

高齢者と若者の身体的特性の違いを考慮したオーダーピッキング作業者の負担要因の推定

## Estimation of the Burden Factors of Order Pickers Considering Differences in Physical Characteristics Between Older and Younger Workers

小野 百合香<sup>†</sup> 石垣 綾<sup>†</sup> 斎藤 文<sup>‡</sup>  
Yurika Ono Aya Ishigaki Aya Saito

### 1. はじめに

近年、物流倉庫における作業者の人手不足が問題となっている。これに伴い、多くの物流企業が高齢者や熟練社員の再雇用を掲げており、高齢者の身体的特性を考慮した労働環境を実現する動きが高まっている[1]。

物流倉庫内作業の中でも、特にオーダーピッキング作業は、顧客の注文品を保管棚から取り出す作業であり、最も時間と労力を要するとされている[2]。そのため、近年、作業者のいるワークステーション (WS) まで注文品が入った保管棚を運ぶ棚搬送ロボット (AGV) の導入が進んでいる。AGV の導入により、従来のオーダーピッキング作業の大半を占めていた作業者の保管棚までの「移動」が削減された [2]。しかし、AGV を導入した企業にヒヤリング調査を行ったところ、「移動」の削減と引き換えに、作業者による荷物の上げ下げ、しゃがみを伴う動作が増加していることが判明した。特にしゃがむ動作は、身体的ストレスの発生に繋がり、高齢者においては転倒リスクを高める危険性がある[3]。さらに、AGV の移動回数を削減するために、1 つの棚から複数の商品を同時にピッキングして、顧客のオーダーごとのボックスにその商品を仕分けする方法が取られている。こうした複雑なタスクは、認知機能が低下している高齢者にとって、心理的ストレスになりかねない。

一般的に、作業者の負担度評価として、主観的負担度評価法と客観的負担度評価法が存在する。主観的負担度評価法は、アンケートを用いて、身体的要求、精神的要求などの下位尺度を評価し、総合評価値である主観的負担度を求める。この手法は、下位尺度の評価値から作業者の負担要因を抽出できるが、リアルタイムで負担度を評価できないという欠点が存在する。客観的負担度評価法は、作業中に収集した生体情報をもとに負担度を評価できるが、作業者の負担要因、すなわち負担度を構成しているストレスの種類は明らかにできない。このように、主観的負担度評価法と客観的負担度評価法はお互いの弱点を補い合える関係にあるため、客観的負担度指標を用いて主観的負担度を構成する下位尺度の大きさと主観的負担度を推定する。

従って、本研究の目的は、棚搬送ロボットが導入されたオーダーピッキング作業において、高齢者疑似体験装置 (ASS : Age simulation suits) を着用した場合としない場合の実験を行い、高齢者と若者の負担感の違いや負担要因を推定できる客観的負担指標を明らかにすることである。

### 2. 文献調査

ASS を着用した被験者に特定のタスクを与え、作業負荷を評価した研究はいくつか報告されている。

Zijlstra et al. [4]は、経路の複雑さと老化が道案内に及ぼす影響を調べるため、若者に ASS を着用させた場合とさせていない場合で病院内の道案内実験を行い、心拍数、呼吸数、ルート効率、歩行速度で作業負荷を評価した。その結果、ASS を着用した場合はしていない場合と比べて、心拍数と呼吸数が高く、歩行速度が著しく遅くなることが判明した。

Vieweg et al. [5]は、ASS を若者に着用させた場合とさせていない場合で、数字符号置換検査を行わせて情報処理速度を測り、知覚された身体状態や気分に関するアンケートを取った。その結果、ASS を着用した場合はしていない場合に比べて、情報処理速度が顕著に低下し、知覚された身体状態と気分も低下することがわかった。

これらの既存研究は、ASS を着用した場合としない場合で特定のタスクを実施し、高齢者の身体機能や認知機能の低下が作業負荷にどの程度影響するかを調査している。しかし、本研究のように、オーダーピッキング作業の負荷を高齢者と若者で比較した事例はない。さらに、本研究は、現場の作業設計の改善に貢献するため、負担要因、生体情報、負担の原因となる作業要素間の因果関係を明らかにし、因果関係の強さを定量的に評価する。

### 3. 実験と分析

#### 3.1 実験設計

本研究は、SBS 東芝ロジスティクス株式会社の事例をもとに、棚搬送ロボットが導入された物流倉庫におけるオーダーピッキング作業を再現する。高齢者の身体機能と認知機能の低下により、若者と比べて負担度が大きくなりそうな作業要素を取り入れた 3 つのピッキング表 (Pattern A, B, C) を作成した。Pattern A は、基準となる作業で、正常作業域内の作業数が多い。正常作業域とは、肘を 90 度に曲げて脇を締め、上腕を伸ばす姿勢から肘を支点として動かせる範囲であり、作業者に負担がかからない作業領域である。Pattern B は、高齢者の身体機能の低下が負担度に影響するかどうかを見るため、正常作業域外の作業数が多い設計である。Pattern A, B が 1 つの棚の指定された段から 1 個の商品の取り出しと仕分けを指示するのに対し、Pattern C には、複数の商品の取り出しと複数箇所への仕分けに関する指示がある。Pattern C では、高齢者の認知機能の低下が負担度に影響するかどうかを検証する。また、Pattern A, B, C を現場の作業に合わせるため、3 回のピッキングごとに棚搬送の待ちが平均 18.3 秒生じる設定にした。

