

SVMによる整形外科領域の 慢性疼痛原因診断に関する 性能評価

日本大学大学院 理工学研究科
博士前期課程 数学専攻
岩崎 翔太

目次

01 研究背景・目的

02 SVMの概要

03 実験の概要

04 考察・今後の展望

05 参考文献

APPENDIX

目次

01 研究背景・目的

02 SVMの概要

03 実験の概要

04 考察・今後の展望

05 参考文献

APPENDIX

研究背景・目的

■ 疼痛の普遍性

原因不明の「痛み」の総称を、医療用語では「疼痛」と呼ぶ。

世界人口の**20%以上**が何らかの疼痛を経験しており、整形外科領域における最も一般的な主訴の一つ。

侵害受容性疼痛



切り傷・火傷・打撲・骨折などによってからだに危険を伝える痛み

神経障害性疼痛



腰痛や肩こりなど神経が障害され、それによって起こる痛み

原因不明



何らかの原因により起こる痛み

研究背景・目的

■ 診断手段

PainDETECT

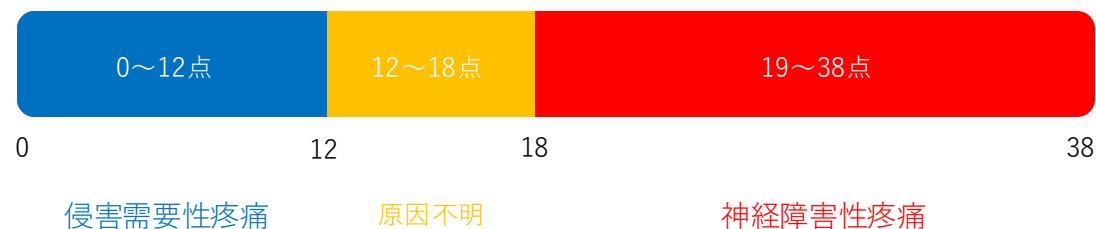
疼痛鑑別スクリーニング評価ツール

開発国：DEドイツ

構成

患者記入(質問:18問)

判定基準(合計点)



質問項目（例）

痛みのある部位では、焼けるような痛み
(例: ヒリヒリするような痛み) がありますか？

BS-POP

精神医学的問題を知るための簡易問診票

開発国：JP日本

構成

患者記入式(質問:10問) + 医師記入式(質問:8問)

判定基準

- ・ 合計点が医師用11点以上
- ・ 医師用10点以上 かつ 患者用15点以上

上記条件に該当する場合、精神医学的問題点の関与が疑われる

質問項目（例）

・ 患者記入式

睡眠に満足できますか？

・ 医師記入式

知覚検査で刺激すると過剰に反応する

研究背景・目的

■ 研究目的・課題

研究目的

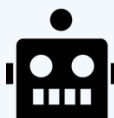
これらの問診票を用いたAIによる診断支援の可能性について検討する

課題



データ量の制約

医療機関が保有し利用が可能なデータ量が限定的



説明可能なAI (XAI) の構築

患者に対して診断の根拠を明示しなければならない

既存研究

吉開・鈴木ら [Suzuki et al., 2015]

対象：PainDETECT+BS-POP

手法：決定木＋アンサンブル学習

結果：3分類：感度約80%

神経障害性疼痛：感度75%・特異度90%
の精度を達成

サポートベクトルマシン (Support Vector Machine; SVM)

少量データでも高い汎化性能を発揮

サポートベクトルによる決定境界の**説明が容易**

目次

01 研究背景・目的

02 **SVMの概要**

03 実験の概要

04 考察・今後の展望

05 参考文献

APPENDIX

SVMの概要（基本概念）

■ 基本概念

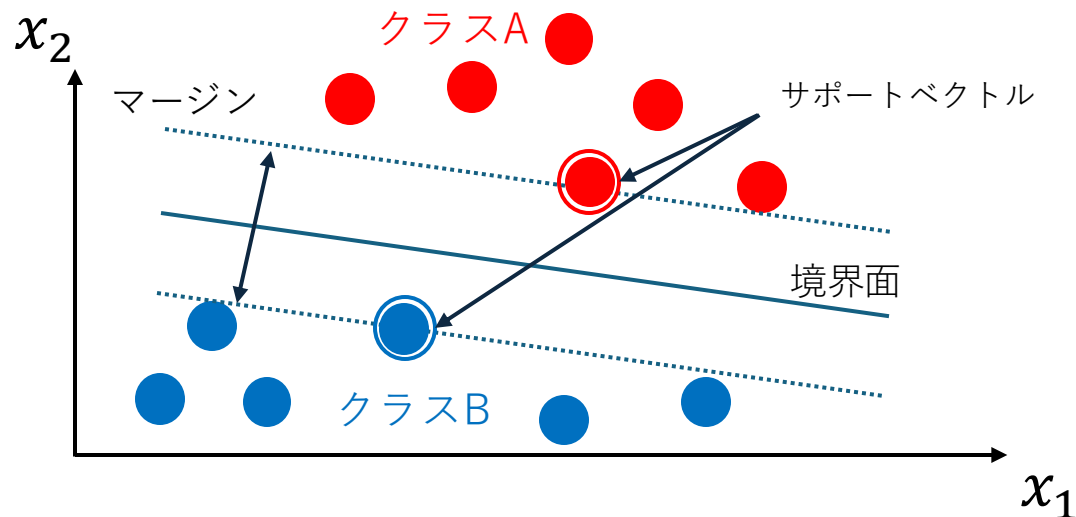
サポートベクトルマシン（SVM）

与えられた学習データに対し、最適な超平面を定めて分離する機械学習モデル

- ・ サポートベクトル：境界面から一番近いデータ
- ・ マージン：境界面とサポートベクトルの距離
- ・ 目標：マージンが最大化する境界面を見つける

■ 特徴

- ・ 少ないデータ量で、**高い汎化性能**を達成可能
- ・ 高次元でも**高い識別精度を維持**することが可能
- ・ サポートベクトルのみで決定境界が決まるため、**解釈が比較的容易**



