分かっている`CVR が良い Web サイトの特徴"の根拠も説明できるようになると考えられる. 実験で使用する Web サイトの詳しい情報としては, お得情報など企業にとって伝えたいポイントの表示の仕方に差があり, それによって商品購入や申し込み手続き, 入会手続きに繋がっているかどうかの差が出ているサイトを KAIZEN PLATFORM 内から抜粋し使用する. KAIZEN PLATFORM の利用により, 実際の企業のホームページのデザインを使用できるため, 人がどこを見てどのように購買に結び付いているかを現実的に検証可能となる.

コンバージョンが良い Web サイトの特徴, コンバージョンを上げるために改善すべき点, 表示の仕方について, 3 つの項目が明らかにされている[2,3]. 1 つ目は見出しであり, 概要ではなくその商品に対する利点を書くことと良いとされている. 2 つ目は申込ボタンであり, 目立つデザインでクリックしたくなるようなユニークなデザインがコンバージョン UP に繋がるとされている. 3 つ目は注目箇所についてであり, 太字やアンダーライン, ハイライトなどで他の文字とは差をつけるとされている. 本研究では, 先行研究[6]の実験プロトコルに沿い, 先行研究での`割引表示の有無"を上記3点と対応付けることが可能と考え, 分析を行った.

2. 2 手法

実験では, KAIZEN PLATFORM 内に集められた企業 Web サイトの中から, 改善前のデザインと, コンバージョン結果が出た改善後のデザインのペアを有する企業デザインを選出した. 本実験では, 3社の企業 Web サイトを使用し, 全7種類のデザインを使用した. 実験では, 各被験者に対して, 1回目にそれぞれの会社の改善率が低いデザインを1種類ずつ提示し, 2回目に, 残りの改善率が高いデザインを提示した. なお, 1社は改善率に関係



図1 auWALLET のサイト

のないものを使用した. 被験者は, 21~24歳の健全な男女16名で構成される. 1つのデザインの提示時間を1分間とした. 加えて, 実験結果に差が出ないようにするため, 提示した Web サイトに`興味があって見ている"という仮定のもとで Web サイトを閲覧しているものとした. 得られた結果に対して, ユーザビリティの評価手法[7,8]に沿って作成したアンケートを収集し, アイトラッキングの結果と対応付けて分析を行った.

2. 3 使用するデザイン

実験で使用する Web サイトとして, au の auWALLET への新規入会申し込み Web サイト 2種類(図1参照), Suntory のウォーターサーバ申し込み Web サイト 2種類(図2参照), Softbank の softbank 光への申込 Web サイト 3種類(図3参照), の3社のデザインを採用した. なお, au 及び Suntory の Web サイトについては, 改善率は既知である. 一方, Softbank の Web サイトのみ伝えたいポイントが数字であった為, `数字の表現の仕方を変えてみてはどうか"という意見の元, KAIZEN PLATFORM 内で改善されたデザインではなく, 自分で編集したデザインを使用した. よって, Softbank の Web サイトについては, 改善率は未知である.



図2 Suntory のウォーターサーバのサイト
(一部)

ザイン印象の平均は、緑のデザインでは、利用満足度=2.5, デザイン印象=2.625 であった。一方、ピンクのデザインでは、利用満足度=3.06, デザイン印象=3.0 であった。更に、見易さ、企業・ブランドらしさ、伝えたいポイントの強調等、様々な項目でピンクのデザインは緑よりも高評価であった。また、`緑のデザインとピンクのデザインどちらが良いデザインだと思いましたか`という質問に対しては、緑のデザインを選んだ人は 6 名、ピンクのデザインを選んだ人は 10 名であった。% ため、ここからも緑色のデザインは印象が悪かったと捉えられる。それに伴い、視線運動の結果では、ピンクのデザインを緑より高く評価した人は広範囲をしっかりと見ており、中でも見出しや伝えたいポイントを多く見ていたという結果を得た。

4 結論

本研究では、Web サイト最適化をシステムティックに可能とする知見の獲得を目的とし、A/B テストでの結果の根拠を明らかにするため、`KAIZEN PLATFORM`'でのA/Bテスト結果に対してアイトラッカーを用いた実験を行った。その結果、どのWebサイトのデザインでも見出しは確実に見られていることを確認したとともに、A/B テストの結果で改善率が高いデザインについては、評価項目全体的に高評価であることを確認した。アイトラッカーによる分析の結果、デザインを適切に評価をする被験者は、広範囲を確認し、加えて重視な箇所をとりわけ中止していたことを確認した。



