

NTTデータ数理システム学生研究奨励賞

ベイジアンネットワークによる
心拍を用いたオーダーピッキング作業者の
負担要因推定

東京理科大学 創域理工学部
経営システム工学科 石垣研究室
小野 百合香

本研究について

Executive Summary

2

背景

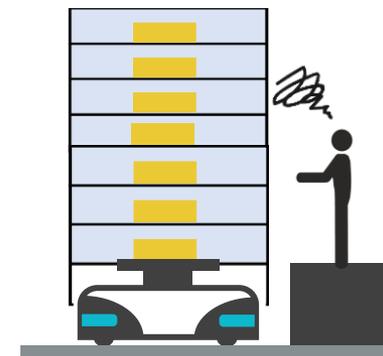


物流業界の人手不足は深刻であり、潜在労働力としての高齢者・女性にも働きやすい作業設計が求められている

研究課題

物流業務の中核を担うオーダーピッキング作業では人手不足を解消するために**棚搬送ロボット**が導入されている

作業者は自動化できない高度な作業を担うこととなり新たな**身体的・心理的ストレス**の発生に繋がっている



解決方法

棚搬送ロボットを用いたオーダーピッキングを行う作業者の負担要因を推定できる**心拍指標**を提案し、人中心の作業設計を促す



本研究について

Executive Summary

3

特長

なぜアンケートではなく、心拍による負担要因の推定なのか？

- 心拍は、作業中にリアルタイムかつ簡単に評価することができ、アンケートのように作業後のフィードバックを必要としない

アンケートに匹敵するようなバイタルデータの特徴を発見する！



作業者の負担要因とその原因となる作業の要素の特定できる心拍指標を検討するため、**ベイジアンネットワーク**を用いる

今後の展望

本研究のモデルを用いて、リアルタイムで測定されるストレスの度合いに応じた作業割当の設計を行うことで作業者のモチベーションを維持させたい

目次 >>

01 研究背景 Introduction

02 分析手法 Analysis method

03 実験 Experiment

04 結果 Result

05 結論 Conclusion

サプライチェーンの現状

✓ 物流業界の実態



図1. 国内電子商取引規模 (B to C)^[1]

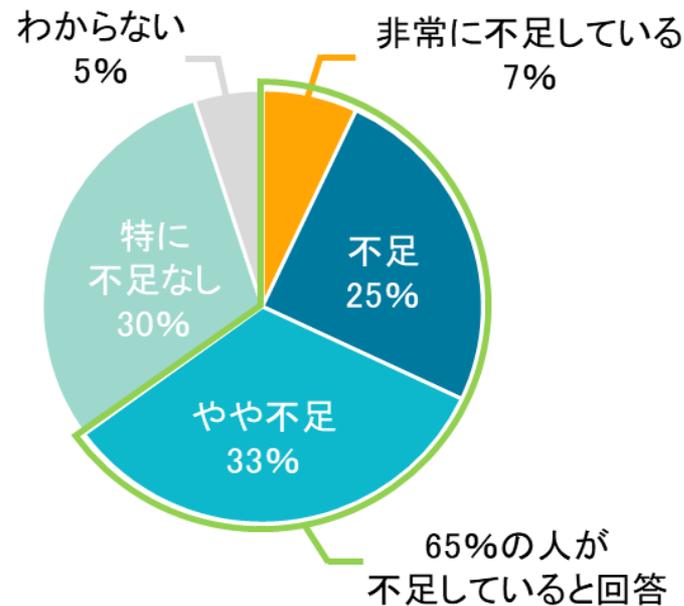


図2. 物流・倉庫部門の人手不足調査^[2]



物流需要が増加する一方、深刻な人手不足状態にある

サプライチェーンのボトルネック

✓ 2024年問題^[3]

- 2024年からトラックドライバーに時間外労働の年間上限が960時間に制限される

物流のさらなるひっ迫が予想される

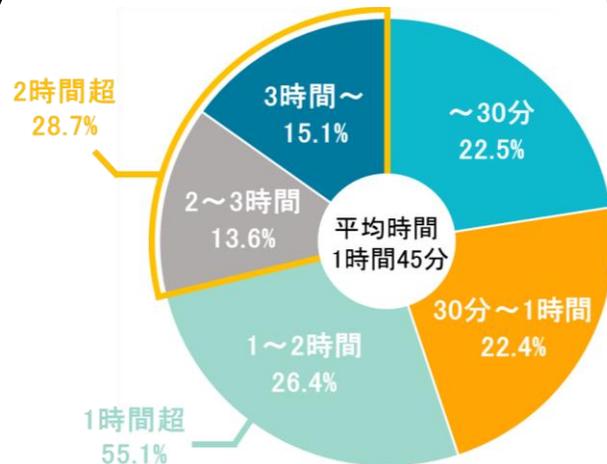


図3. 1運行あたりの荷待ち時間分布^[4]



! サプライチェーンのボトルネックは物流倉庫作業

物流倉庫内作業におけるボトルネック

7

入荷 ➤ 保管 ➤ **オーダーピッキング作業** ➤ 出荷

Le-Duc et al. (2005)^[5]

顧客のオーダーを満たすために
保管棚から商品を回収する作業

Point !

最も時間とコストがかかる作業である

女性や高齢者

潜在労働力の活用



1. ボトルネックであるオーダーピッキング作業の効率を良くしたい！
2. 身体的負担の高い仕事のイメージを払拭し、人手不足を解消したい！
➤ **高齢者・女性労働者の雇用促進のため作業負担を軽減**にしたい！

！ オーダーピッキング作業の一部自動化が推進されている

棚搬送ロボットを導入したオーダーピッキング

8

✓ 新たな**身体的**ストレスの発生

棚搬送ロボットの導入による...

Brigita et al. (2017) [6]

手首・腰部に負担がかかる作業を長時間反復するオーダーピッキング作業の最も多い欠勤原因は筋骨格性疾患 (MSD) である

高いところから
荷物をとる



背伸びすることもある

昇り降りする作業が追加



※ 取り出しの高さは最大 2 m

しゃがむ動作の
増加



※ 取り出しの高さは
最小 0 m

棚搬送ロボットを導入したオーダーピッキング

✓ 新たな心理的ストレスの発生

棚搬送ロボットの導入による...

Brigita et al. (2017) [6]

反復作業・変化に乏しい作業・情報の混乱や欠落を引き起こしやすい作業であるオーダーピッキング作業は、飽きやミスを引き起こしやすい

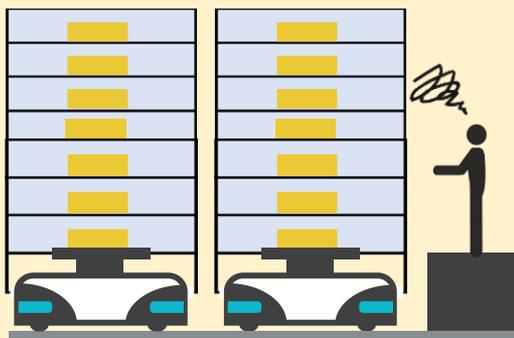
複数オーダーを処理

1つの棚から商品を取りきる



仕分けが複雑化

棚の到着を待つ 棚の行列を見る



反復作業に飽きる



人間中心の作業設計を行うため、負担要因を明らかにしたい

2つの負担度評価方法

ストレス=負担度

10



主観的負担度評価法

○ 作業者の**負担要因**を明らかにすることができる

✗ 作業後にフィードバックが必要
回答や集計に時間がかかる



客観的負担度評価法

○ 作業中でもリアルタイムで測定
でき簡単に評価できる

✗ 作業者の**負担要因**を明らかに
することができない

※ 本論文では、全体の総合評価値である主観的負担度を構成する
下位尺度 (ex. 身体的負担) を「主観的負担度の**負担要因**」と記す

客観的負担指標を用いて主観的負担度の負担要因を推定する

関連研究 と 本研究の新規性

11

本研究は、複数の動作が組み合わさったオーダーピッキング作業の負担要因・負担度を推定するのに適した心拍指標を検討する

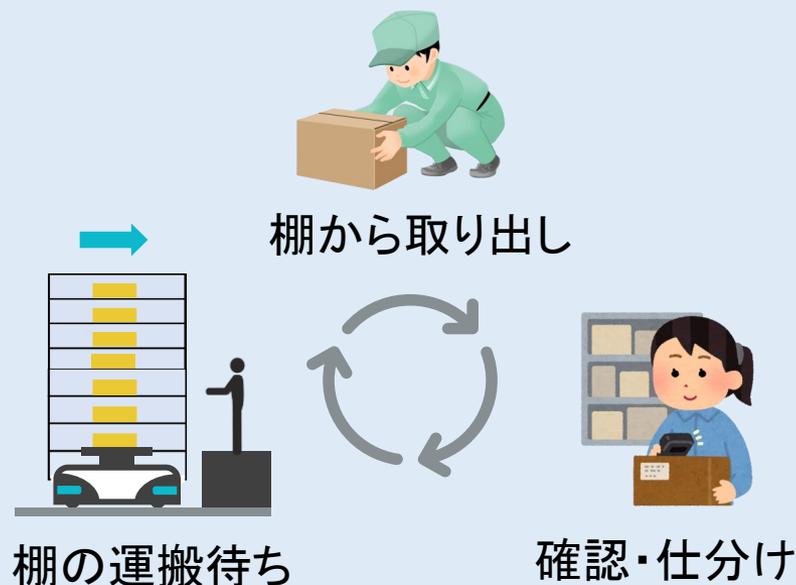
従来研究

座ったまま・単調な作業

ドライバーの
注意散漫レベルを検知^[7]PC作業時の集中状態^[8]
映像授業の難易度^[9]の推定

本研究

複数の動作の組み合わせ



棚の運搬待ち

確認・仕分け

関連研究 と 本研究の位置づけ

12

Alaimo (2020) [10]

※HRV・・・Heart Rate Variability (心拍変動解析)

離陸と着陸の2パターンにおける航空機パイロットの作業負荷と疲労を分析
→ 飛行性能評価指標と主観的負担度(NASA-TLXの総合評価値)と客観的負担指標(HRVで算出した心拍指標)の定量的な関係を調べるために、相関分析を行った。

客観的負担指標と主観的負担度の負担要因との定量的な関係までは調べていない
= 客観的負担指標による主観的負担度の負担要因の推定は行っていない

Sugiono (2018) [11]

3つの異なる道路条件におけるドライバーの精神的ストレスレベルを分析
→ 主観的負担度の負担要因(NASA-TLXの下位尺度の1つであるフラストレーション)と客観的負担指標(心拍指標)の定量的な関係を調べるために、相関分析を行った。

単調な作業のため、NASA-TLXの6つの負担要因のうちの1つしか着目していない

本研究は複数の動作が組み合わさった作業を扱うため
複数の負担要因を推定対象にする

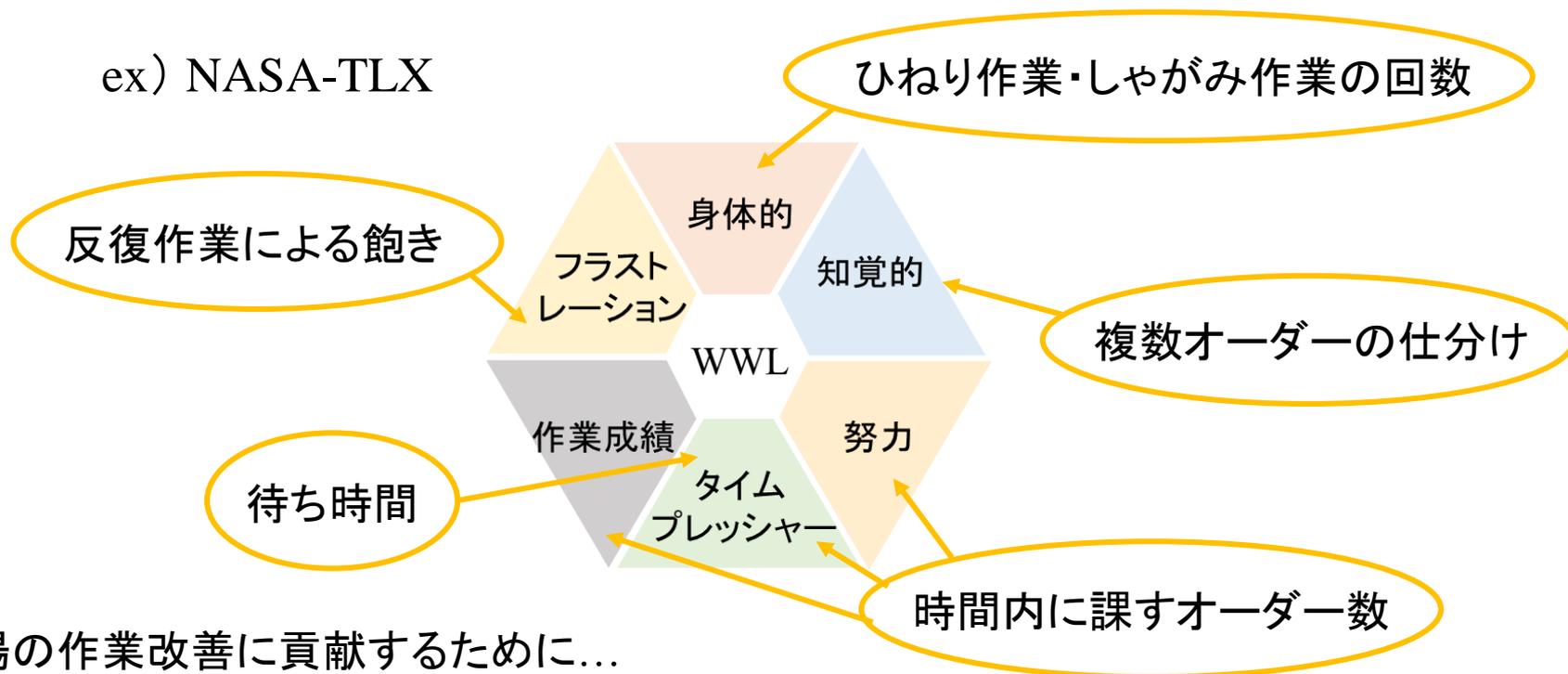
関連研究 と 本研究の位置づけ

13

主観的負担度の負担要因が推定されたとしても...