■ ソフトマージンSVM

誤りを許容することで線形分離可能でないデータにも適用可能

$$\min_{\omega, b, \xi} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i$$
$$\text{subject to } t_i(\omega^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

- ・ C ：コストパラメータ（ペナルティの度合い）
- ・ $\xi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ：スラック変数（誤分類の程度）

SVMの概要（カーネル法）

■ カーネル法

線形分離可能でない場合、入力ベクトル x を高次特徴空間 $\varphi(x)$ に写像し、その空間で超平面による分離を行う。

線形像を明示せずに内積のみをカーネル関数 $k(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$ として計算することで、**計算量を抑えつつ**非線形境界を表現する。

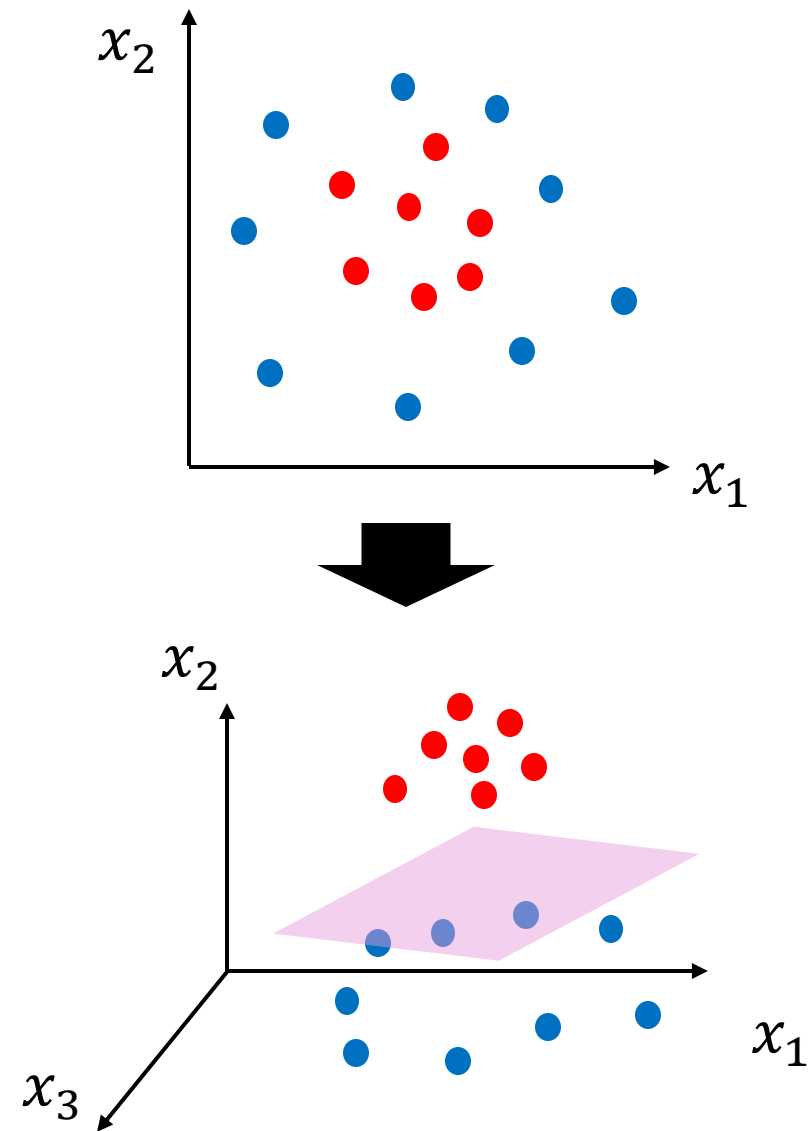
代表的なカーネル

線形(Linear) : $k(x_i, x_j) = x_i^T x_j$

多項式(Poly) : $k(x_i, x_j) = \gamma(x_i^T x_j + c)^d$

ガウス(RBF) : $k(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$

シグモイド(Sigmoid) : $k(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + c)$



目次

01 研究背景・目的

02 SVMの概要

03 **実験の概要**

04 考察・今後の展望

05 参考文献

APPENDIX

実験の概要

■ 課題

PainDETECTデフォルトの精度

- ・ 正答率：55.4%
- ・ 感度/特異度
侵害受容性疼痛：80.1%/38.8%
神経障害性疼痛：15.3%/94.2%
原因不明：21.9%/81.9%