図3 softbank 光への申込サイト

3 結果

au の Web サイトの分析結果を一例として図 4 と 5 にそれぞれ示す。アンケートで集計したデザインに対する評価結果と、視線記録をヒートマップで表した画像とを対応付けて分析した。4 段階リッカ一度尺度により評価された利用満足度とデ

参考文献

- [1] WEB サイト制作の現状とこれから中小企業ホームページが取るべき面白い戦略, <http://jikitourai.net/web-creation-strategy>, 最終アクセス日 2016.09.09
- [2] 成果が劇的に、簡単に出来るサイト改善 10 のポイント LISKUL, http://liskul.com/site_mend10-2325, 最終アクセス日 2017.01.10

- [3] Web creators manual, コンバージョン率を上げる 40 のポイント, 改善すべき項目, <http://creators-manual.com/conversion/>, 最終アクセス日 2016. 11. 02
- [4] J. Bergstrom and A. Schall (Eds.), Eye Tracking in User Experience Design, Morgan Kaufmann (2014).
- [5] K. Holmqvist, M. Nystrom, R Andersson et al., (Eds.), Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures, Oxford University Press (2015).
- [6] 井出野尚, 大久保重孝, 玉利祐樹, 伊豫部紀子, 村上始, 竹村和久, アイトラッカーを用いた広告受容時の消費者の意思決定過程の検討ーチラシの割引表示効果の検討ー, 日本感性工学会論文誌 Vol.13 No.4(特集号) pp. 535-541(2014)
- [7] ユーザビリティの評価手法, <https://u-site.jp/usability/methods/>, 最終アクセス日 2016. 11. 22
- [8] Web デザインの評価項目をつくる, <http://www.ar-ch.org/mt/archives/2012/03/web-2.html>, 最終アクセス日 2016. 11. 22

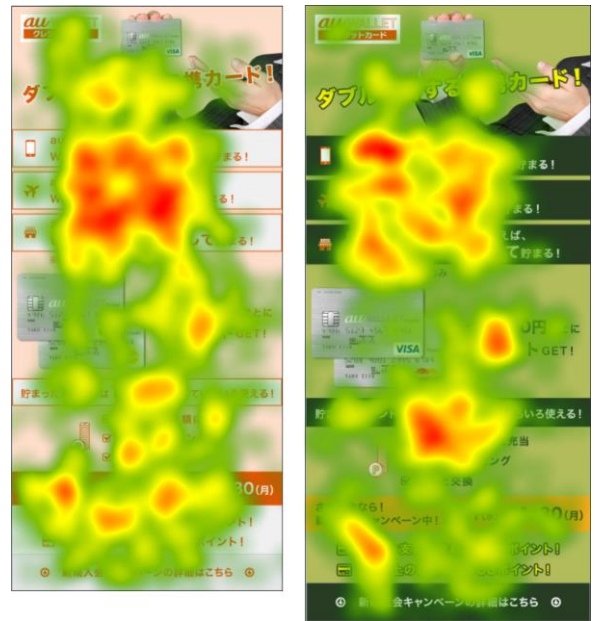


図4 ピンクのサイト(コンバージョン率の高いサイト)を選んだ人の視線の推移

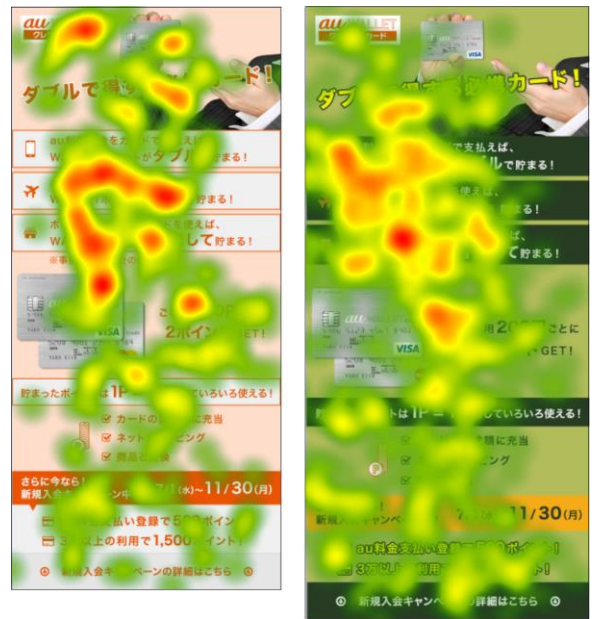


図5 グリーンのサイト(コンバージョン率の低いサイト)を選んだ人の視線の推移

視覚障害者向けユーザインタフェースに関する研究

広島工業大学大学院工学系研究科 大前 憲太郎

Research on User Interface for users with visual impairments

Graduate School of Information Science and Technology, Hiroshima Institute of Technology