従来の主観的負担度評価法の負担要因は抽象的な尺度である

ex) NASA-TLX



🚩 負担要因とオーダーピッキング作業の要素の因果関係を明らかにしたい

関連研究 と 本研究の位置づけ

14

✓ 生理指標とストレスの因果関係の関連研究^[12]

回帰分析

横井ら(2011)^[13]

パス分析

Wager et al.(2009)^{[14][15]}

ベイジアンネットワーク

Patricia et al.^[16]

モデルの構造(要因関係)が理解できる

線形のモデル化

非線形のモデル化

目的変数と説明変数の区別がある

区別がない



複数の負担要因と原因となる作業の要素を推定するため
ベイジアンネットワークを利用する

本研究の目的

15

表1. 作業負荷時のストレスに関する文献調査

	主観的負担度の推定 (総合評価値)	主観的負担度の 負担要因の推定	ベイジアン ネットワーク	複数の動作の 組み合わせ作業
Alaimo ^[10]	○	×	×	×
Sugiono ^[11]	×	△	×	×
Patricia ^[16]	○	×	○	×
本研究	○	○	○	○

6つの負担要因を推定対象に！

フラストレーションのみ推定

本研究の目的

棚搬送ロボットを用いたオーダーピッキング作業において、負担要因と原因となる作業の要素を推定できる心拍指標を提案する

主観的負担度評価法 ～ NASA-TLX ～

✓ NASA-TLX^[17]

— 6つの下位尺度を評価し、全体の負担度 WWL を算出する手法

Step 1

各尺度に評定点 v_i ($i = 1, 2 \dots 6$) をつける。

Step 2

各尺度の重要度を一対比較法によって判定する

Step 3

各尺度の選択回数を重み係数 w_i ($i = 1, 2 \dots 5, 6$) とする。

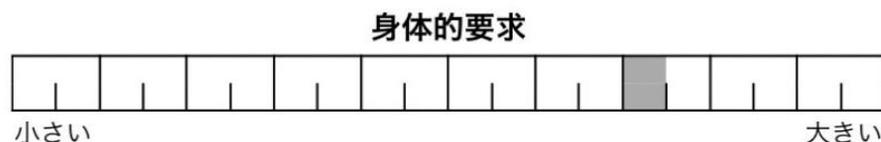


図4. 各負担要因の評価^[18]

6つの負担要因(下位尺度)

1. 知的・知覚的要求 (MD)
2. 身体的要求 (PD)
3. タイムプレッシャー (TD)
4. 作業成績 (OP)
5. 努力 (EF)
6. フラストレーション (FR)

今行った作業について、作業負担に関わり深いと思う方をクリックしてください。

身体的要求

タイム
プレッシャー

図5. 一対比較法による判定^[18]

主観的負担度評価法 ～ NASA-TLX ～

17

✓ NASA-TLX (NASA Task Load Index) [17]

Step 4 6つの各負担要因を数値化

Step 5 全体の作業負担を数値化



加重平均ワークロードスコア
$$WWL = \sum_{i=1}^6 \frac{(v_i \times w_i)}{\sum_{j=1}^6 w_i}$$

※ 評価点 v_i 重み係数 w_i



各尺度の数値の重み(重要度合)を考慮した平均値

客観的負担度評価法 ～ 心拍変動 ～

✓ 心拍変動とは

- 正常洞調律(QRS波)の間隔(N-N間隔)を心拍変動という
N-N間隔は, **R-R間隔(RRI)**を測定することで算出する^[19]

Point

ストレスと自律神経の関係は深い
交感神経と副交感神経のバランスが心拍変動に反映される^[20]

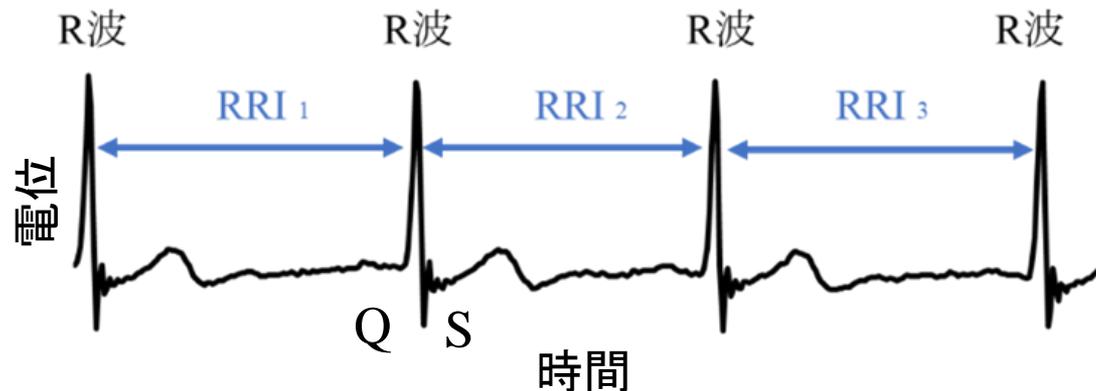
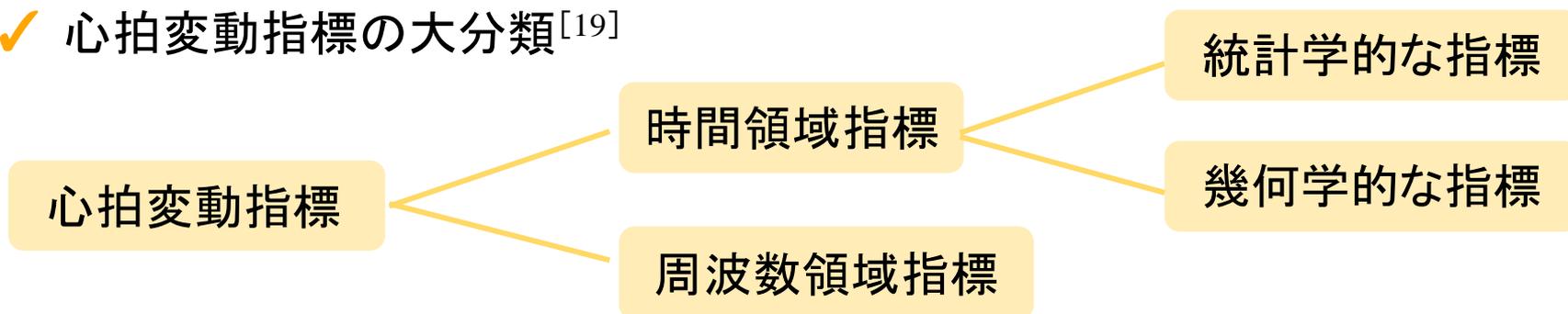


図6. RRI概念図

客観的負担度評価法 ～ 時間領域の統計学的な指標 ～

19

✓ 心拍変動指標の大分類^[19]

✓ 統計学的な指標

表2. 本研究で用いる6つの統計学的な指標^[19]

指標	定義
Mean NNI [ms]	NN間隔(RRI)の平均
SDNN [ms]	NN間隔(RRI)の標準偏差
RMSSD [ms]	隣り合ったNN間隔(RRI)の差の2乗平均の平方根
SDSD [ms]	隣り合ったNN間隔(RRI)の差の標準偏差
pNN50 [%]	隣り合ったNN間隔(RRI)の差が50 msを超える比率
CVNNI (CVRR) [無次元]	SDNNをNN間隔の平均の除算した値. RRIの変動係数

客観的負担度評価法 ～ ポアンカレプロット(LP) ～

20

✓ ポアンカレプロット(LP) [21]

- 心電波形において最も大きな波であるR波同士の間隔 (RRI) について k 番目のデータを横軸、 $k+1$ 番目のデータを縦軸にプロットした図

作業中の RRI データをウェアラブルデバイスを用いて取得する

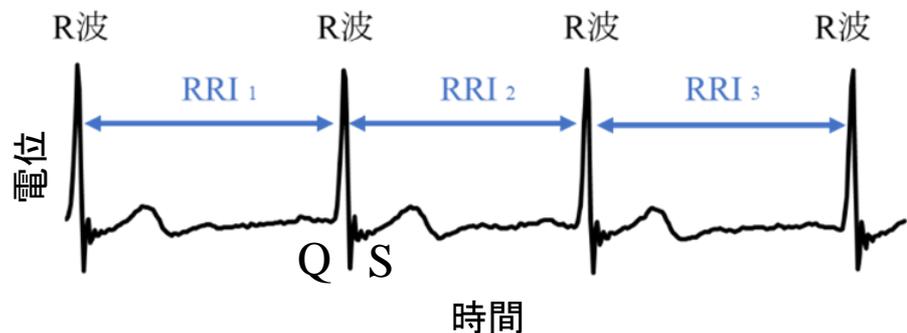


図7. RRI概念図(再掲)