各特徴量が予測に与える影響の強さは同じではない



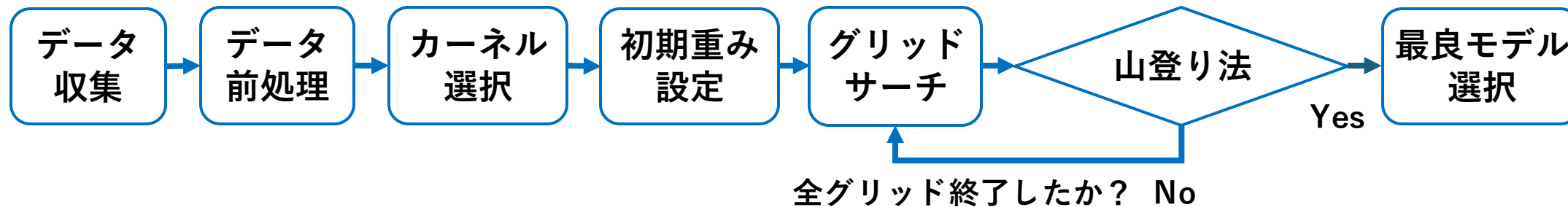
AI による診断支援

- ・ SVMの導入
- ・ ハイパーパラメータのチューニング

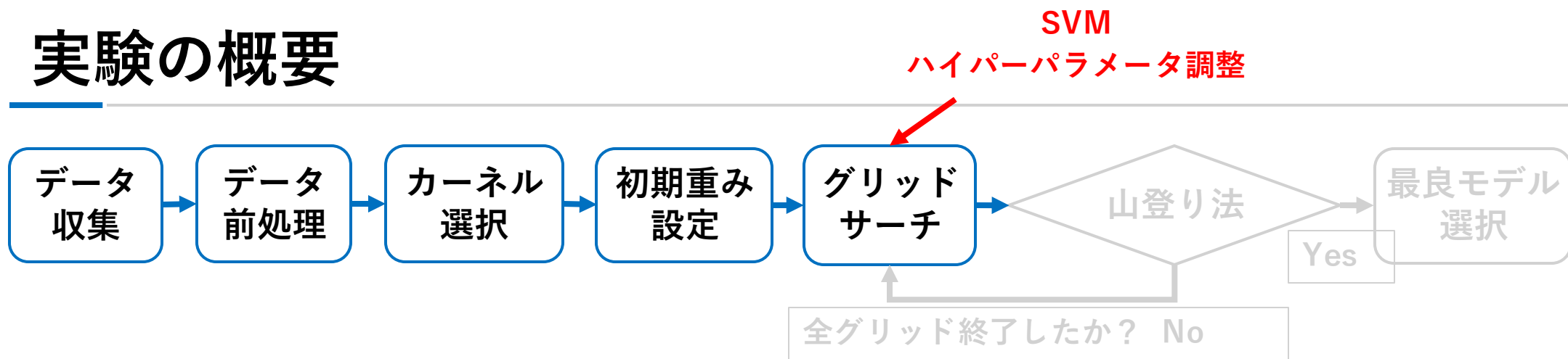
重み付けの導入

- ・ 山登り法の実施
- ・ 重み付けの設定を自動化する

■ 実験の流れ



実験の概要



■ データの特性

- ・匿名の患者データ
- ・質問項目
 - ・ PainDETECT : 13
 - ・ BS-POP : 18
 - ・ FUSION : 31

- ・ データ数 : 801
- ・ クラス内訳
 - ・ 侵害受容性疼痛 : 61%
 - ・ 神経障害性疼痛 : 32%
 - ・ 原因不明 : 7%

■ データの前処理

- ・ 欠損値削除
- ・ 平均0・分散1に標準化

- ・ データ数 : 540
- ・ クラス内訳
 - ・ 侵害受容性疼痛 : 61%
 - ・ 神経障害性疼痛 : 33%
 - ・ 原因不明 : 6%

■ カーネルの種類とハイパーパラメータ

- ・ 線形 : C
- ・ 多項式 : $C, degree, \gamma, coef0$
- ・ ガウス : C, γ
- ・ シグモイド : $C, \gamma, coef$

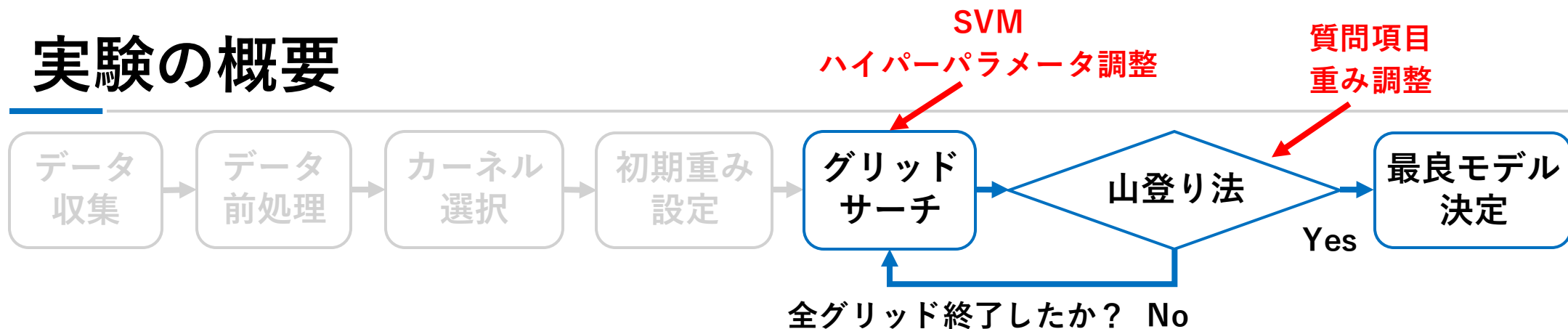
■ 各質問項目の回答に重み付け

$$x'_j = \alpha_j x_j$$

(α_j : 重み, x_j : 特徴量)

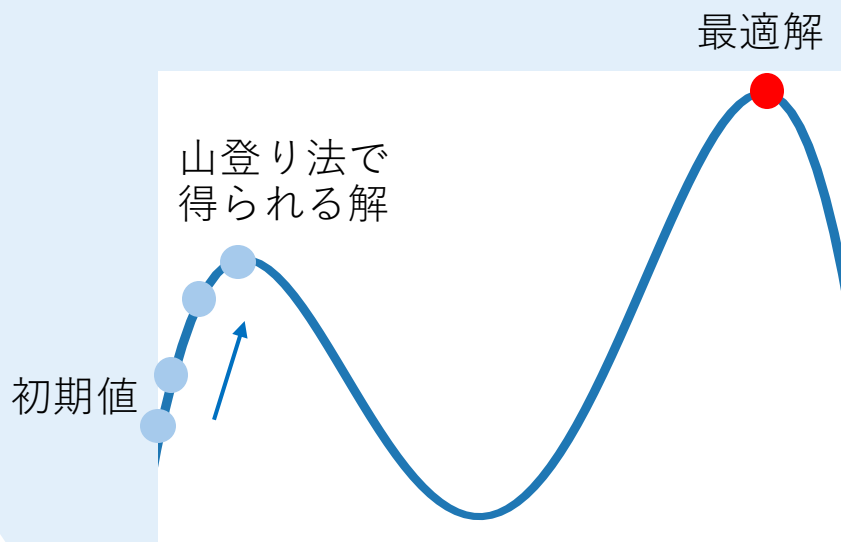
- ・ 初期重み : 1.0

実験の概要



山登り法

「今の解よりも良い、今の解に近い解を新しい解にする」
ことを繰り返して良い解を求める方法



■ アルゴリズムの流れ

① 初期状態の設定

すべての重みを1.0からスタート
例: $\omega = [1.0, 1.0, 1.0, \dots, 1.0]$

② 特徴量の探索(近傍探索)