Kentaro Ohmae

1 背景

視覚障害者が Web ブラウジングをする際には、キーボードと音声読み上げを利用して閲覧したいサイトの最上段から1つ1つ下に向かって探索し、目的の情報を探すという手段を取っている。この方法では目的の場所までたどり着くのに大変時間がかかるため効率が悪い。

この問題を解消するために、視覚障害者向けブラウジング支援システム[1]やタッチスクリーンを利用したシステムの研究[2]が提案されている。文献[1]のシステムでは、モーションセンサである LeapMotion[5]とオープンソースのスクリーンリーダー NVDA[6]を用いるシステムを提案していた。このシステムでは、図1で示すように Web ページをブロック形式で表現し、手のジェスチャを用いて必要な情報を探索するという方法を取るが、空中に手を浮かせ続けるため疲労するという問題点が存在した。



図1: Web ページの変換

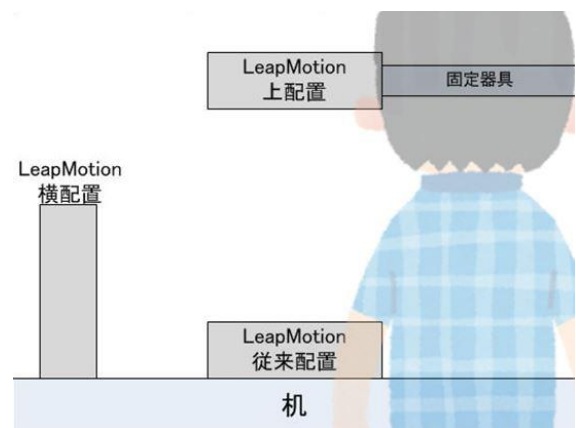


図2: LeapMotion の配置変更

2 先行研究

文献[1]で見つかった問題を解決するために、我々は文献[3]で新たな3つの手法を提案した。そのうちの方式の2つは LeapMotion の配置を上部・側部に変更し、机上に手を置いた状態でセンサが認識できるようにする方法で(図2参照)、もう1つの方式はタブレット端末を用いて同様の探索を行えるようにした方法である。図3に従来の方式と LeapMotion の配置を変更した時の腕の疲労についてのアンケートを示す。図3より、従来方式

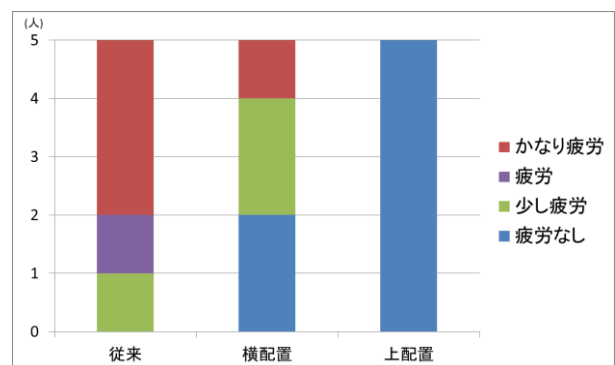


図3: LeapMotion の配置変更による腕の疲労についてのアンケート[3]

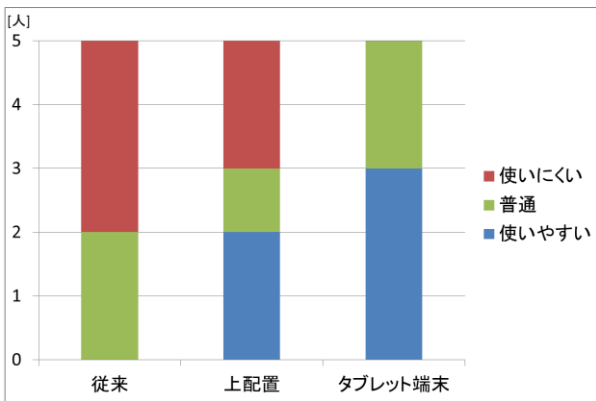


図4: 使いやすさについてのアンケート[3]

に比べて、横配置と上配置は腕への疲労を軽減することが出来ているのが確認できる。さらに、提案した2つの手法のうち疲労度の少ない上配置方式と従来方式、タブレット端末を使用してもらい、使いやすさについて答えてもらった結果を図4に示す。図4より、従来方式に比べて提案した2つの手法は使いやすいという評価が得られた。上配置方式の使いにくいという評価は、センサが誤認識をした際に、ポインタの挙動が不安定になり操作が難しかったことが理由である。