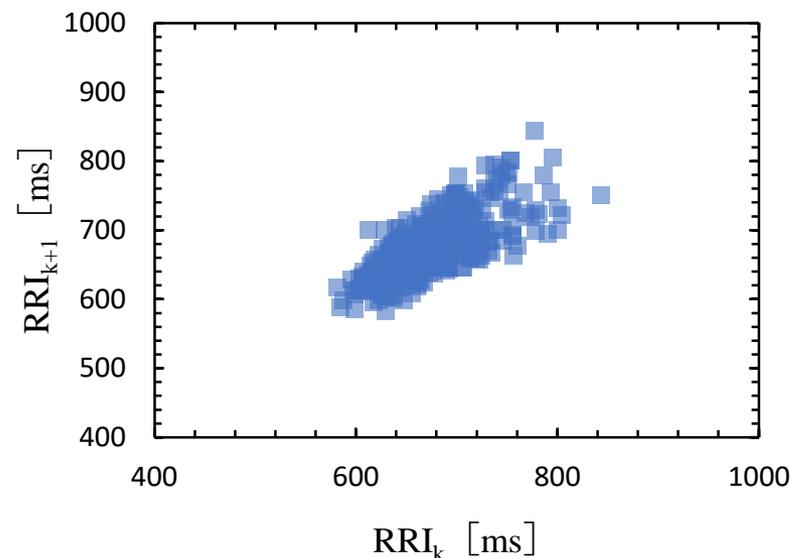


図8. ポアンカレプロットの例

分析方法

客観的負担度評価法 ～ ポアンカレプロット(LP) ～

21

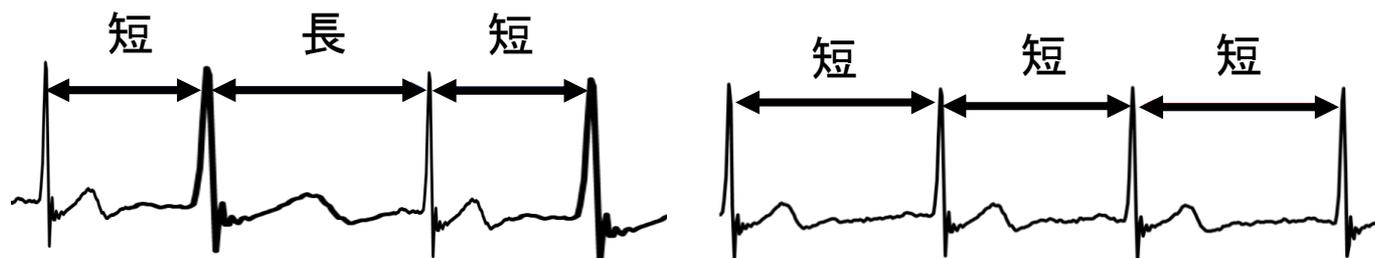
安静・休息時

大

緊張・負担時

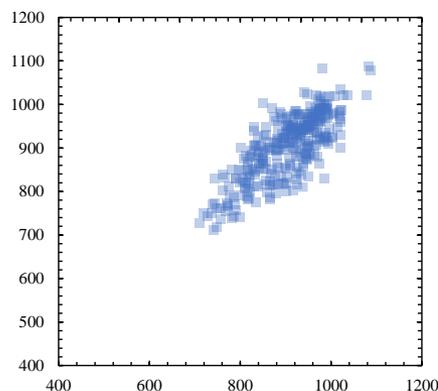
小

RRIの揺らぎ

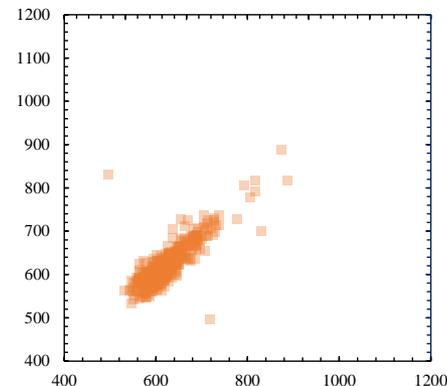


ポアンカレプロット

※ 予備実験



安静時



下段作業のみ

Point

1. 負担時はRRIは一定に近づくので、 $y = -x$ 軸に点が集中する
2. 負担時ほどプロットした点が集中しやすい

分析方法

客観的負担度評価法 ~ ポアンカレプロット(LP) ~

22

✓ ポアンカレプロットの負担指標

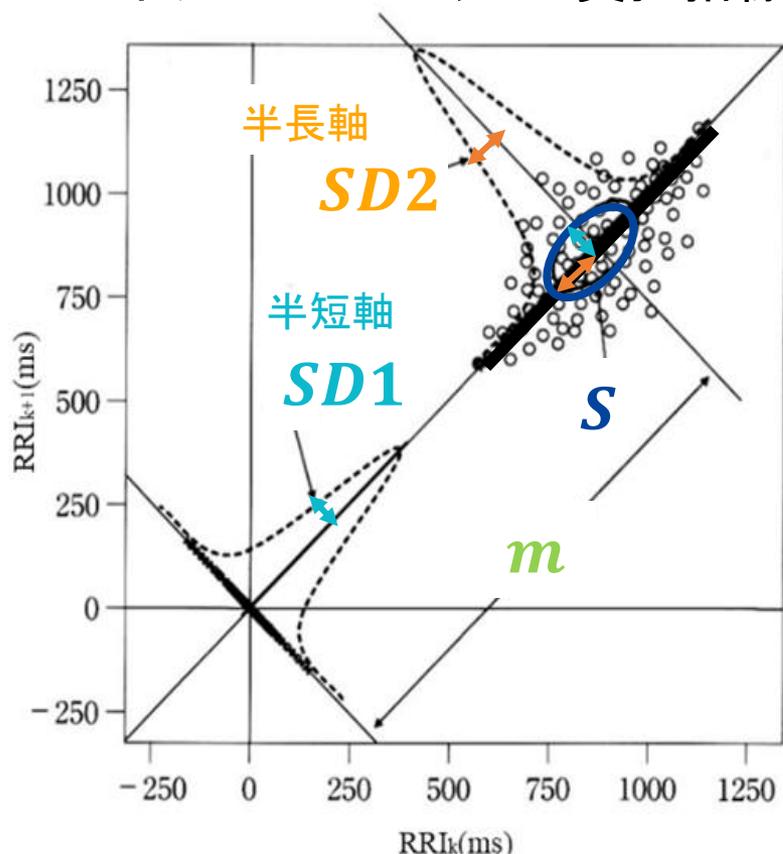


図9. m , S , σ_x , σ_{-x} の例^[23]

Orellana et.al^[22]

1. $y = x$ 軸上に投影した点の原点からの距離の平均 m
2. 副交感神経活動に比例する $SD1$
3. 交感神経活動に反比例する $SD2$
4. プロットした点を楕円に近似した際の面積 S

$$S = \pi \times SD1 \times SD2$$
5. 副交感神経活動に比例する $SD1$ と交感神経活動に反比例する $SD2$ の比 $SD1/SD2$

本研究では、5つのLP指標を用いる

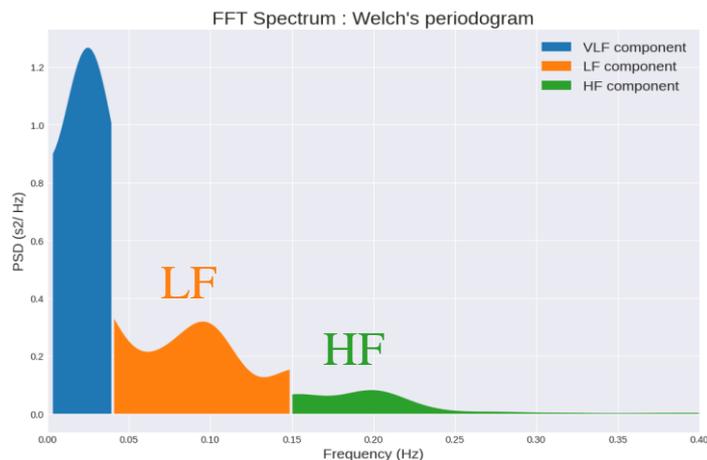
客観的負担度評価法 ～ 周波数領域の心拍指標 ～

✓ LF/HF [22]

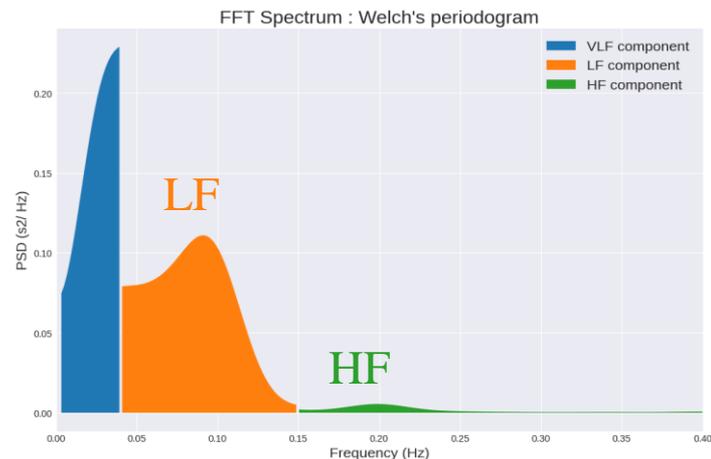
一 負荷時に働く交感神経と休息時に働く副交感神経のバランスを表す指標

低周波成分 LF … 交感神経や副交感神経が緊張している場合に現れる
高周波成分 HF … 副交感神経が緊張している場合に現れる

本研究では, LF/HF, LF, HFを用いる



安静時



上段作業のみ

※ 予備実験

因果関係の視覚化

✓ ベイジアンネットワーク(BN) [23]

- ◆ 複数の確率変数間の定性的な依存関係を有向非循環グラフ(DAG)で表したもの
- ◆ 個々の変数間の定量的な関係を条件付き確率で表したモデル

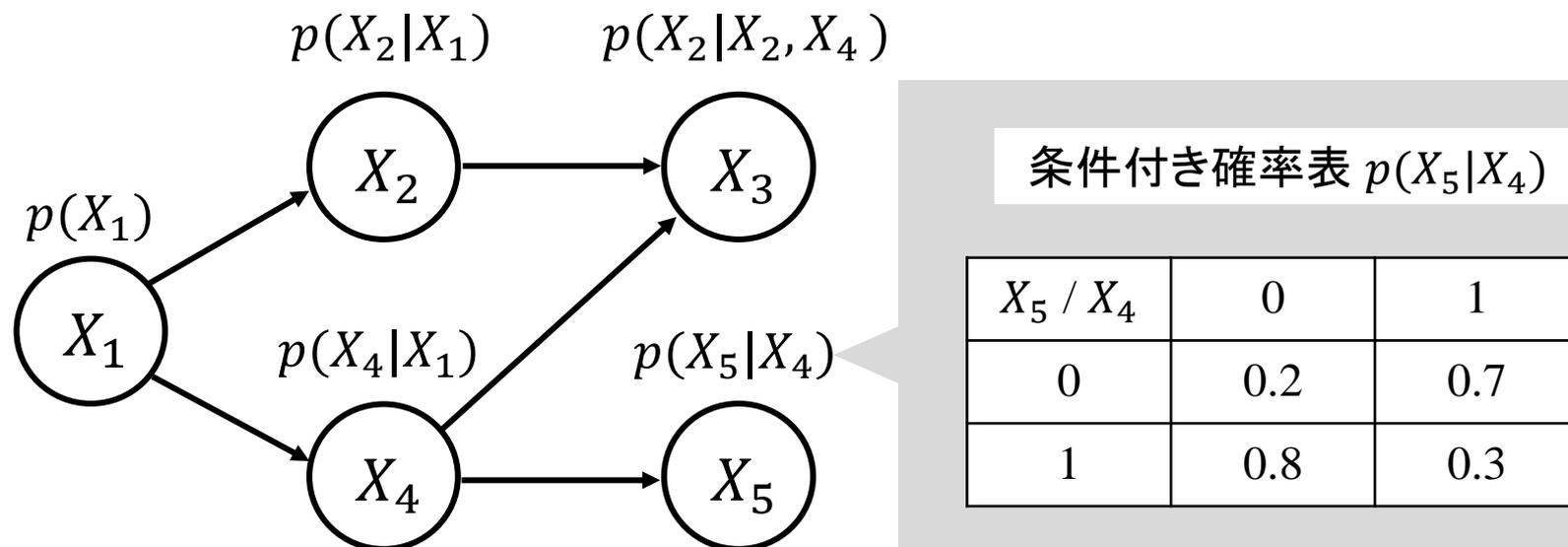


図10. BNのイメージ図

ベイジアンネットワークによる分析の流れ [23] [24]

25

使用ソフト： BayoLinkS Ver 9.1.1 (NTTデータ数理システム社製)

STEP 1

因果構造の仮説を立てる

原因

大気汚染

喫煙

病気

肺がん

症状
検査結果レントゲン
検査

呼吸困難

STEP 2

データに基づいて構造学習

大気汚染

喫煙

肺がん

レントゲン
検査

呼吸困難

ベイジアンネットワークによる分析の流れ [23] [24]

STEP 3 確率推論

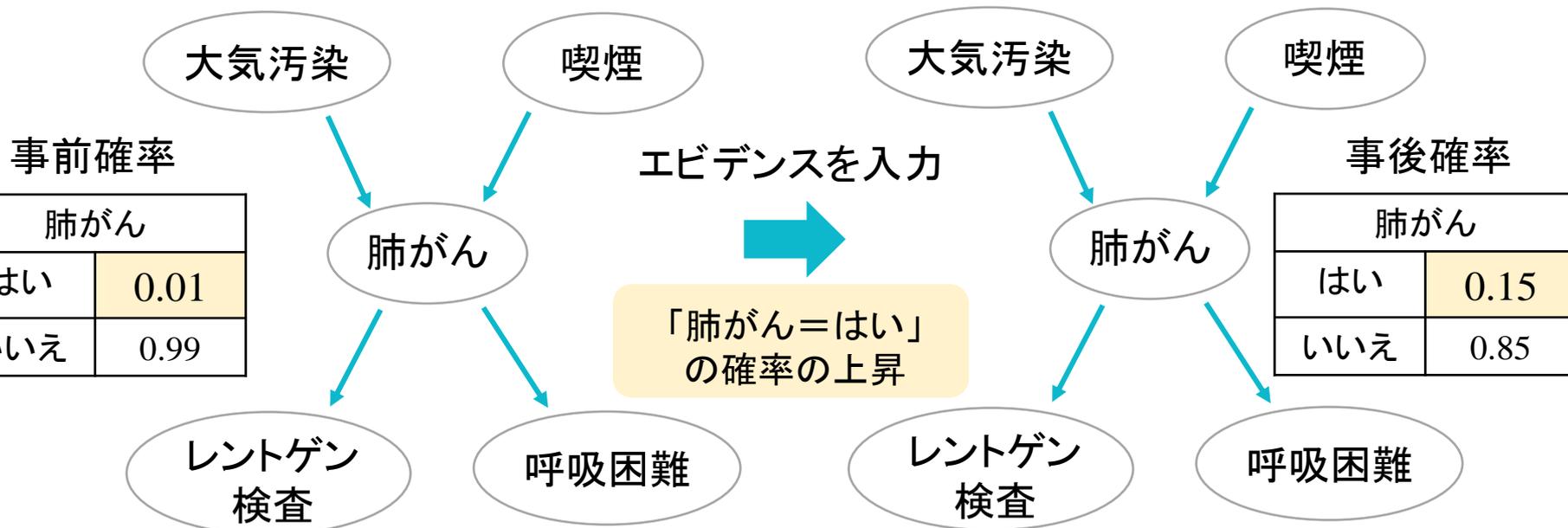
ある一部の変数を観測した時のその他の変数についての確率分布を求める

大気汚染	
低い	0.9
高い	0.1

喫煙者	
はい	0.3
いいえ	0.7

大気汚染	
低い	0
高い	1

喫煙者	
はい	1
いいえ	0



実験 & 分析フロー

27

Step 1 実際のピッキング現場や作業を再現しての測定

Step 2 作業の要素とNASA-TLXと心拍変動指標の結果

Step 3 相関分析を用いて因果構造の仮説を立てる

Step 4 ベイジアンネットワークによる負担要因・負担度の推定

実験 & 分析フロー

28

Step 1 実際のピッキング現場や作業を再現しての測定

Step 2 作業の要素とNASA-TLXと心拍変動指標の結果

Step 3 相関分析を用いて因果構造の仮説を立てる

Step 4 ベイジアンネットワークによる負担要因・負担度の推定

Step 1 : 現場のヒヤリング & 実験する目的

現場の声

1. 保管割当について

→ 収納効率を重視しているために、システム上格納する棚を指定出来ない

〈仮説 1〉 正常作業域外の作業は、身体的負担を増加させる可能性がある

2. 棚待ち時間を解消する運航スケジュールの作成に現在取り組んでいる

〈仮説 2〉 待ち時間がさらに短くなる(なくなる)と負担度が増加する可能性がある



棚搬送ロボットを用いたオーダーピッキング特有の...