各特徴量について、現在の重みを基準に2通り試す
・ $+\varepsilon$, $-\varepsilon$ (実験: $\varepsilon = 0.01$)

③ スコアの評価と更新

それぞれのパターンでSVMを学習・評価
・ 5-分割交差検証 → 平均正答率の算出
→ 最も良いスコアを出した重みを採用し、更新

②、③を設定した回数 (1000回) 繰り返す

実験の概要

実験結果

PainDETECTの判断基準の精度

- 正答率：55.4%
- 感度/特異度
侵害受容性疼痛：80.1%/38.8%
神経障害性疼痛：15.3%/94.2%
原因不明：21.9%/81.9%



✓ SVM導入による精度向上

- 正答率：約10～20%向上
- 神経障害性疼痛の感度：約50～70%に改善

✓ 山登り法(重み付け)による精度底上げ

データセットを問わず正答率・感度・特異度が全体的に向上

FUSION		感度/特異度(%)		
方式	正答率	侵害受容性	神経障害性	不明
SVM-Linear	71.3%	80.3/52.4	54.3/78.1	0/100
SVM-Sigmoid	70.6%	90.9/47.6	54.3/90.4	0/100
SVM-RBF	71.9%	92.4/47.6	54.3/91.8	0/100
SVM-Poly	71.7%	95.5/42.9	51.4/95.9	0/100
SVM+w-Linear	74.3%	87.9/66.7	74.3/86.3	0/100
SVM+w-Sigmoid	71.7%	92.4/54.8	62.9/91.8	0/100
SVM+w-RBF	73.3%	93.4/61.9	68.6/91.8	0/100
SVM+w-Poly	73.3%	87.9/64.3	69.4/86.1	0/100
PainDETECT		感度/特異度(%)		
方式	正答率	侵害受容性	神経障害性	不明
SVM+w-Linear	74.1%	89.4/61.9	69.4/88.9	0/100
BS-POP		感度/特異度(%)		
方式	正答率	侵害受容性	神経障害性	不明
SVM+w-Linear	65.6%	90.9/28.6	34.3/91.8	0/100

目次

01 研究背景・目的

02 SVMの概要

03 実験の概要

04 考察・今後の展望

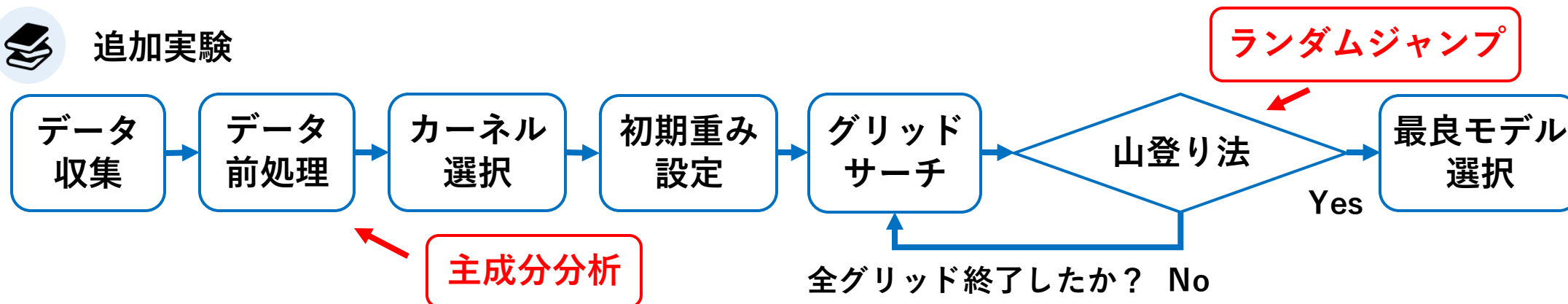
05 参考文献

APPENDIX

考察・今後の展望



追加実験



主成分分析 (PCA)