以上の結果より、タブレット端末を使用して開発を行うことに決めた。その理由を以下に示す。まず、1つ目は使いやすいという意見が多かった点である。文献[3]のアンケートのタブレット端末の自由記述欄に「腕の疲労がなかった」という意見があったように、手を置いて操作するため腕にかかる負担がわずかで済むからである。次に、2つ目は携帯性に優れるという点である。文献[1]のシステムでは、ノートパソコンと LeapMotion の2つを持ち歩く必要がある。しかし、タブレット端末では、本体1つを持ち歩くのみで済むため、外出時などの使用の際に便利であるといえる。最後に3つ目は実物に触れながら操作できるという点である。文献[3]の LeapMotion を用いたシステムの自由記述欄に「今いる位置が分かりづらい」「どの方向に進んでいるのかわからなくなる時があった」という意見があるように、LeapMotion を用いたシステムでは手と画面上の

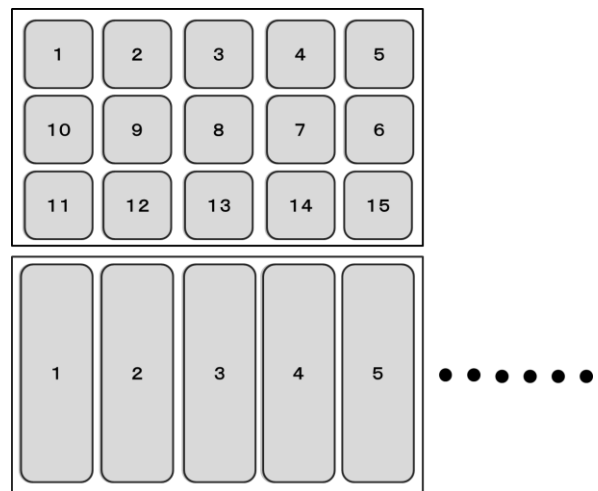


図5: 従来のインタフェース(上)と
提案システムのインタフェース(下)

座標は対応付けられているものの、認識のぶれでカーソルの位置がずれたり、把握しづらいことがある。タブレット端末を用いた場合、指が当たっている位置がカーソルの現在位置となるため、場所を把握しやすい。

本稿では、タブレット端末に実装するシステムのインタフェースについて説明する。

3 文献[3]のシステムと提案システムの違い

文献[3]のタブレット端末にて使用したシステムと、今回提案するシステムのインタフェースの違いを図5に示す。文献[3]のシステムでは、従来のシステムで採用されていたブロックをページに敷き詰める方式を採用しているが、今回提案するシステムでは1ページ当たりのブロック数を減らし、ページ送りを行うことで複数の要素を表示する形式をとっている。

このように変更した理由は2つある。1つ目は、従来のシステムでは要素の位置が把握しづらい点である。ブロックの数が2行・3行となっていくと、指の位置が上下にぶれた際に行が移り、うまく探索できていなかった。そこで、1ページには1行のみ表示するようにして、ページ送りを行うようにすることで上下のぶれを防げると考える。



図 6: タブレット端末でのジェスチャ割り当て

2 つ目は、スワイプ動作が利用できると判明した点である。私は、今まで画面が動くスワイプ操作は、視覚障害者には認識することが難しく、利用できないものだと考えていた。しかし、文献[4]の調査によると、ページ送りではスワイプ操作が最も利用されているという事実を知り、スワイプ操作によるページ送りを実装しようと考えた。

4 タブレット端末でのジェスチャの割り当て

従来のシステムでは、現在フォーカスしているブロックの位置読み上げや、お気に入り登録したページの表示機能、リンク移動をキーボードやジェスチャを用いて実装していた。タブレット端末に移行するにあたって、キーボードを使用できないため、別の方法で各種機能割り当てを行う必要がある。そこで、スクリーンタッチの指の本数で機能割り当てをすることにした。タブレット端末での各種機能割り当てを図 6 に示す。図 6 の機能について以下の項で説明する。

4. 1 1本指タッチ

1 本指でタッチした際の動作は、探索と決定である。1 本指でタッチした状態で図 5 のようなページ上をなぞると、指が乗っているブロックにフォーカスが移り、ブロックの中に格納されているテキストを読み上げる。また、従来のシステムではリンクの移動には、ブロックの上でカーソルをとどめた状態で Ctrl キーを押すことによって実装

されていたが、タブレット端末ではキーボードを使用できないため、提案システムではブロックの上で一度指を離してからダブルタップを行うことにより、リンク移動を実現する。