〈仮説 3〉 複数商品の取り出し・複数箇所への仕分けの頻度が多くなると負担度が増加する可能性がある

Step 1: 現場と作業を再現

✓ 実験環境

— 現場を再現するため、棚の高さは実際の寸法に合わせ、作業音も流した

※ D段からの取り出しではラダーを使用せず、背伸びして大箱自体を作業机においた

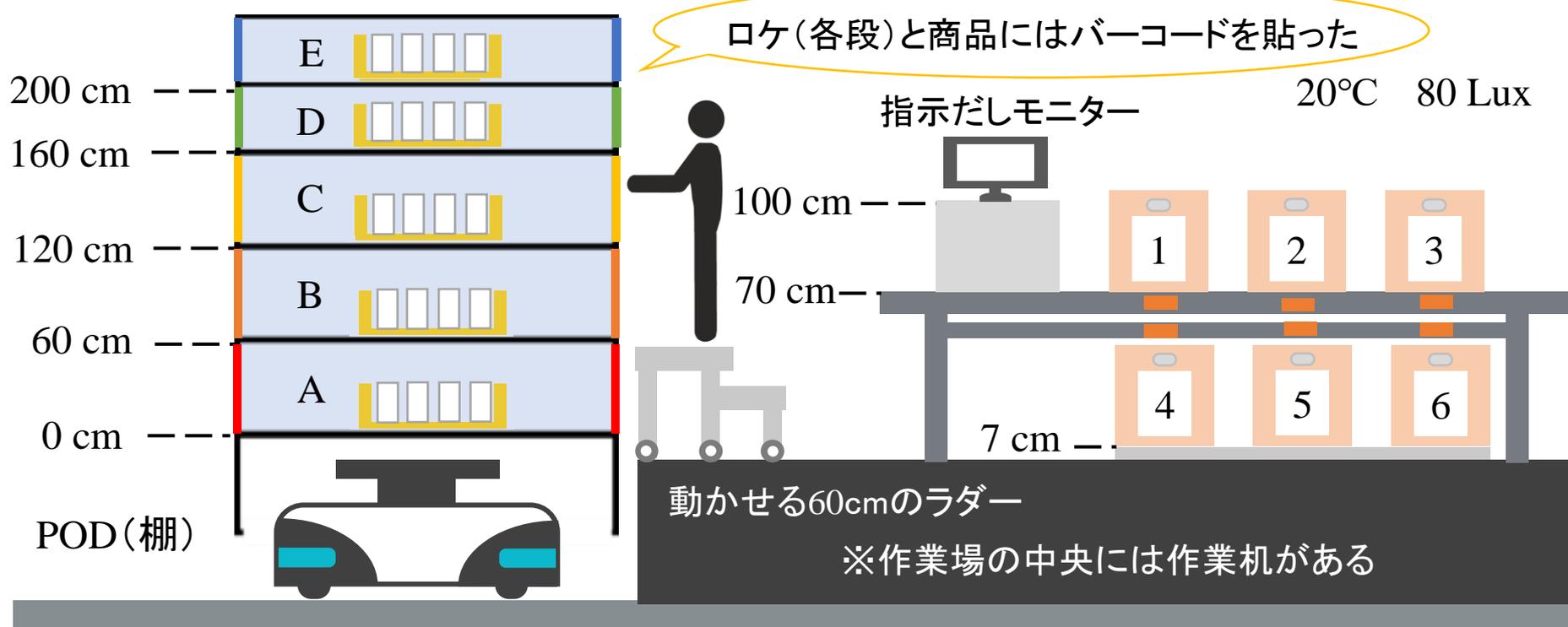


図11. 本実験のレイアウトと詳細な寸法

Step 1: 現場と作業を再現

31

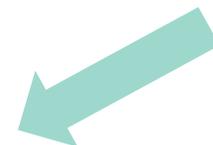
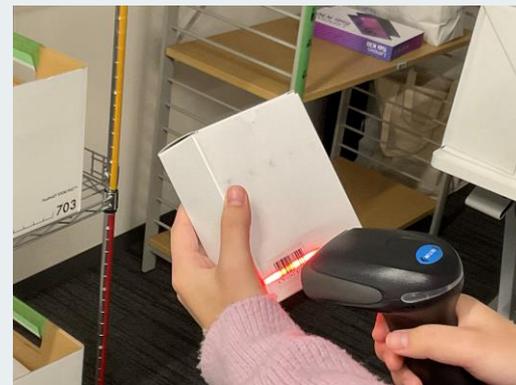
1. ロケ(棚の各段)のスキャン



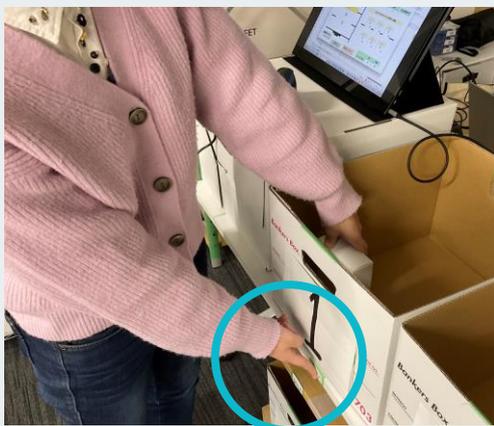
2. 商品を取り出す



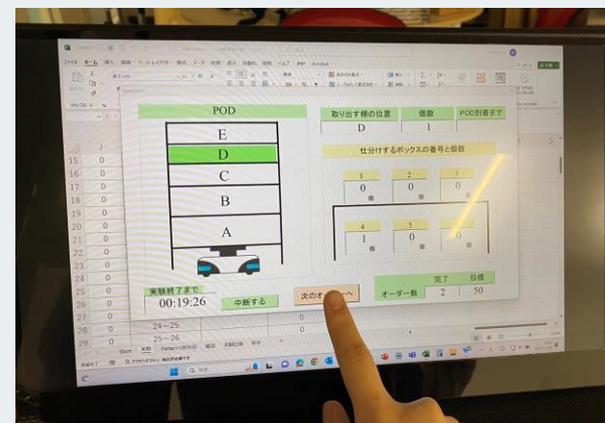
3. 商品のスキャン



4. 商品を間口へ投入 & DASボタンを押す



5. 次のピッキング指示を見る



Step 1: 現場と作業を再現

32

✓ 実験内容

一 商品を棚から取ってスキャン & 間口に仕分けしてDASボタンを押す作業

特徴の異なる4つのピッキング表に基づいた作業を20分間行う

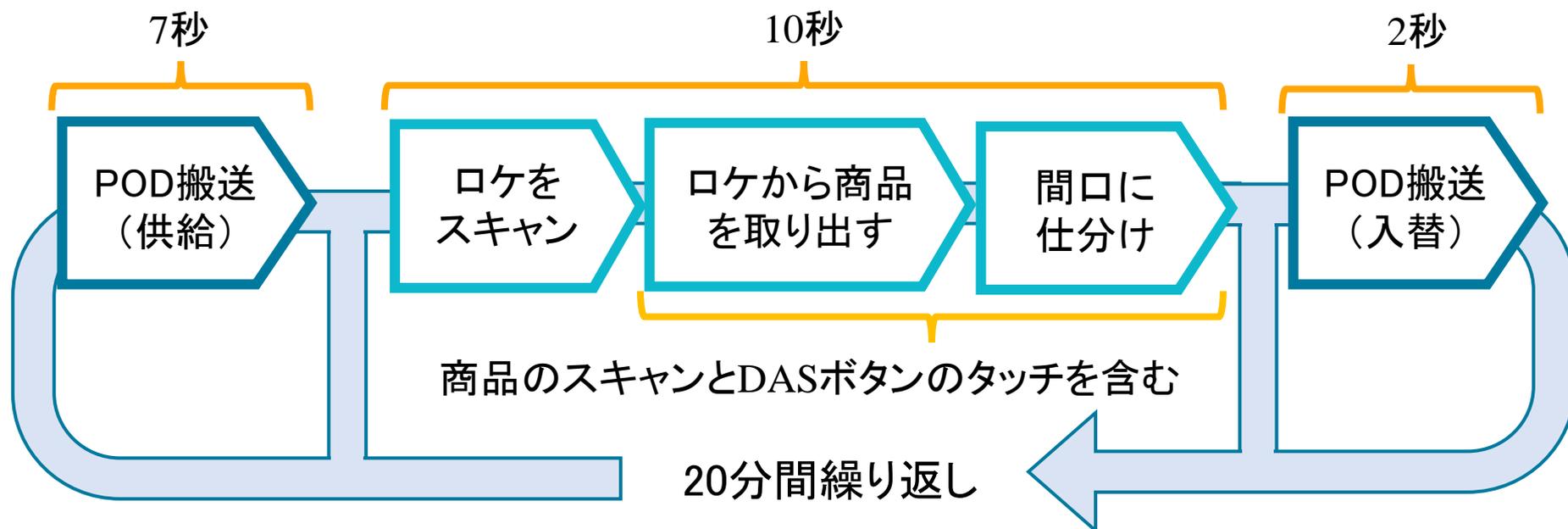


図12. 本実験の作業内容の詳細 ※POD(棚)

Step 1 : 現場と作業を再現

33

✓ 4つのピッキング表の特徴

安静パート・各Pattern 作業時間 20分

Pattern 1
基準作業

1. 正常作業域内の作業が多い（通常の作業）
2. 表3に基づいた頻度と時間の待ちが発生する

Pattern 2

1. 正常作業域外の作業が多い
2. Pattern 1 と同じ待ちを生成する

Pattern 3

1. 正常作業域内の作業が多い（通常の作業）
2. 待ちがなく、次々とピッキングの指示が出される

Pattern 4
現場に近い作業

1. 正常作業域内の作業が多い（通常の作業）
2. 複数の商品の取り出し・複数箇所への仕分けを含む
3. Pattern 1 と同じ待ちを生成する

※正常作業域・・・作業者に負担がかからない作業領域のこと。図13のC段に相当する

Step 1: 現場と作業を再現

✓ 実験設定

- 01 被験者は1名, 実験日数は5日間
- 02 安静状態(座位) → Pattern 1 → 2 → 3 → 4 の一連の測定を計5回行った
- 03 各作業終了後, 10分間安静にし, NASA-TLXのアンケートに回答させた

✓ 使用デバイス — Polar H10, Andoroidの端末 Ver.11

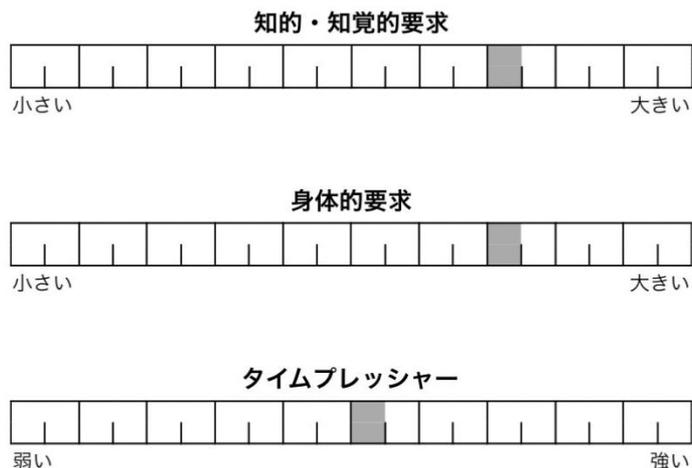


図13. NASA-TLXの測定例^[18]

Andoroid アプリ
Polar Sensor Logger

チェストに装着する
ウェアラブル心拍計

Bluetoothで連携



図14. Polar H10と使用アプリ^[25]

実験 & 分析フロー

35

Step 1 実際のピッキング現場や作業を再現しての測定

Step 2 作業の要素とNASA-TLXと心拍変動指標の結果

Step 3 相関分析を用いて因果構造の仮説を立てる

Step 4 ベイジアンネットワークによる負担要因・負担度の推定

Step 2 : 各Patternの特徴を定義

36

Pattern 1と比較した際の各Patternの主な特徴は実験計画の通りとなった

Pattern 2

正常作業域外の作業
頻度が多い

Pattern 3

待ちがない

Pattern 4

複数個の商品の取り出し
複数箇所への仕分け

表3. オーダーピッキング作業の要素(実験結果一部抜粋)

		ピッキング個数 [個]	正常作業域内の作業 [回]	正常作業域外の作業 [回]	複数箇所への仕分け [回]	待ち時間 [s]
第1回	Pattern1	64	79	49	0	320
	Pattern2	57	16	98	0	279
	Pattern3	93	112	74	0	0
	Pattern4	85	63	46	21	171
第2回	Pattern1	67	82	52	0	320
	Pattern2	61	17	105	0	300
	Pattern3	89	107	71	0	0
	Pattern4	85	63	46	21	171
第3回	Pattern1	64	79	49	0	320
	Pattern2	56	15	97	0	279
	Pattern3	97	116	78	0	0
	Pattern4	90	66	49	22	171