多くの変数を持つ複雑なデータを、少数の指標（主成分）に要約する統計手法

特徴量の次元削減

特徴量の次元削減

精度を保ちつつ計算時間の短縮

寄与率：その主成分がデータ全体を何%説明できるか示す指標

■ 問診票ごとの主成分数

累積寄与率80%での次元削減

- ・ PainDETECT : 13 → 7次元
- ・ BS-POP : 18 → 11次元
- ・ FUSION : 31 → 18次元

山登り法 + ランダムジャンプ

目的

- ・ 局所最適からの脱出
- ・ 探索範囲の拡大



考察・今後の展望

■ 実験結果

- ・ 線形カーネル、多項式カーネルでの実施

✓ 計算時間の短縮

特徴量40～50%削減で計算時間**約30～60%**短縮

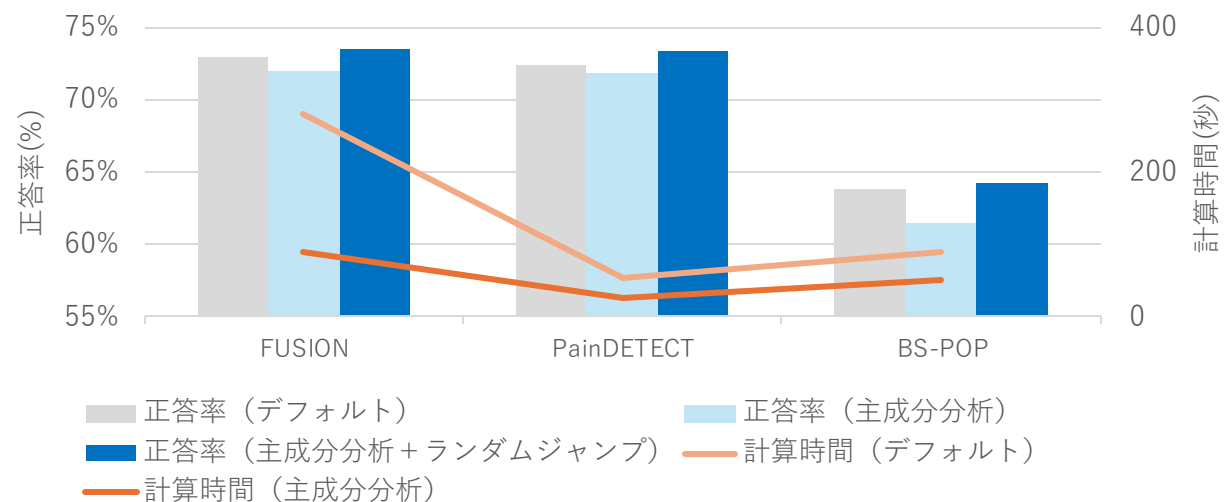
✓ 高精度の維持

次元を削減しても予測スコアは大幅に変わらず

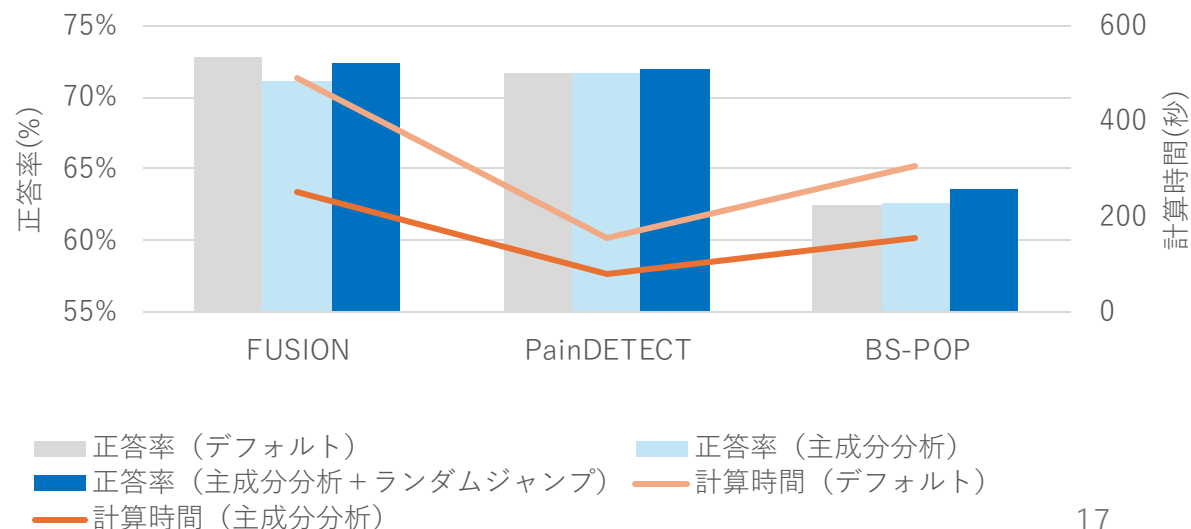
✓ 精度の向上

- ・ 主成分分析を上回る精度を達成
- ・ 反復回数増加による更なる向上の余地あり

線形カーネル



多項式カーネル



考察・今後の展望

考察

- ① SVM + データの重み付け + 山登り法
→ 小幅ながら一貫した精度向上を確認
課題：神経障害性疼痛が低感度

- ② SVM + データの重み付け + 山登り法
 ↑ ↑
 主成分分析 ランダムジャンプ

→ 次元削減 & 精度が50%達成
課題：線形カーネル・多項式カーネルのみ実施

今後の展望

・実験の拡張

- ・ ②に他カーネルで実験
- ・ 神経障害性疼痛に焦点を当てた目的関数での実験
- ・ 進化計算の導入
- ・ ハイパーパラメータの細域チューニング



正答率80%を目指す

目次

- 01 研究背景・目的
- 02 SVMの概要
- 03 実験の概要
- 04 考察・今後の課題
- 05 参考文献

APPENDIX

参考文献

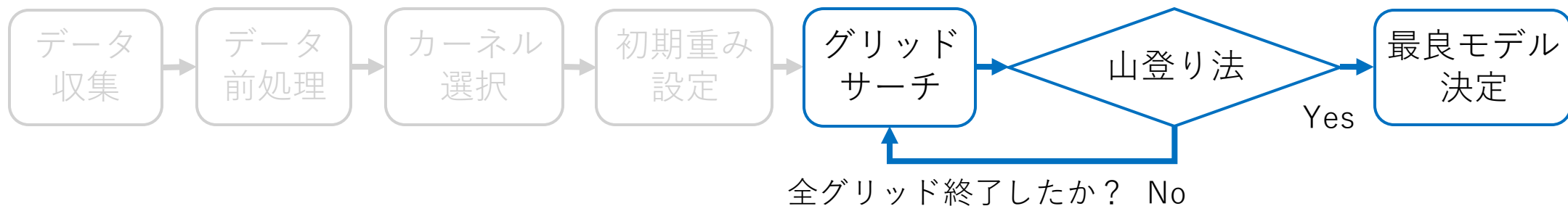
- 1 Treede, R.-D., et al. A classification of chronic pain for ICD-11. PAIN. 2015, vol.156, no.6, p.1003-1007.
- 2 Freynhagen, R., et al. PainDETECT: a new screening questionnaire to identify neuropathic components in patients with back pain. Current Medical Research and Opinion. 2006, vol.22, no.10, p.1911-1920.
- 3 Sato, K., et al. Liaison consultation psychiatry for spine and spinal cord disease; brief scale for evaluation of psychiatric problems in orthopaedic patients (BS-POP). Clin. Orthop. Surg. 2000, vol.35, p.843-852.
- 4 Suzuki, S., et al. Pain Screening in Orthopedics Using Machine Learning. TENCON 2024 - IEEE Region 10 Conference. 2024, p.624-627.
- 5 田村孝廣 . やさしく学べるサポートベクトルマシン:数学の基礎と Python による実践. オーム社, 2022 .