4. 2 2本指タッチ

2 本指でタッチした際の動作は、現在の場所の読み上げである。ページ送りを行う関係上、現在どれだけのページを送ったのかを忘れてしまうことがある。その際に 2 本指でタッチすることで現在のページ数を読み上げる。また、そのページに含まれているブロックの要素をすべて読み上げる機能も搭載する。この機能を追加することで、そのページに何があったかを思い出しやすくする。また、この操作は 2 本指で少し長めにタッチした場合に実行されるようにする。この理由は、探索を行う 1 本指の操作の際に、誤って指が触れた時の誤操作を防止できるからである。

4. 3 3本指タッチ

3 本指でタッチしてスワイプした際の動作は、ページ送りである。提案システムでは、ブロックを 1 ページに 1 行だけ配置して、ページ移動を用いて複数要素の探索を行う。3 本指でスクリーンに触れた後に、右か左に動かすことで次のページに移る。また、移動した際に音を出すことでページ送りが成立したことをユーザに知らせる。この音はページごとに異なり、次回の探索の際に、音を目安にページを送る目安となるようにする。3 本指にこの機能を実装する理由として、探索とページ送りの動きが似ていることが挙げられる。2 本指タッチにこの機能を実装していた場合、探索の途中で誤って指が触れてしまい、ページ送りを発生させてしまうと、探索が難しくなるほか、大変使いづらいシステムになってしまう。このような誤操作を発生しづらくするために、探索の 1 本指タッチから 1 本分離した 3 本指に実装することにした。また、3 本指のタッチも 2 本指タッチの時と同様に少し時間をおいてから動作するようにして、誤操作が発生するのを未然に防げるように

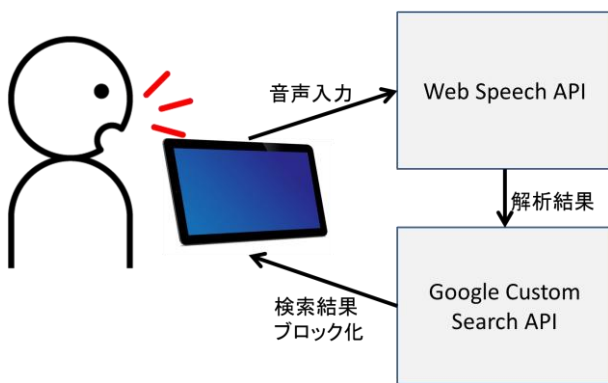


図7：音声検索機能の概要

している。

4. 4 4本指タッチ

4本指でタッチした際の動作は、音声検索である。タブレット端末には標準でスクリーンキーボードが存在するが、画面上に表示される関係上、凹凸がないためフィードバックが乏しく、スクリーンキーボードを用いた入力することが難しいため、時間がかかる。そこで、タブレット端末に搭載されたマイクを用いた音声入力を利用することで入力に関する問題を解決する。図7に音声検索の概要を示す。この機能ではGoogle Custom Search API[7]とWeb Speech API[8]を利用する。4本指タッチが成立した後に、ユーザの音声入力待機状態に移行し、入力された音声解析し、その結果を用いて検索を行い、検索結果をブロック形式に変換して画面上に表示するという流れである。音声入力は精度等に不安が残るものの、スクリーンキーボードで1文字ずつ探して入力するよりも圧倒的に高速なため、音声による入力の必要性は高いと考える。

5 まとめと今後の展開

本発表では、従来のシステムでの問題点を解決するために、タブレット端末を用いたシステムを開発し、新たなインタフェースの提案を行った。タブレット端末は、実際に触れるため扱いやすそうに感じるが、フィードバックが少ない点でイン

タフェースを考える必要がある。

今後の展開として、本発表で提案したシステムの開発・実装を行い、実際に視覚障害者の方に使用してもらい、提案法が適切かどうかを調べる必要がある。

参考文献

- [1] 直江駿一, "モーショセンサを用いた視覚障害者向けブラウジング支援システムの開発", IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2014.
- [2] 松坂治男, "視覚障害者のタッチスクリーン端末の利用とユーザインタフェースに関する研究", 筑波技術大学 修士(工学) 学位論文, 2013.
- [3] 大前憲太郎, "タブレット端末を用いた視覚障害者向けブラウジングシステム", IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会, 2016.
- [4] 三浦貴大, 坂尻正次, 大西淳児, 小野東, "視覚障害者におけるタッチスクリーン端末の使用動向", LIFE2015, 2015.
- [5] LeapMotion, "ApplicationDevelopment-LeapMotionDevelopers", <https://www.LeanpMotion.com>.
- [6] NVDA 日本語チーム, "スクリーンリーダー NVDA 日本語版 SourceForgeJP", <http://sourceforge.jp/projects/nvdajp>.
- [7] Google Developers, "Custom Search Element Control API | Custom Search", <https://developers.google.com/custom-search/docs/element>.
- [8] W3C, "Web Speech API Specification", <https://dvcs.w3.org/hg/speech-api/raw-file/tip/speechapi.html#examplesrecognition>.