Step 2 : NASA-TLX と作業要素の関係

表4. NASA-TLXの結果一部抜粋(下位尺度の評価値とWWL)

指標		MD	PD	TD	OP	EF	FR	WWL
第1回	Pattern1	35	55	55	20	70	75	57.33
	Pattern2	40	85	70	90	85	85	79.67
	Pattern3	50	80	80	85	85	85	82.67
	Pattern4	90	70	80	25	75	80	75.67

Pattern 1 & 2 & 3 & 4 について

各Patternの特徴となる要素とNASA-TLXの下位尺度の評価値・WWLの間で相関分析を行い、 t 検定を用いて有意差検定を行う

表5. NASA-TLXと作業要素の関係

指標	MD	PD	TD	OP	EF	FR	WWL
正常作業域外の作業数	-0.42	0.76	0.37	0.40	0.51	0.63	0.55
待ち時間	-0.32	-0.44	-0.73	-0.33	-0.71	-0.65	-0.69
複数箇所への仕分け	0.89	-0.02	0.25	-0.19	-0.18	-0.26	0.14

有意水準5%で有意

P値が最も小さいもの

正常作業域内の作業数と有意な関係を持つ NASA-TLX の指標はなかった

結果

Step 2 : 心拍変動指標の結果

38

✓ 分析データ

- ◆ 作業時間20分のうち最後の10分間のRRIデータ
(各Pattern特有の負担要素をかけてから、ある程度時間が経った状態を比較するため)
- ◆ Pythonパッケージ *hrv-analysis* を使用し各指標を算出した

✓ 心拍変動指標間の相関性

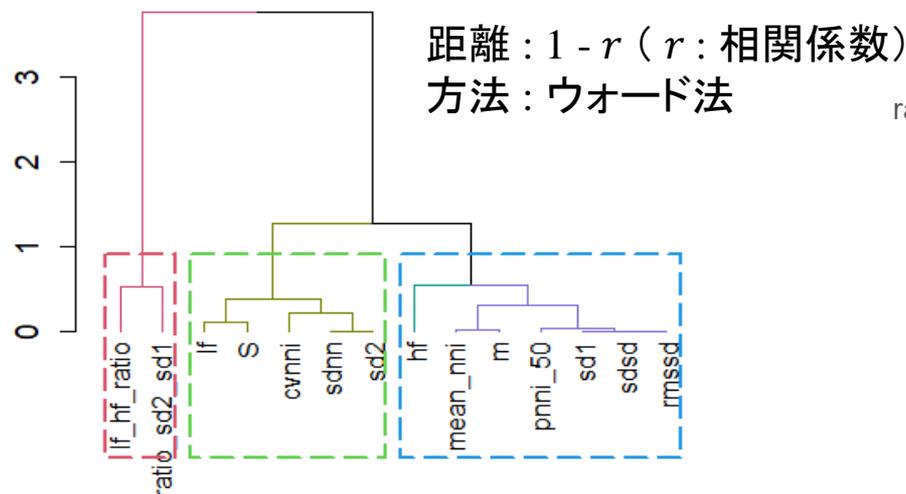


図15. 階層クラスタリング(R)

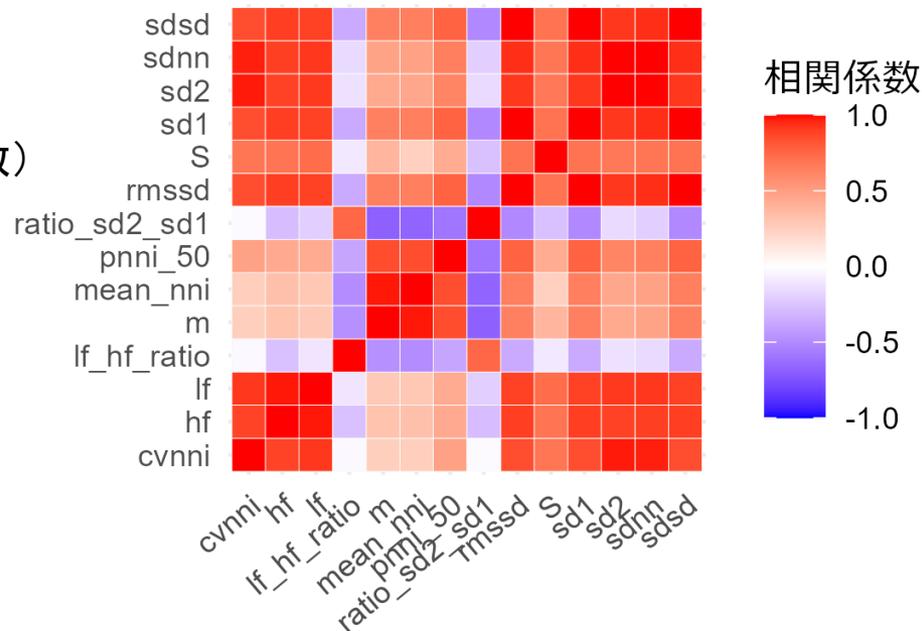


図16. 相関行列のヒートマップ(R)

Step 2 : 心拍変動指標 と NASA-TLX の関係

✓ 先行研究に基づいたクラスタの意味付け

■ 自律神経のバランスを表す指標^{[20] [26]}

「LF/HF, SD2/SD1の増加」⇒ 交感神経優位

■ 交感神経の活動を表す指標^{[11] [20]}

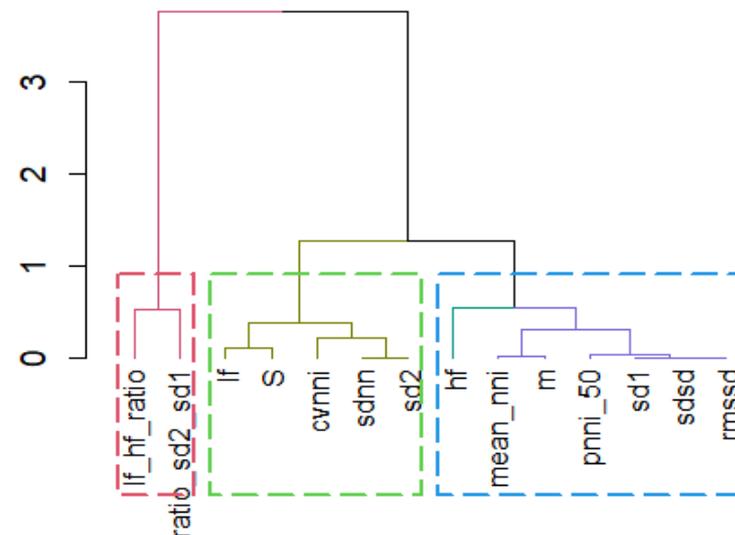
心拍の揺らぎが小さくなる

「LFの増加」 「CVNNI, SDNN, SD2, Sの減少」⇒ 交感神経優位

■ 副交感神経の活動を表す指標^{[11] [20] [27]}

「HFの増加」 「MeanNNI, m, SD1, S, RMSSD, SDSD, pNN50の減少」

⇒ 交感神経優位



Step 2 : 心拍変動指標 と NASA-TLX の関係

40

表6. NASA-TLXと心拍指標の相関

	MD	PD	TD	OP	EF	FR	WWL
mean_nni	0.53	-0.07	0.26	0.14	0.14	-0.02	0.14
sdnn	0.17	0.41	0.51	0.29	0.41	0.29	0.48
sdsd	0.24	0.26	0.47	0.33	0.44	0.32	0.42
rmssd	0.24	0.26	0.47	0.33	0.44	0.32	0.42
cvnni	0.04	0.49	0.50	0.29	0.42	0.33	0.50
lf_hf_ratio	-0.47	0.20	-0.19	-0.24	-0.10	-0.01	-0.05
sd1	0.24	0.26	0.47	0.33	0.44	0.32	0.42
sd2	0.16	0.43	0.51	0.28	0.41	0.29	0.49
m	0.50	-0.04	0.28	0.17	0.21	0.03	0.18
S	0.01	0.30	0.41	0.29	0.54	0.37	0.42

有意水準5%で有意である

RMSSD, SDSD, SD1の相関係数がほぼ等しい

pNN50, LF, HF, SD2/SD1は 5% 有意な相関である指標の組み合わせなし

符号を見ると交感神経ではなく、副交感神経が優位である！なぜ？

Step 2 : 心拍変動指標 と NASA-TLX の関係

41

宮脇(1990)[28]

心臓の余裕力 ($HR_{max} - HR_{rest}$) が小さい人に急激な運動を与えた場合、運動量の増加に伴い、CV値は上昇傾向を示した = 副交感神経活動が亢進傾向にあった

⇒ 1回の換気量を増加させることで、心臓への負担を減らしている

急激な負荷がかかる運動では自律神経のアンバランスが生じやすい

表7. 本研究のCV値(赤: 安静時よりも大きい)

指標	CV値 (cvnmi)				
	安静	Pattern1	Pattern2	Pattern3	Pattern4
1回	0.0574	0.0511	0.0604	0.0459	0.0589
2回	0.0618	0.0574	0.0694	0.1292	0.0616
3回	0.0596	0.0467	0.0624	0.0601	0.0604
4回	0.0662	0.0562	0.0767	0.0643	0.0659
5回	0.0631	0.0554	0.0836	0.0595	0.0621

本研究も急激に身体的負荷をかけたことで副交感神経活動が亢進傾向になった可能性あり

Step 2 : 心拍変動指標 と 作業要素の関係

表8. Pattern1～4の心拍変動指標と作業要素の関係

	指標	mean_nni	sdnn	sdsd	pnni_50	rmssd	cvnni	lf	hf	lf_hf_ratio	sd1	sd2	ratio_sd2_sd1	m	S
1	正常作業域内の作業数	0.31	0.03	0.30	0.20	0.30	-0.08	0.22	0.29	-0.45	0.30	-0.01	-0.70	0.37	0.36
2	正常作業域外の作業数	-0.45	0.13	-0.06	-0.09	-0.06	0.30	0.06	-0.04	0.51	-0.06	0.16	0.49	-0.41	0.14
3	待ち時間	-0.20	-0.30	-0.42	-0.25	-0.42	-0.26	-0.38	-0.42	0.27	-0.42	-0.28	0.39	-0.27	-0.53
4	複数箇所への仕分け	0.48	0.04	0.09	0.26	0.09	-0.09	-0.11	-0.02	-0.43	0.09	0.04	-0.20	0.45	-0.13

1. 正常作業域内の作業数が多い ⇒ 正常作業域外の作業数が少ない
⇒ このとき、負担が小さいので、LF/HFやSD2/SD1と負の相関を持つのは**妥当である**
2. 正常作業域外の作業数が多い = 負担が大きい
⇒ LF/HFやSD2/SD1と正の相関を持ち、MeanNNIと負の相関を持つのは**妥当である**
3. 待ち時間がなし = 負担が大きい ⇒ Sが小さくなるはずである
⇒ Sと待ち時間は正の相関を持つはずなので、**妥当でない**
4. MeanNNIとmが知覚的作業負荷と正の相関を持つのは**妥当でない**(P.46の2を参照)

実験 & 分析フロー

43

Step 1 実際のピッキング現場や作業を再現しての測定

Step 2 作業の要素とNASA-TLXと心拍変動指標の結果

Step 3 相関分析を用いて因果構造の仮説を立てる

Step 4 ベイジアンネットワークによる負担要因・負担度の推定

Step 3 : 因果構造の仮説

✓ Step 2 の結果を踏まえて

1. 作業要素と NASA-TLX の間で相関分析で有意な相関がどの作業要素とも見られなかった**作業成績(OP)**は因果構造に加えない
2. 急激な身体的負荷の影響を受け, 知的・知覚的要求(MD)と有意な相関を持つ MeanNNI・m・LF/HFも副交感神経が優位な状態となっている