目次

- 01 研究背景・目的
- 02 SVMの概要
- 03 実験の概要
- 04 考察・今後の課題
- 05 参考文献

APPENDIX

APPENDIX



k-分割交差検証（実験：k=5）

汎化性能を評価する統計的な手法

目的：過学習の検出

訓練データ：テストデータ = 4 : 1

1回目	テスト	訓練	訓練	訓練	スコア1
2回目	訓練	テスト	訓練	訓練	スコア2
3回目	訓練	訓練	テスト	訓練	スコア3
4回目	訓練	訓練	訓練	テスト	スコア4

平均スコア

■ 最良モデルの決定

- ・ 正答率
- ・ 重み
- ・ 感度/特異度

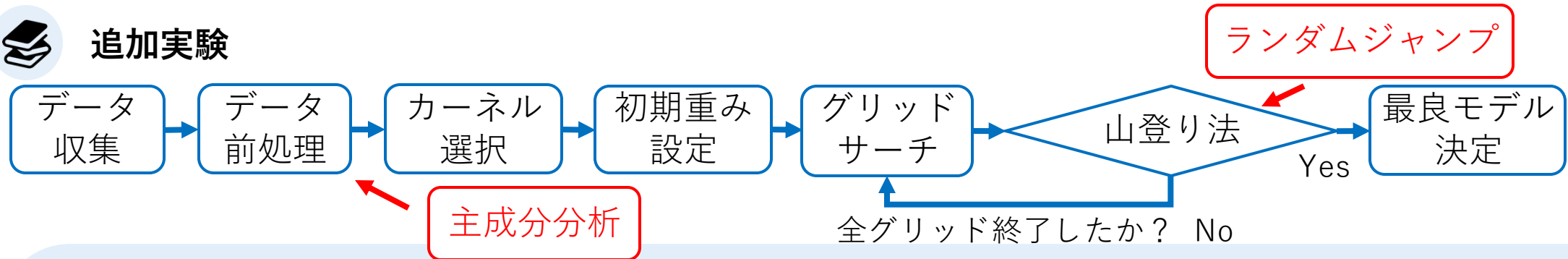
感度：疾患のある人を正しく陽性と判定できるか
(真陽性)

特異度：疾患のない人を正しく陰性と判定できるか
(真陰性)

APPENDIX



追加実験



■ アルゴリズムの流れ

① 初期状態の設定

すべての重みを1.0からスタート
例: $\omega = [1.0, 1.0, 1.0, \dots, 1.0]$

② 特徴量の探索(近傍探索)

各特徴量について、現在の重みを基準に3通り試す
・ $+\varepsilon$, 0 , $-\varepsilon$ (実験: $\varepsilon = 0.01$)

③ スコアの評価と更新

それぞれのパターンでSVMを学習・評価
・ 5-分割交差検証 → 平均正答率の算出
→ 最も良いスコアを出した重みを採用し、更新

④ 更新が止まる

10ステップ or 20ステップ

⑤ ランダムジャンプ

- ・ 10ステップ: 小ジャンプ
- ・ 20ステップ: 大ジャンプ
- ・ 小ジャンプ強度: 0.85, 1.15
- ・ 大ジャンプ強度: 0.5, 1.5
- ・ ジャンプさせる特徴量: ランダム (小ジャンプ: 10%, 大ジャンプ: 20%)