Python とプロブレムソルバを用いた計算モデリング

広島工業大学情報学部情報工学科 垣内 洋介

Computational Modeling with Problem Solvers in Python

Faculty of Applied Information Science, Hiroshima Institute of Technology

Yosuke Kakiuchi

1 まえがき

企業や組織においては、現状の分析と将来の予測にもとづいて次のアクションを決定する意思決定がしばしば行われる。意思決定においては、多くの要因が影響するため、考えられうる可能性の中から1つを選択することは容易なことではない。このような場合には、意思決定を問題として定義し、計算モデル化してプロブレムソルバで解くことによって、最適な選択を探索することができる。プロブレムソルバ（以下、ソルバ）とは、計算モデルを表す式を入力とし、その解を出力するプログラムである。この処理の流れを図1に示す。

本稿では、問題からソルバに対する入力となる計算モデルの生成をスケジューリング問題を例にとって示す。計算モデルの生成においては Python を活用する。

2 スケジューリング問題

製造の生産管理などにおいて、複数の機械で処理を行って製品を完成させる場合、どのような順で処理を行うのかを最適化することで生産性を向上させることができる。オープンショップ問題 [1] は、機械の処理順が任意であるという仮定のもとで、最適な処理順を決定する。

(オープンショップ問題)

N 台の機械に対して、M 個のジョブを割り当てて処理を行う。各ジョブはすべての機械に割り当

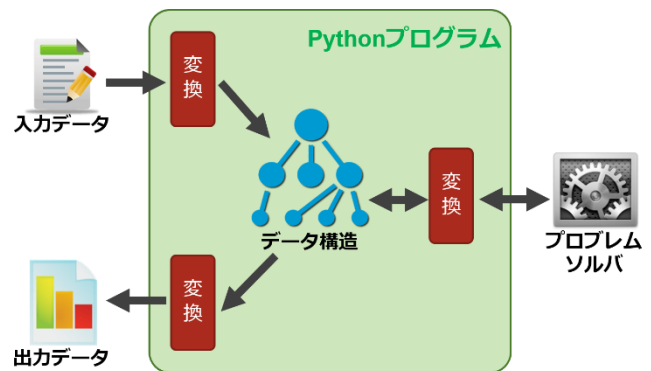


図 1: ソルバを用いた計算モデリング

てられた後に完成となる。任意の順番でジョブを割り当てることが可能であるが、同一のジョブを同時に複数の機械に割り当てたり、同一の機械で複数のジョブを処理したりすることはできない。オープンショップ問題を整数計画問題として定式化したものを以下に示す。

$$\text{Minimize: } \max \{f_{i,j} \mid 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M\}$$

Subject to:

$$s_{i,j} \geq 0, \forall i \forall j$$

$$f_{i,j} = s_{i,j} + E_{i,j}, \forall i \forall j$$

$$(f_{i',j} \leq s_{i,j}) \vee (f_{i,j} \leq s_{i',j}), \forall i \forall j \forall i', i \neq i'$$

$$(f_{i,j'} \leq s_{i,j}) \vee (f_{i,j} \leq s_{i,j'}), \forall i \forall j \forall j', j \neq j'$$

ここで、 $s_{i,j}(f_{i,j})$ は整数変数で機械 i がジョブ j の処理を開始(終了)する時間、 $E_{i,j}$ は機械 i がジョブ j を処理するための所要時間を表す。

この定式化に対応する Python プログラムの記述を図 2 に示す。self.NUM_WORKERS は機械

```

for i in range(self.NUM_WORKERS):
    for j in range(self.NUM_JOBS):
        self.smt.add(s[i][j] >= 0)
        self.smt.add(f[i][j] == s[i][j] + self.E[i][j])

for i in range(self.NUM_WORKERS):
    for j in range(self.NUM_JOBS):
        for ip in range(self.NUM_WORKERS):
            if i == ip: continue
            self.smt.add(z3.Or(s[ip][j] - s[i][j] + self.E[ip][j]
                               <= 0, s[i][j] - s[ip][j] + self.E[i][j] <= 0))
        for jp in range(self.NUM_JOBS):
            if j == jp: continue
            self.smt.add(z3.Or(s[i][jp] - s[i][j] + self.E[i][jp]
                               <= 0, s[i][j] - s[i][jp] + self.E[i][j] <= 0))
    
```

図 2: Python による計算モデル

の台数 N を表し, self.NUM_JOBS はジョブの個数 M を表している. プロブレムソルバには SMT(Satisfiability Modulo Theories)ソルバである Microsoft Research の Z3 [2] を用いている. SMT ソルバは命題論理式を基本とし, 複数の理論を組み合わせたモデルを取り扱うことができるソルバで, 0-1 混合整数計画は命題論理式と線形算術演算の組み合わせで記述することが可能である. ソルバは充足可能で終了すると, 制約を満たす $s_{i,j}$ への値割当てを返す.