※ 平松ら(2019)^[29]—精神作業負荷を与えた場合, MeanNNIとMDは負の有意な相関だった

⇒ MD や複数箇所への仕分け作業とこれらの指標の因果関係はないと見なす

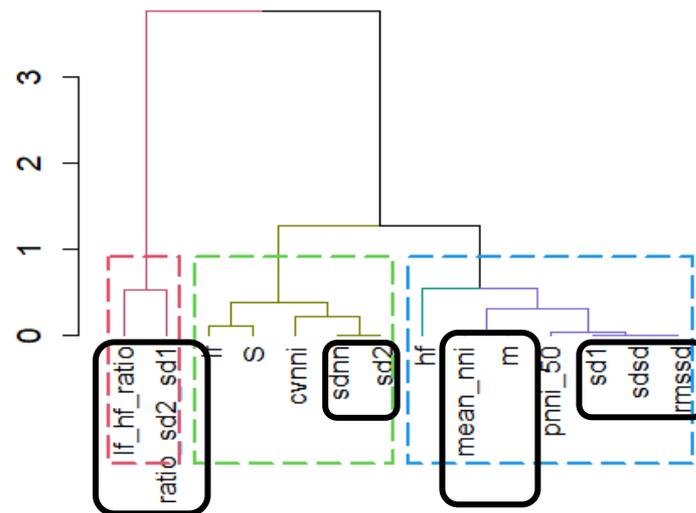
3. クラスタリングの結果から以下の指標を同一の指標と見なす

◆ SDNN, SD2

◆ SDSD, RMSSD, SD1

◆ SD2/SD1 (ration_sd2_sd1), LF/HF

SD1 と SD2とLF/HF を因果構造に加える



結果

Step 3 : 因果構造の仮説

45

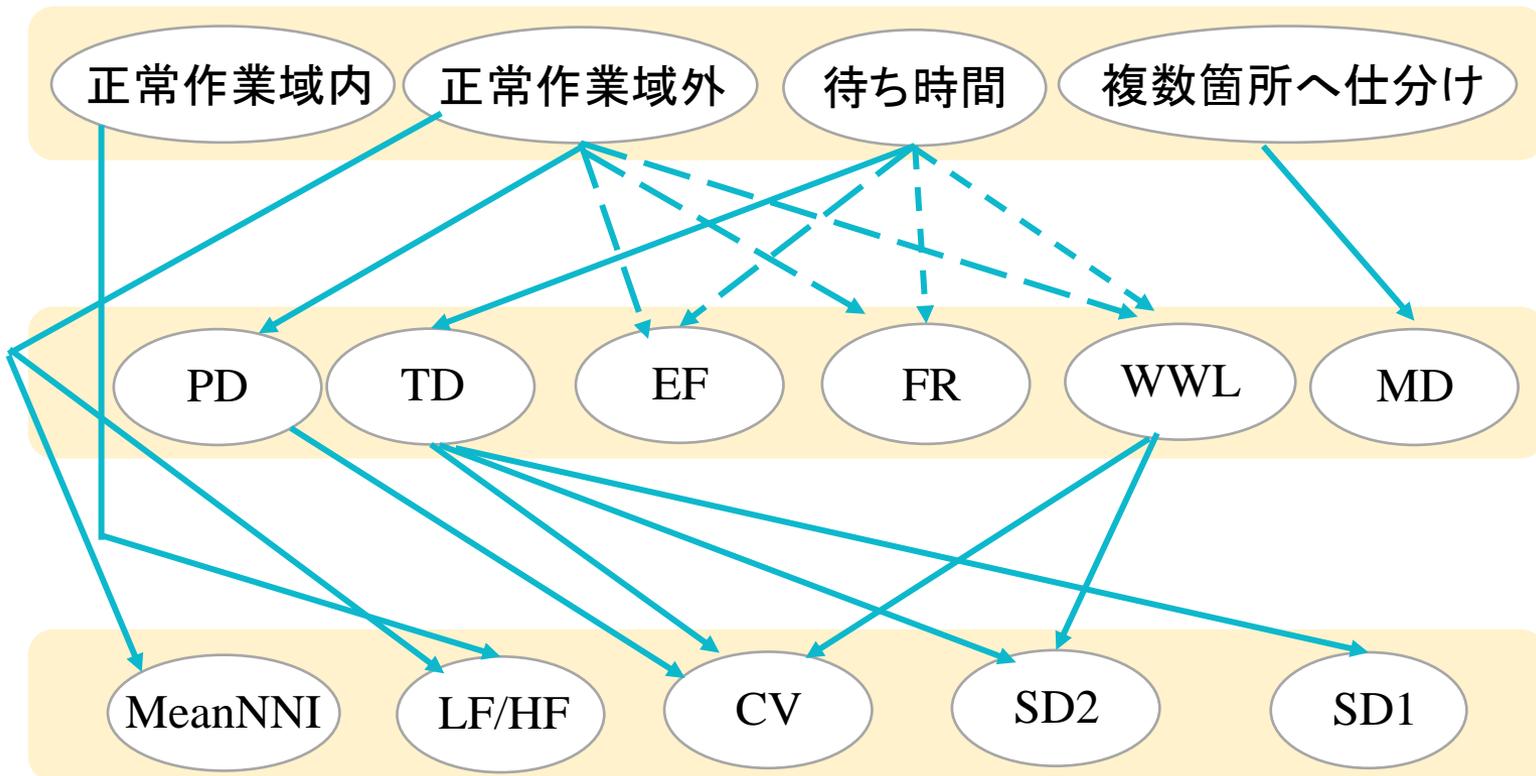
Step 2の結果で, 5% 有意な相関関係を持つ指標を導入し,
以下の因果構造の仮説を立てる

原因となる
作業要素

負担要因



心拍指標



← 親候補

← 必須親

実験 & 分析フロー

46

Step 1 実際のピッキング現場や作業を再現しての測定

Step 2 作業の要素とNASA-TLXと心拍変動指標の結果

Step 3 相関分析を用いて因果構造の仮説を立てる

Step 4 ベイジアンネットワークによる負担要因・負担度の推定

ベイジアンネットワークモデルの構築

47

本研究では多重共線性を避けるべく、因果仮説のデータのみを扱う

表9. 生データ(一部抜粋)

正常作業域内	正常作業域外	複数箇所への仕分け	待ち時間	MD	PD	TD	EF	FR	WWL	mean_nni	cvnni
79	49	0	320	35	55	55	70	75	57.33	622.72	0.05
16	98	0	279	40	85	70	85	85	79.67	578.75	0.06
112	74	0	0	50	80	80	85	85	82.67	637.73	0.05
63	46	21	171	90	70	80	75	80	75.67	704.53	0.06
82	52	0	320	35	55	55	75	75	64.00	754.35	0.06

離散化

等間隔で3分割(複数箇所への仕分けのみ2分割)

表10. 各変数の取りうる状態

変数	取りうる状態
正常作業域内・外の作業数	多い／中くらい／少ない
複数箇所への仕分け	あり／なし
待ち時間	長い／短い／なし
NASA-TLX・心拍変動指標	大きい／中くらい／小さい

ベイジアンネットワークモデルの構築

✓ 構造学習の結果

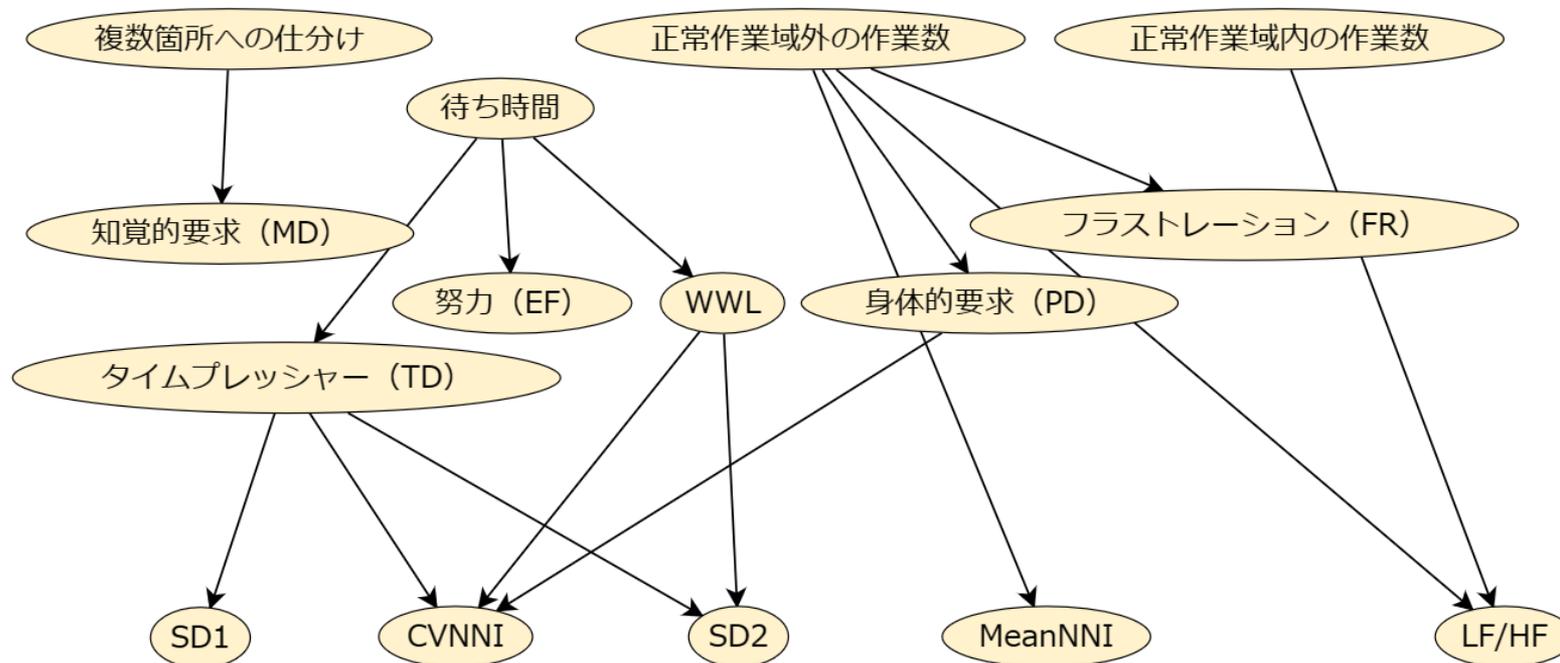
アルゴリズム : Greedy Strategy

正規化 : MAP

評価基準 : AIC(赤池情報量)

確率推論 : LoopyBP

欠損処理 : ペアワイズ法



BNによる仮説の検証

49

現場の声

確率推論を用いて検証

1. 保管割当について

→ 収納効率を重視しているために、システム上格納する棚を指定出来ない

〈仮説 1〉 正常作業域外の作業は、身体的負担を増加させる可能性がある

2. 棚待ち時間を解消する運航スケジュールの作成に現在取り組んでいる

〈仮説 2〉 待ち時間がさらに短くなる(なくなる)と負担度が増加する可能性がある

棚搬送ロボットを用いたオーダーピッキング特有の...

〈仮説 3〉 複数商品の取り出し・複数箇所への仕分けの頻度が多くなると負担度が増加する可能性がある



Step 2 で、知的・知覚的要求のみ有意な相関が見られた

確率推論による仮説 1 の検証

50

「身体的要求(PD)の大きい」の確率が上昇する

多い

正常作業域外の作業数			身体的要求 (PD)			フラストレーション (FR)		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
少ない	0.471	0	小さい	0.269	0.167	小さい	0.536	0.5
多い	0.235	1	大きい	0.419	0.667	大きい	0.17	0.167
中くらい	0.294	0	中くらい	0.311	0.167	中くらい	0.294	0.333

エビデンスの入力 : 正常作業域外の作業数

「身体的要求(PD)の小さい」、「フラストレーション(FR)が小さい」の確率が上昇する

少ない

正常作業域外の作業数			身体的要求 (PD)			フラストレーション (FR)		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
少ない	0.471	1	小さい	0.269	0.4	小さい	0.536	0.8
多い	0.235	0	大きい	0.419	0.2	大きい	0.17	0.1
中くらい	0.294	0	中くらい	0.311	0.4	中くらい	0.294	0.1

正常作業域外の作業は、身体的負担を増加させる

結果

確率推論による仮説 1 の検証

51

✓ MeanNNI・LF/HFから仮説1を検証

エビデンスの入力：正常作業域外の作業数=多い

正常作業域外の作業数

ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
少ない	0.471	0
多い	0.235	1
中くらい	0.294	0

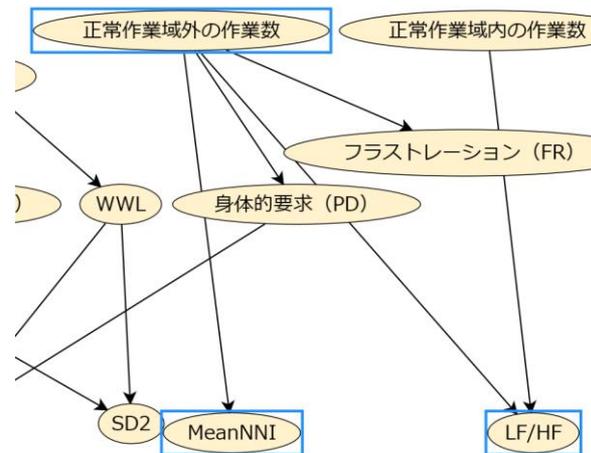
LF/HF

MeanNNI

ソフトエビデンス

ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.441	0.294	小さい	0.254	0.5
大きい	0.257	0.333	大きい	0.401	0.167
中くらい	0.302	0.373	中くらい	0.346	0.333



NASA-TLXと有意な相関を持たなかった MeanNNI, LF/HFについて、「MeanNNI = 小さい」、「LF/HF = 中くらい, 大きい」の確率が上昇した

交感神経が優位でストレス状態

結果

確率推論による仮説 2 の検証

52

エビデンスの入力 : 待ち時間

長い

待ち時間			タイムプレッシャー (TD)		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
なし	0.294	0	小さい	0.267	0.444
短い	0.294	0	大きい	0.34	0.111
長い	0.412	1	中くらい	0.393	0.444

努力 (EF)			WWL		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.443	0.667	小さい	0.267	0.444
大きい	0.34	0.111	大きい	0.515	0.333
中くらい	0.218	0.222	中くらい	0.218	0.222