⑥ クリップ・正規化

クリップ: $[0, 3]$

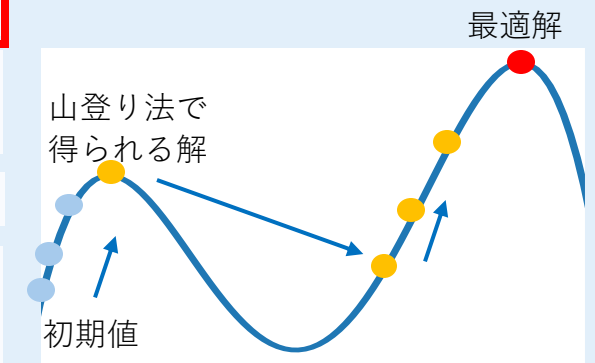
⑦ スコアの評価と更新

⑧ ② ~ ⑦ を設定した回数 (1000回) 繰り返す

山登り法 + ランダムジャンプ

目的

- ・ 局所最適からの脱出
- ・ 探索範囲の拡大



APPENDIX

■ 相関ヒートマップ

✓ P1～P3に強い相関

P1：今現在のあなたの痛みは10点満点でどの程度ですか

P2：過去4年間で最も激しい痛みは10点満点でどの程度でしたか

P3：過去4年間の痛みの平均レベルは10点満点でどの程度ですか

✓ D1～D4に強い相関

D1：泣きたくなったり、泣いたりすることがありますか？

D2：いつもみじめで気持ちが浮かないですか？

D3：いつも緊張して、イライラしていますか？

D4：ちょっとしたことが癢（しゃく）にさわって腹が立ちますか

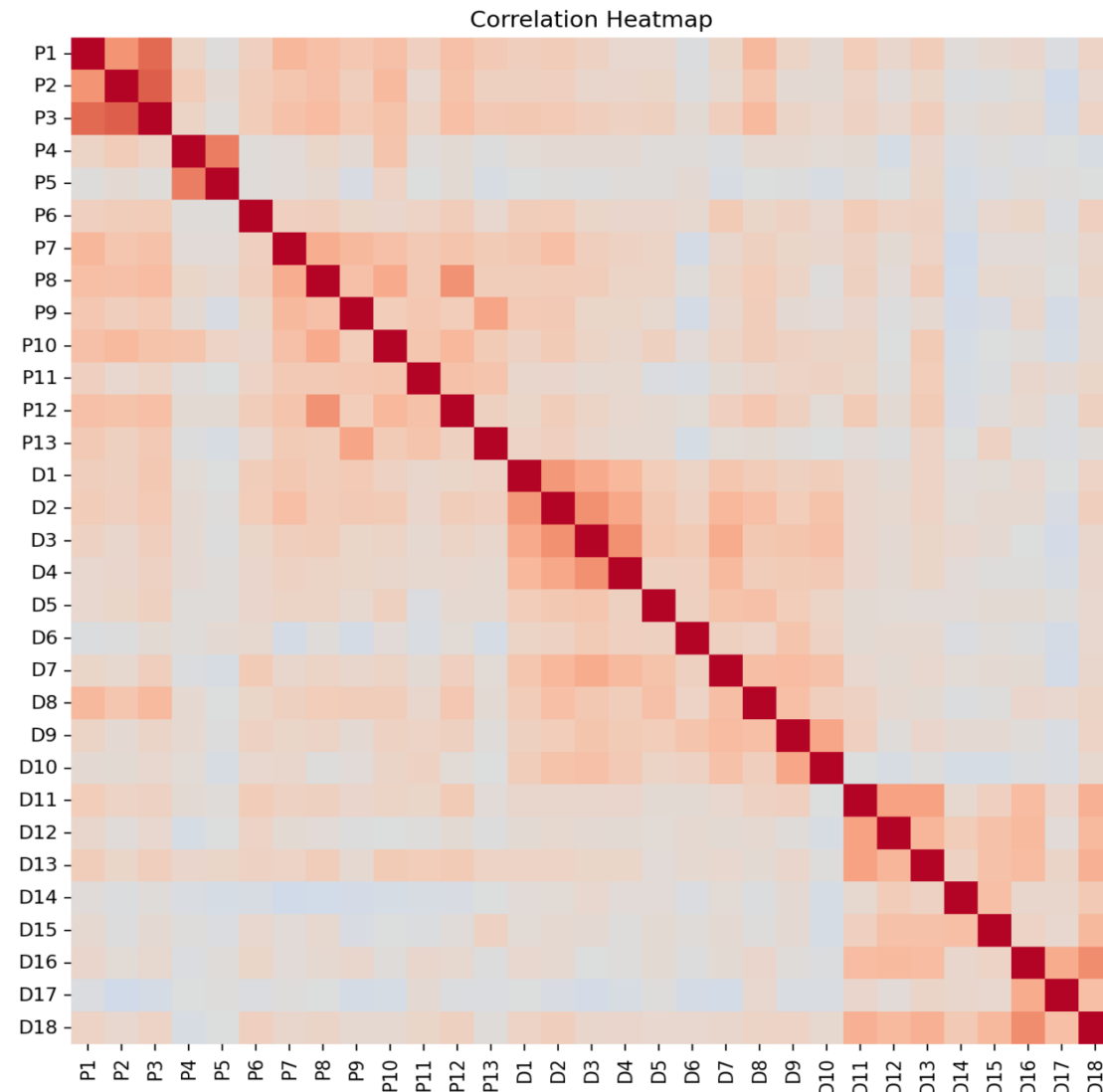
✓ D11～D18に強い相関

D11：痛みのとぎれることはない

D12：患部の示し方に特徴がある

D16：病状や手術について繰り返し質問する

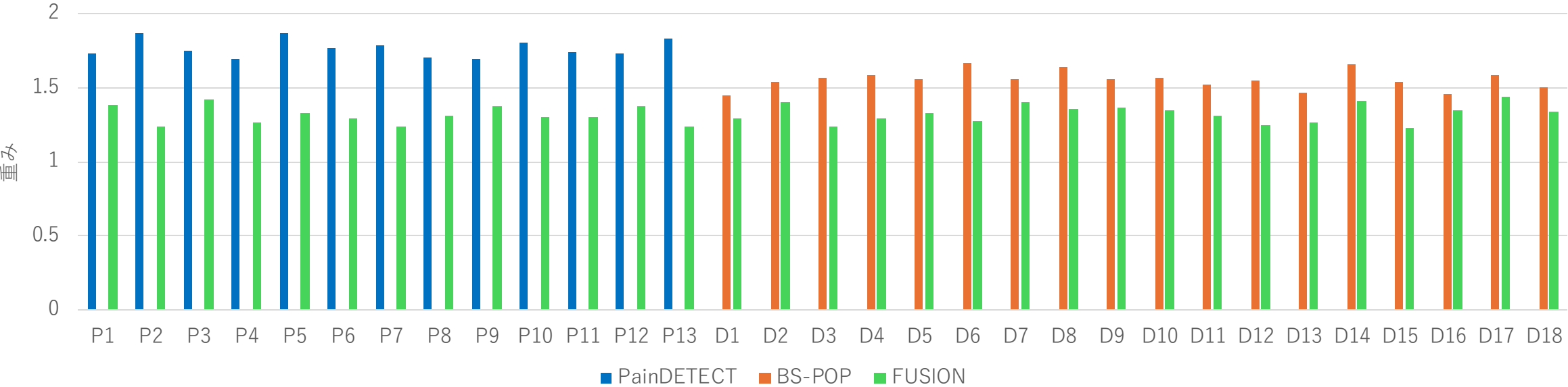
D18：ちょっとした症状に、これさえなければとこだわる



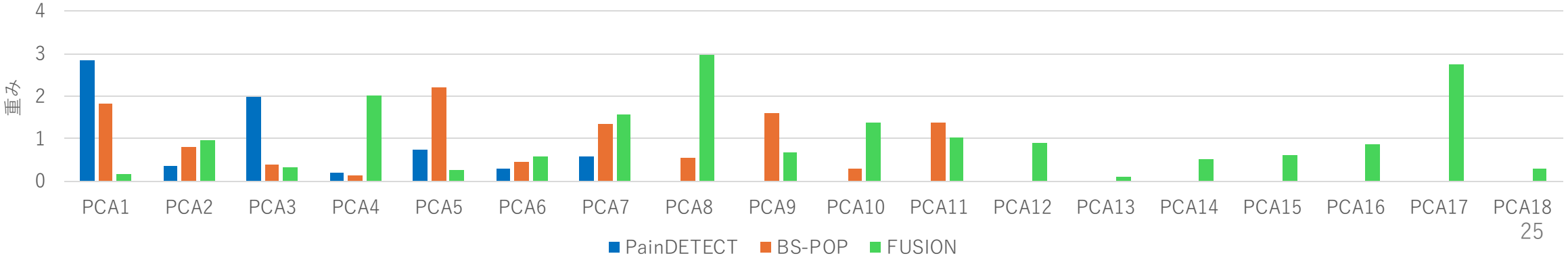
APPENDIX

■ 実験結果：重み付け

SVM（線形カーネル） + 重み付け（山登り法）



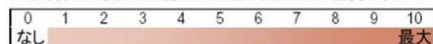
SVM（線形カーネル） + 主成分分析 + ランダムジャンプ



APPENDIX

■ PainDETECT[参考文献：②]

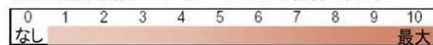
いま現在のあなたの痛みは10点満点でどの程度ですか？



過去4週間で最も激しい痛みはどの程度でしたか。



過去4週間の痛みの平均レベルはどの程度ですか。



あなたの痛みの経過を表す図として、どれが最もあてはまりますか？ □印にチェックを付けて下さい。

☐ 持続的な痛みで、痛みの程度に若干の変動がある
☐ 持続的な痛みで、時々痛みの発作がある
☐ 痛みが時々発作的に強まり、それ以外の時は痛みがない
☐ 痛みが時々発作的に強まり、それ以外の時も痛みがある

痛みのある場所を図に示してください。



痛みは他の部位にも広がりますか？

☐ はい ☐ いいえ

はいと答えた方は、その場所と広がり方も書いてください。

痛みのある部位では、焼けるような痛み(例:ヒリヒリするような痛み)がありますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

ピリピリしたり、チクチク刺したりするような感じ(蟻が歩いているような、電気が流れているような感じ)がありますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