3 反復充足可能性判定を用いた最適化

SMT ソルバを用いた求解では, 制約を満たした充足解 1 つを得ることしかできず, それが最適解であるかどうかの保証は無い. 最適化を行うためには, 制約をより厳しくしながら繰り返し充足可能性判定を行う必要がある.

例えば, スケジューリング問題の例においては, 目的である $f_{i,j}$ の最大値の最小化を行うために, 一旦以下のような制約式を考える.

$$\max(f_{i,j}) \leq T, \forall i \forall j$$

この制約式に対して, T に十分小さい値を与えた場合はこの制約は充足不能となり, 十分大きい値を与えた場合は充足可能となる. 最適化を行うには, この充足不能と充足可能か切り替わる T の値を求めればよい. よって, 図 3 に示すように, 十分大きな T から始めて, 充足可能なうちは徐々に T

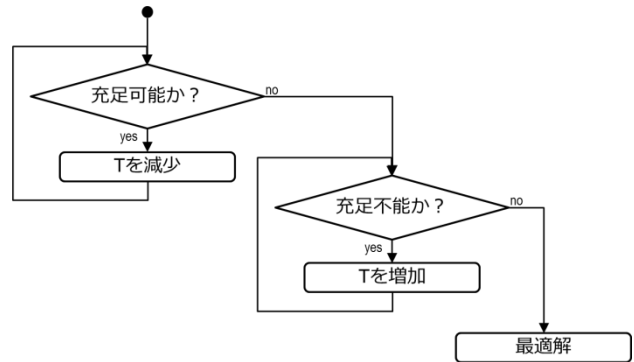


図 3: 反復充足可能性判定による最適化

を減らしていき, 充足不能になったところで再び切り返して T を増加させていって, 境界を求める. 最終的に境界で充足可能になった時の解が, 最適解となる.

このように SMT ソルバで最適化を行うには複数回ソルバを起動することが必要だが, 1 回の求解にかかる計算時間は数理計画ソルバよりもかなり短い傾向にあり, 複数回起動しても合計時間は数理計画ソルバより短くなることが多い.

4 まとめ

問題を定式化し, 計算モデルとして表現することでソルバを使った最適化を行うことができる. 従来の数理計画ソルバだけでなく, SMT ソルバを用いて混合 0-1 整数計画問題を解くことができる. SMT ソルバを用いる場合は, 充足解 1 つのみを解として返すので, 最適化を行う場合は繰り返し適用して充足不能/充足可能の境界を探索することが必要である.

参考文献

- [1] Teofilo Gonzalez and Sartaj Sahni: "Open Shop Scheduling to Minimize Finish Time", Journal of the ACM Vol. 23 Issue 4, pp. 665-679, 1976.
- [2] Leonardo de Moura and Nikolaj Bjørner: "Z3: An efficient SMT solver", in proceedings of 14th International Conference of Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2008), pages 337-340, 2008.

Web 最適化に対する情報科学の貢献

広島工業大学 大杉 将輝

広島工業大学 松本 慎平

Contribution of information science to Web optimization

Hiroshima Institute of Technology Masaki Osugi

Hiroshima Institute of Technology Shimpei Matsumoto

1 研究目的

Webに掲載されている情報は膨大なものとなっている。その要因として、キュレーションメディアといった情報をまとめた Web サイトや、NAVER まとめといったまとめ Web サービスの躍進がある。誰もが情報をまとめ、発信することが容易となっていることが、情報爆発を後押ししている。加えて、スマートフォンの普及により、ソーシャルネットワークを利用するユーザーが多くなり、情報過多を深刻化させている。

ある事柄を知りたい場合、Google や Yahoo! Japan などといった検索エンジンを利用することは一般的である。上述した背景の中、検索エンジンへの依存度は以前にも増して高まっている。よって、検索エンジンの表樹順序を高めることはサイト運営者にとってきわめて重要な問題と位置付けられている。アクセス数などを増やすための最適化として、SEO (Search Engine Optimization) [1]が挙げられる。同じように、訪問者が欲しい情報を引き出し、UX を高めるための施策として LPO (Landing Page Optimization) [2]が挙げられる。SEO, LPO を目的とした Web サイトの改善は最適化と呼ばれる。本発表では、情報科学的な知見、とりわけ、人工知能やデータマイニングと呼ばれる領域で取り組まれている技術や手法を Web 最適化にいかに関用すべきか、また、どのような貢献が期待できるのかについて説明することを目的とする。