「WWL, EF, TD = 大きい」の確率が減少

なし

待ち時間			タイムプレッシャー (TD)		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
なし	0.294	1	小さい	0.267	0.143
短い	0.294	0	大きい	0.34	0.714
長い	0.412	0	中くらい	0.393	0.143

努力 (EF)			WWL		
<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス			<input type="checkbox"/> ソフトエビデンス WWL		
状態名	事前確率	事後確率	状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.443	0.143	小さい	0.267	0.143
大きい	0.34	0.714	大きい	0.515	0.714
中くらい	0.218	0.143	中くらい	0.218	0.143

「WWL, EF, TD = 大きい」の確率が上昇

待ち時間が長いと負担が小さくなり、待ち時間がなくなると負担が大きくなる

結果

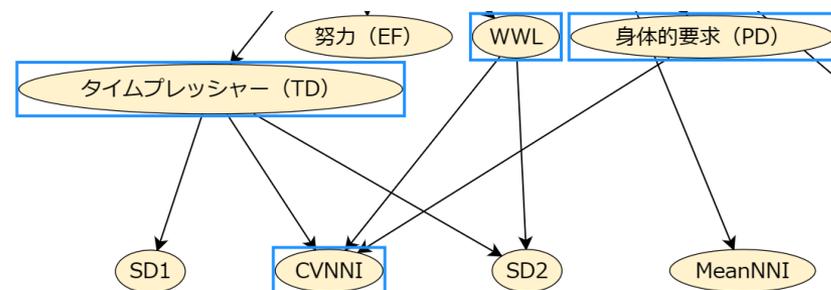
心拍指標による負担要因の推定

53

✓ CVNNI(RRIの変動係数)

→ 負担時ほど小さくなる

エビデンスの入力：CVNNI = 小さい



CVNNI

 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.387	1
大きい	0.298	0
中くらい	0.314	0

タイムプレッシャー (TD)

 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.243
大きい	0.34	0.366
中くらい	0.393	0.391

WWL

 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.243
大きい	0.515	0.544
中くらい	0.218	0.213

身体的要求 (PD)

 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.269	0.248
大きい	0.419	0.408
中くらい	0.311	0.345

PD, TD, WWLいずれも「小さい」の確率が減少し、「TD=大きい」「WWL=大きい」「PD=中くらい」の確率が上昇した

CVNNIはPD, TD, WWLを推定するのに有効な指標である！

結果

心拍指標による負担要因の推定

54

✓ SD2 (ポアンカレプロットの半長軸)

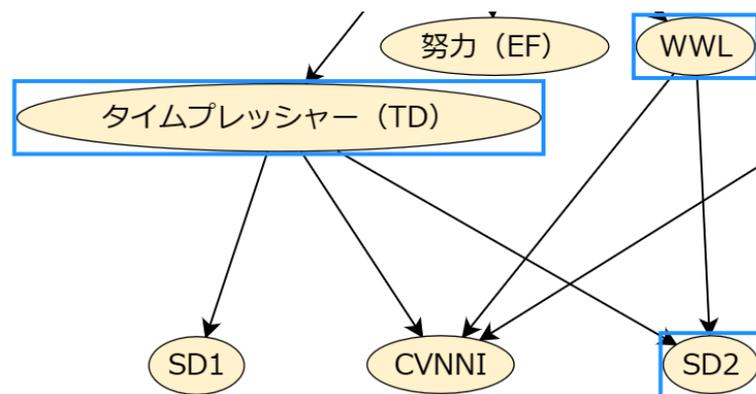
→ 負担時ほど小さくなる

エビデンスの入力：SD2 = 小さい

SD2		
<input type="checkbox"/>	ソフトエビデンス	
状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.479	1
大きい	0.257	0
中くらい	0.264	0

WWL		
<input type="checkbox"/>	ソフトエビデンス	
状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.232
大きい	0.515	0.569
中くらい	0.218	0.199

タイムプレッシャー (TD)		
<input type="checkbox"/>	ソフトエビデンス	
状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.23
大きい	0.34	0.351
中くらい	0.393	0.418



TD, WWLいずれも「小さい」の確率が減少し、「TD=大きい, 中くらい」「WWL=大きい」の確率が上昇した

SD2はTD, WWLを推定するのに有効な指標である!

心拍指標による負担要因の推定

- ✓ SD1 (ポアンカレプロットの半短軸) → 負担時ほど小さくなる

エビデンスの入力

SD1 = 小さい

SD1 = 大きい

SD1

ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.566	1
大きい	0.173	0
中くらい	0.261	0

タイムプレッシャー (TD)

SD1

ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.566	0
大きい	0.173	1
中くらい	0.261	0

タイムプレッシャー (TD)

ソフトエビデンス

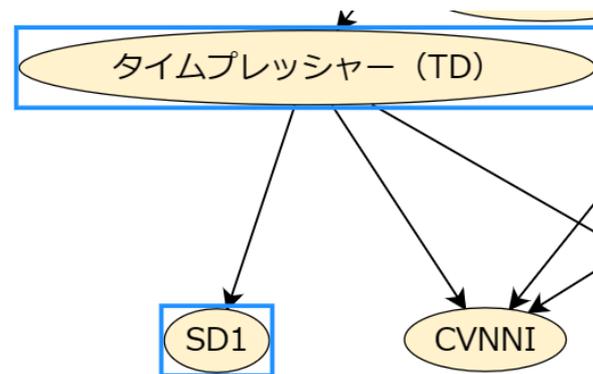
状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.314
大きい	0.34	0.3
中くらい	0.393	0.386

ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.267	0.257
大きい	0.34	0.491
中くらい	0.393	0.252

副交感神経優位

「SD1=大きい」と「TD=大きい」の確率が上昇 ← 「TD=小さい」の確率が上昇するべき



急激に身体的負荷をかけたことで副交感神経活動が亢進傾向になった

Pattern2・3のポアンカレプロットは実際、異常値が多かった

ポアンカレプロットの結果

副交感神経優位

SD1(半短軸)が大きくなった原因 ➤ Pattern 2 & 3 の異常値に影響された可能性

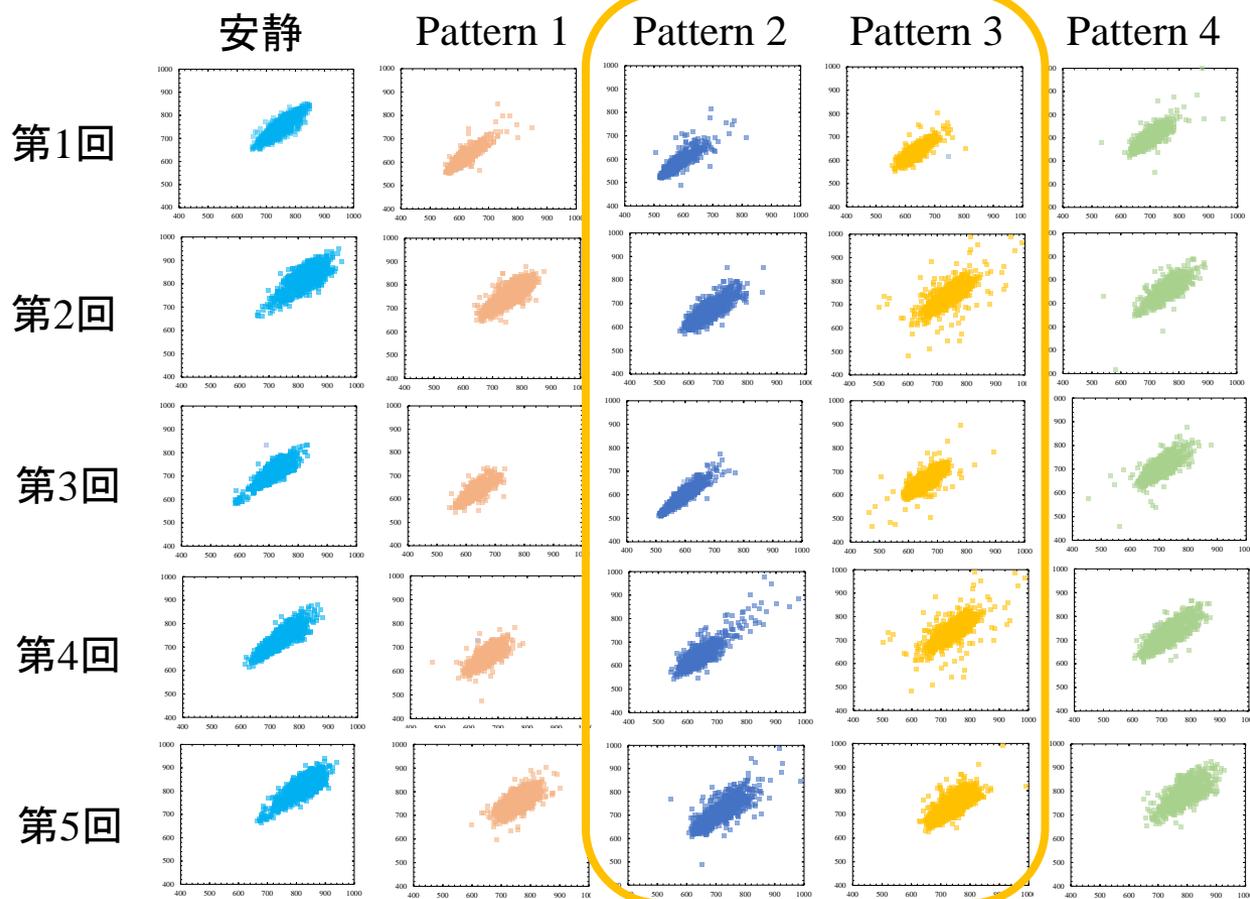


図17. ポアンカレプロットの結果

心拍指標による負担要因の推定

57

1. CVNNIは、PD, TD, WWLの状態を推定するのに有効な指標である
2. SD2は、TD, WWLの状態を推定するのに有効な指標である

表11. CVNNI関連の相互情報量

説明変数	相互情報量
タイムプレッシャー(TD)	0.0075
WWL	0.0044
身体的要求(PD)	0.0029

表12. SD2関連の相互情報量

説明変数	相互情報量
タイムプレッシャー(TD)	0.024
WWL	0.022

CVNNI, SD2は、特にTDに影響を受ける

表13. WWL関連の相互情報量

説明変数	相互情報量
SD2	0.089
CVNNI	0.023

WWLへの影響度はSD2の方が高い

表14. TD関連の相互情報量

説明変数	相互情報量
SD1	0.033
SD2	0.009
CVNNI	0.004

SD1はP.55,56の理由から不適. TDへの影響度はSD2が高い

総括

58

本研究の目的

棚搬送ロボットを用いたオーダーピッキング作業において、負担要因と原因となる作業の要素を推定できる心拍指標を提案する

実験結果

01

正常作業域外の作業が増える・待ち時間が短くなる
⇒ 負担が増加する可能性があることを示せた

02

CVNNIはPD, TD, WWLの状態を, SD2はTD, WWLの状態を推定するのに有効な指標である.
特にTD, WWLへの影響度はSD2の方が高い.

結論

BNを用いて、心拍変動指標からNASA-TLXの下位尺度・WWLや負担の原因となる作業の要素を推定することのできるベイジアンネットワークを構築することができ、有効な心拍指標を検討することができた。

今後の課題 & 展望

今後の課題

01

より多くの被験者と実験回数で、実験を重ねて個人差を考慮した心拍による負担要因(負担度)推定モデルを構築する。

02

急激な運動負荷を加えたために副交感神経が優位に働き、異常値が発生しやすかった。



急激な負荷がかかる作業について、実験計画の見直す

今後の展望

01

BNを用いて、負担となりうる要素を行ったときのストレスを数値化する。ロボットと人の協働作業をマルチエージェントシミュレーションで再現し、仮想空間の実験を行って、効率性や省電力性は担保しつつ、負担度を軽減した作業設計を提案する。