痛みがある部位を軽く触られる(衣服や毛布が触れる)だけでも痛いですか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

電気ショックのような急激な痛みの発作が起きることはありますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

冷たいものや熱いもの(お風呂のお湯など)によって痛みが起きますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

痛みのある場所に、しびれを感じますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

痛みがある部位を、少しの力(指で押す程度)で押しても痛みが起きますか？

一度もない ☐ ほとんどない ☐ 少しある ☐ ある程度ある ☐ 激しい ☐ 非常に激しい ☐

■ BS-POP[参考文献：③]

医師に対する質問項目

質問項目	回答と点数		
① 痛みのとぎれることはない	1. そんなことはない	2. 時々とぎれる	3. ほとんどいつも痛む
② 患部の示し方に特徴がある	1. そんなことはない	2. 患部をさする	3. 指示がないのに衣服を脱ぎ始めて患部を見せる
③ 患肢全体が痛む(しびれる)	1. そんなことはない	2. 時々	3. ほとんどいつも
④ 検査や治療をすすめられたとき、不機嫌、易怒的、または理屈っぽくなる	1. そんなことはない	2. 少し拒否的	3. おおいに拒否的
⑤ 知覚検査で刺激すると過剰に反応する	1. そんなことはない	2. 少し過剰	3. おおいに過剰
⑥ 病状や手術について繰り返し質問する	1. そんなことはない	2. 時々	3. ほとんどいつも
⑦ 治療スタッフに対して、人を見て態度を変える	1. そんなことはない	2. 少し	3. 著しい
⑧ ちょっとした症状に、これさえなければとこだわる	1. そんなことはない	2. 少しこだわる	3. おおいにこだわる

合計

患者さんに対する質問項目

質問項目	回答と点数		
① 泣きたくなかったり、泣いたりすることがありますか	1. いいえ	2. 時々	3. ほとんどいつも
② いつもみじめで気持ちが浮かないですか	1. いいえ	2. 時々	3. ほとんどいつも
③ いつも緊張して、イライラしていますか	1. いいえ	2. 時々	3. ほとんどいつも
④ ちょっとしたことが癪(しゃく)にさわって腹が立ちますか	1. いいえ	2. 時々	3. ほとんどいつも
⑤ 食欲はふつうですか	3. いいえ	2. 時々なくなる	1. ふつう
⑥ 1日のなかでは、朝方がいちばん気分がよいですか	3. いいえ	2. 時々	1. ほとんどいつも
⑦ 何となく疲れますか	1. いいえ	2. 時々	3. ほとんどいつも
⑧ いつもとかわりなく仕事ができますか	3. いいえ	2. 時々やれなくなる	1. やれる
⑨ 睡眠に満足できますか	3. いいえ	2. 時々満足できない	1. 満足できる
⑩ 痛み以外の理由で寝つきが悪いですか	1. いいえ	2. 時々寝つきが悪い	3. ほとんどいつも

合計