2 先行研究

2. 1 SEO

SEO とは検索エンジン最適化を示している。日本国内における検索エンジンのシェアは、Google が 66.5%、Yahoo! Japan が 28.2%、Bing が 3.6%を占めている。

検索エンジンにおいて、上位表示するために必要な指標としてコンテンツの内容と外部からの評価といった2つの指標がある。前者に関してはウェブサイトに掲載するコンテンツの質やユーザが求める情報を発信することで、評価するコンテンツにすることが可能である。また、meta 要素にキーワードを追加することが多かったが、検索エンジンでスパム判定されるようになった。後者は前者に比べると簡単にできるように思えるが、リンクを購入することでペナルティを受けるため、室の高いコンテンツを作成し、SNS などを活用した上で自然な被リンクを獲得する手法が確立されつつある。

従来の研究では、先述のことを踏まえ、「SEO の基礎」、「サイト構造の改善」、「コンテンツの最適化」、「クローラーへの対処」、「プロモーション手法」の内容において、項目ごとの荷重を考慮しチェックシートを作成したものをからどのような割合でできているかを算出している[3]。

2. 2 LPO

LPOとは、ランディングページ最適化ないしは着地ページ最適化のことを示しており[2,4], LPOを行う上では「検索キーワード」や「ユーザーの行動」を分析することによって、情報を解析することが可能である。

しかし、Googleが全面的にSSLを導入したため、HTTPで運用しているウェブサイトではキーワードを取得することが難しくなった。また、全面SSLを導入しているサイトであってもキーワードを取得することが難しくなった。そのため、従来のような「検索キーワード」を用いた解析を行うことができない。

最近では、リンクの後ろにパラメータを用いることで、どの部分をクリックしてアクセスしているかといったことや、どこから流入があったのか、どのようなキーワードを用いて検索したのかというような推測を行うことが可能である。

ウェブサイト情報の重要性を変える方法の他にも、ターゲット層に応じてコンテンツを差し替える方法なども挙げられる。

リゾートホテルやスキー場を運営している星野リゾートでは、アイトラッカーを用いた視線を分析し、どのような要素が注目されているかを分析した。その上で、顧客のニーズを分析し、電話応対を見た上で予約を判断する顧客も一定数いる。以上を踏まえて、ページ下には電話番号を記載したレイアウトを設計し、その結果として、多くの顧客の獲得に成功している。

また、アクセスログを蓄積し、訪問単位でまとめたデータを数値化し、顧客のタイプを推定することによって Web サイト製作者の記事編集を支援している成果もある[4]。

3 従来の研究と本研究の特徴

従来の研究では、アクセスログを用いて Web サイトのページ閲覧モデルを作成することにより、閲覧者のモデルを作ることによって Web サイト

に応じた最適化を行っていた。また、リゾートホテルや温泉旅館、スキー場を運営している星野リゾートではアイトラッキングを用い、Webサイトのどのような要素が注目されているかという点を見た上で表示されるページの内容を変更した上で改善を行っている。著者らは、熟練者が行っている Web サイトの最適化をデータによって可能とし、ユーザーが求める情報を出すことにより、UX（ユーザー・エクスペリエンス）の向上を狙うことが重要であると考えている。

4 結論

本研究では、SEOやLPOといったWebサイトのアクセス数増加や収益化といったことに関して記述した。その上で、従来の研究から状況が変化しているため、情報が取得しにくい状況で最適化を行うことができるのかを研究すべきと考える。

参考文献

- [1] Search engine host market share in Japan | StatCounter Global Stats,
<http://gs.statcounter.com/search-engine-host-market-share/all/japan>, 最終アクセス日 2017.02.17
- [2] 清嶋 直樹：「改革手法ウオッチング LPO(Landing Page Optimization) 微調整で成約率向上 ネット版チラシを磨け—星野リゾート, Gaba(ガバ), 住信SBIネット銀行(10分間で学べる業務革新講座)」, 日経BP社(2009)
- [3] 佐藤 和明, 飯島 泰裕, “WebサイトのSEO施策に関する評価手法の研究(第1報): 数値化したSEOレベルでのWebサイト分析を提案”, 青山社会情報研究 5巻, pp. 11-27(2013)
- [4] 二橋宣友, 松本慎平, 加島智子, 末並晃, 中村憲明, Wordpressを用いたコンバージョン率向上手法の提案, 情報処理学会第72回全国大会講演論文集, pp. 1-737-1-738 (2R-4), 東京大学本郷キャンパス (2010).