02

作業者のモチベーションを維持するために、リアルタイムで測定されるストレスの度合いに応じた作業割当の設計を行う。

参考文献

- [1] 経済産業省. “電子商取引に関する市場調査を取りまとめました”. 2020.
<https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200722003/20200722003.html>, (参照 2023-11-02)
- [2] 富士電機. 物流・倉庫部門における人手不足の実態調査. 2021.
<https://www.fujielectric.co.jp/products/logistics/research/research09/>, (参照 2023-11-02)
- [3] 国土交通省. “5. 2024年問題への対応に向けた動き”. <https://onl.bz/T25uBq9>, (参照 2023-11-02)
- [4] 国土交通省. “トラック運送業の現状等について”. <https://www.mlit.go.jp/common/001242557.pdf>, (参照 2023-11-02)
- [5] Le-Duc, T., De Koster, R.: Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse, *European Journal of Operational Research*, Vol. 176, pp. 374-388(2005)
- [6] Gajšek, B., Đukić, G., Opetuk, T., & Cajner, H. : Human in Manual Order Picking Systems . *Famena Repository*, (2017)
- [7] Azhar A. S. B., Makhtar A. K. B. (2022). Development of Heart Rate Sensor Warning System to Estimate driver’s Cognitive Distraction Level. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 900, pp.321-334.
- [8] 宇佐美雄基, 石沢千佳子, 景山陽一, 白須礎成 : PC作業時の集中状態と生体情報の関連に関する検討. 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 61, pp. 25-28 (2018)
- [9] 長濱澄, 大出香菜子, 宮西佑香子, 加藤一聖, 丸井朱里, 森田祐介 : 映像教材における教材の難易度が生体情報に与える影響についての分析. *日本教育工学会論文誌*, Vol. 43, pp.145-148 (2020)
- [10] Alaimo, A., Esposito A., Orlando, C., & Simoncini, A. “Aircraft Pilots Workload Analysis: Heart Rate Variability Objective Measures and NASA-Task Load Index Subjective Evaluation”. *Aerospace*, Vol. 7, No. 9, pp.137–153(2020)
- [11] Sugiono, S., Widhayanuriyawan, D., & Andriyani, D. P. : Mental stress evaluation of car driver in different road complexity using heart rate variability (HRV) analysis. *Proceedings of the 5th International Conference on Bioinformatics Research and Applications*, pp.90–94 (2018)
- [12] 株式会社アナリティクスデザインラボ. ベイジアンネットワーク. 2023.
<http://www.analyticsdlab.co.jp/column/bayesiannetwork.html>, (参照 2023-11-06)
- [13] 横井都司如, 井東道昌, 小栗宏次 : ドライバの精神負荷に対する耐性を考慮した心拍変動量からの主観的精神負荷度推定. *電気学会論文誌*, Vol. 131, No. 12, pp. 2051-2056 (2011)
- [14] Wager, T. D., Waugh, C. E., Lindquist, M., Noll, D. C., Fredrickson, B. L., & Taylor, S. F. : Brain mediators of cardiovascular responses to social threat, Part I : Reciprocal dorsal and ventral sub-regions of the medial prefrontal cortex and heart-rate reactivity. *NeuroImage*, Vol. 47, No. 3, pp.821-835 (2009)

参考文献

- [15] Wager, T. D., van Ast, V. A., Hughes, B. L., Davidson, M. L., Lindquist, M., & Ochsner, K. N. : Brain mediators of cardiovascular responses to social threat, Part II: Prefrontal-subcortical pathways and relationship with anxiety. *NeuroImage*, Vol. 47, No. 3, pp.836-851 (2009)
- [16] Besson, P., Dousset, E., Bourdin, C., Bringoux, L., Marqueste, T., Mestre, D. R., & Vencher, J. L. : Bayesian Network classifiers inferring workload from physiological features: Compared performance. *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.282-287 (2012)
- [17] 三宅晋司, 神代雅晴 : メンタルワークロードの主観的評価法, *人間工学*, Vol. 29, No. 6, pp. 399-408 (1993)
- [18] Keith V. . “NASA Task Load Index” . <https://www.keithv.com/software/nasatlx/nasatlx-ja.html>, (参照 2023-11-06)
- [19] Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. “Heart Rate Variability Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use”. *Circulation*, Vol. 93, No. 5 (1996)
- [20] 松本佳昭, 森信彰, 三田尻涼, 江鐘偉: 心拍揺らぎによる精神的ストレス評価法に関する研究, *ライフサポート*, Vol. 22, No. 3, pp. 105-111(2010)
- [21] 豊福史, 山口和彦, 萩原啓: 心電図RR間隔のローレンツプロットによる副交感神経活動の簡易推定法の開発, *人間工学*, Vol. 43, No. 4, pp. 185-192(2007)
- [22] Orellana, J. N., de la Cruz Torres, B., Cachadiña, E. S., de Hoyo, M., & Cobo, S. D. : Two New Indexes for the Assessment of Autonomic Balance in Elite Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, Vol. 10, No. 4, pp.452-457 (2014)
- [23] 本村陽一 : “ベイジアンネットワーク - 入門からヒューマンモデリングへの応用まで, 日本行動計量学会セミナー資料(2004)
- [24] 本村陽一 (2023) “BayoLinkSで実践するベイジアンネットワーク” . Ohmsha
- [25] POLAR . “Polar H10 N” . <https://www.polar.com/ja/sensors/h10-heart-rate-sensor/> , (参照 2023-11-20)
- [26] Hsu, C., Tsai, M., Huang, G., Lin, T., Chen, K., Ho, S., Shyu, L., & Li, C. : Poincaré plot indexes of heart rate variability detect dynamic autonomic modulation during general anesthesia induction. *Acta Anaesthesiologica Taiwanica*, Vol. 50, No. 1, pp.12-18(2012)
- [27] Sandhya M., Mittal, S., Kathrotia, R., Rawat, V., S., Singh, Y., Srikant, S., Agrawal, M., & Mohan, L. : Cardiovascular autonomic Function Tests in Patients of Obsessive–Compulsive Disorder: a Cross-Sectional Study. *Indian Journal of Psychological Medicine*, Vol. 44, No. 1, pp.30-36(2022)
- [28] 宮脇郁子, 神谷和世, 久次米健市, 中西泰弘, 鈴木志津枝, 吉田正樹, 野崎香野, 矢本美子, 松本比佐江, 津田紀子, 渡辺和子上羽康之 : 運動時の循環動態と自律神経応答に関する研究(その2) - 山登りにおける鍛錬者と非鍛錬者との比較 -. *神戸大学医療技術短期大学部紀要*, Vol. 6, pp.69-76(1990)
- [29] 平松将, 柳原大樹, 馬場勇太, 伊賀崎伴彦: 作業課題中の精神作業負荷と心拍変動に関する基礎的研究. 2019年度電気・情報関係学会九州支部連合大会

補足資料

結果

Pattern 1 確率推論

63

✓ LF/HF

エビデンスの入力
正常作業域内の作業数=多い

正常作業域内の作業数

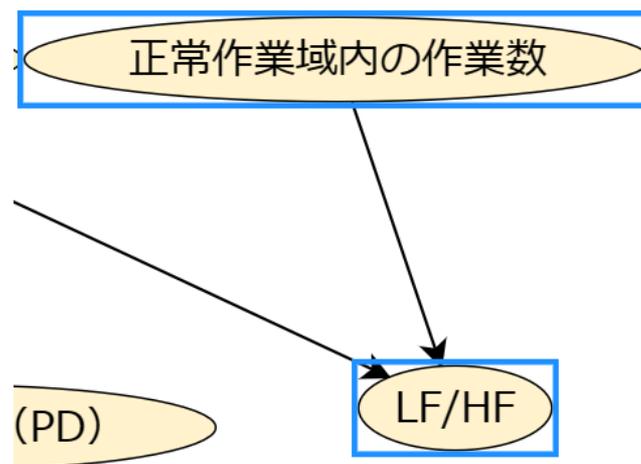
 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
少ない	0.235	0
多い	0.353	1
中くらい	0.412	0

LF/HF

 ソフトエビデンス

状態名	事前確率	事後確率
小さい	0.441	0.482
大きい	0.257	0.238
中くらい	0.302	0.28



正常作業域内の作業数が多いならば、
 正常作業域外の作業数が少ない

「LF/HF = 小さい」の確率の上昇は
 負担の小さな状態を表している

NASA-TLXの下位尺度

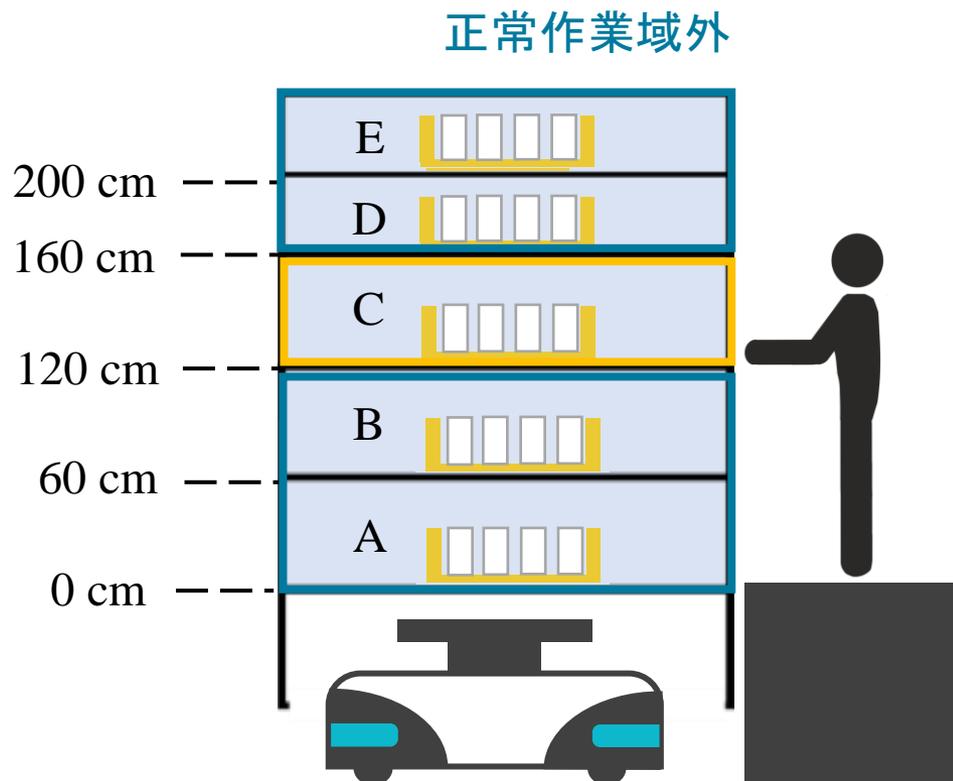
表15. NASA-TLXの下位尺度の説明^[17]

項目	端点	説明(略)
知的・知覚的要求(MD)	低い／高い	どの程度、精神的かつ知覚的活動が要求されたか？ (ex. 思考, 計算, 記憶, 検索)
身体的要求(PD)	低い／高い	どの程度、身体的活動が必要でしたか？ゆっくりして いましたか、それともきびきびしていましたか？
タイムプレッシャー(TD)	低い／高い	作業や要素作業の頻度や速さにどの程度、時間的圧 迫感を感じましたか？作業ペースはゆっくりしていて 暇でしたか、それとも急速でたいへんでしたか。
作業成績(OP)	良い／悪い	実験者によって設定された作業の達成目標の遂行に ついてどの程度成功したと思いますか？
努力(EF)	低い／高い	あなたの作業達成レベルに到達するのにどのくらい一 所懸命(精神的および身体的に)作業を行わなければ なりませんでしたか？
フラストレーション(FR)	低い／高い	作業中、どのくらい不安, 落胆, いらいら, ストレス, 不 快感, あるいは安心, 喜び, 満足, リラックス, 自己満 足を感じましたか？

正常作業域とは

✓ 正常作業域

肘を 90° に曲げて脇を締め、上腕を伸ばす姿勢から肘を支点として動かせる範囲



実験 Pattern 1 ~ 4 の詳細

Patternごとにかかる負荷は異なるが...

作業動画をもとに20分で達成すべきオーダー数を50個とした

取り出し作業

棚の位置	高さ [cm]	作業数
A	0	2
B	60	9
C	120	25
D	160	12
E	200	2

Pattern 1
基準作業

仕分け作業

BOXの位置	位置	作業数
1	上段	14
2		10
3		11
4	下段	6
5		6
6		3

棚の位置	高さ [cm]	作業数
A	0	24
B	60	3
C	120	2
D	160	5
E	200	16

Pattern 2
正常作業域外
頻度が高い

BOXの位置	位置	作業数
1	上段	3
2		6
3		2
4	下段	14
5		15
6		10

実験 Pattern 1 ~ 4 の詳細

67

Pattern 3 は Pattern 1 と取り出し・仕分けパターンが同じで待ちなし

Pattern 1, 2, 4の待ち（オーダー数 50まで）

待ち	供給	入れ替え
頻度の合計	9	4
時間の合計	214	47
平均待ち時間	23.78	11.75

※ 各パターンの負荷により、待ち時間が多少短くなることはあるが、その影響は小さいと見なす

取り出し作業

仕分け作業

Pattern 4
複数オーダーの
処理

棚の位置	高さ [cm]	作業数
A	0	2
B	60	16
C	120	18
D	160	10
E	200	4

BOXの位置	位置	作業数
1	上段	26
2		23
3		21
4	下段	12
5		8
6		12

仕分け [箇所]	作業数
1	20
2	13
3	13
4	3
5	1

実験の指示出しプログラム〈Excel VBAで実装〉

68

表16. 動画をもとに作成したピッキング表

オーダー番号	取り出し		仕分けするボックスの番号と個数						オーダー間	POD待ち種類	POD待ち時間[s]
	棚の位置	個数	1	2	3	4	5	6			
1	C	2	1	0	1	0	0	0	0~1		0
2	B	4	1	1	2	0	0	0	1~2		0
3	C	1	0	0	0	0	0	1	2~3		0
4	B	3	1	0	0	0	1	1	3~4	入れ替え	7

POD

E
D
C
B
A

取り出す棚の位置	個数	POD到着まで
B	2	00:00:00

仕分けするボックスの番号と個数

1	2	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

実験終了まで 00:19:47 中断する 次のオーダーへ 完了 目標 2 15

図18. モニターに映し出すExcel VBAのGUI画面

謝辞

69

提供していただきました, BayoLinkSによって,
本研究の分析を円滑に進めることができました.
株式会社 NTTデータ数理システム様に
心より感謝申し上げます.

本研究にご協力いただいた S B S 東芝ロジスティクス
株式会社の皆様に深く感謝申し上げます.