実験には、1 名の被験者 (身長 164 cm, 標準体型の健康な 20 代女性) が参加した。Pattern A, B, C に基づいた作業は各 10 分間である。また、各作業の前に座位姿勢での安

<sup>†</sup> 東京理科大学 創域理工学部 経営システム工学科 Department of Industrial and Systems Engineering, Tokyo University of Science, Chiba, Japan

<sup>‡</sup> 東京都立大学 デザイン・データ科学部 Department of Faculty of Design and Data Science, Tokyo City University, Kanagawa, Japan

静状態の測定も各 10 分間行った。実験日数は 5 日間、安静状態 & Pattern A→安静状態 & Pattern B→安静状態 & Pattern C の順番で測定を各日 ASS の着用あり・なしで計 2 回行った。各 Pattern の作業を終了するごとに 5 分間安静にし、NASA-TLX のアンケートに回答した。

本実験は、株式会社ヤガミ製の高齢者疑似体験セットのうち、手首のおもり (各 500 g)、足首のおもり (各 1000 g)、関節の動きを制限する肘サポーターと膝サポーターを着用した。また、株式会社鈴盛商会の視覚障害体験グラス (白濁シート) で中程度の老人性白内障を再現した。

### 3.2 実験環境

本実験は、図 1 のワークステーション (WS) を再現した。保管棚の各段 (ロケ) の高さは、現場で最も使用されている棚の設計に合わせた。ロケの地面からの高さは、0 cm, 60 cm, 120 cm, 160 cm, 200 cm であり、それぞれロケを A, B, C, D, E とする。棚のロケには、ダミー商品 (146 g/個) が 30 個前後入った段ボールを格納した。また、被験者の身長から、正常作業域内のロケは B と C とした。

ラダーは、2 段 (各段 30 cm) のキャスター付きであり、ロケ E から商品を取り出す際に使用した。ロケ D からのピッキングは、現場の作業設計に合わせるため、ラダーを使用せず、背伸びして段ボールごと運び、図 1 の手前にある高さ 70 cm の作業台に置いてから商品を取り出した。

仕分け用の間口は、6 つ設置した。間口が設置された高さは、上段 (1~3) が 70 cm、下段 (4~6) が 7 cm である。正常作業域内の間口は上段の 1~3 とした。ロケとダミー商品にはバーコードを貼り、スキャンできるようにした。

気温 20℃、照度は現場に合わせ、80 Lux とした。また、現場で録音した作業音を流しながら行った。

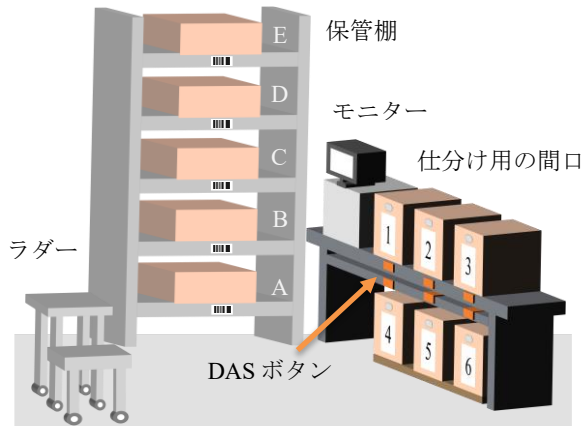


図 1 WS を再現した実験環境

### 3.3 実験内容

本実験では、次の手順を繰り返して行った。

- (1) モニターのピッキング指示に従い、指定された保管棚のロケをスキャンする。
- (2) そのロケから指定された個数分の商品を取り出し、商品に付いているバーコードをスキャンする。
- (3) 指定された仕分け用の間口に商品を投入し、間口に最も近い DAS ボタンを押す。

ピッキング指示は、Excel VBA を用いて実装した GUI 上に表示される。また各実験終了後、ピッキング表から 4 つの作業要素のデータ (正常作業域内の作業数、正常作業域外の作業数、待ち時間、複数の商品の取り出し・複数箇所への仕分けを行ったオーダーの回数) を取得した。

### 3.4 主観的負担度評価法

Rubio[6]は、3 つの主観的負担度評価法 (NASA-TLX, SWAT, Workload Profile) を比較して、あるタスクにおける特定の個人のパフォーマンスを予測することが目的であれば、NASA-TLX を推奨している。そこで、本研究は、NASA-TLX を主観的負担度評価法として使用する。

NASA-TLX には、6 つの下位尺度が存在する[7]。

- MD: 「知的・知覚的要求」 (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?
- PD: 「身体的要求」 (低い/高い)  
どの程度、身体的活動が必要だったか? ゆっくりしていたか、それともきびきびしていたか?
- TD: 「タイムプレッシャー」 (低い/高い)  
どの程度、作業、要素作業の頻度、速さに時間的圧迫感を感じたか?
- OP: 「作業成績」 (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うか?
- EF: 「努力」 (低い/高い)  
作業達成レベルに到達するのにどのくらい一所懸命 (身体的及び精神的に) 作業を行う必要があったか?
- FR: 「フラストレーション」 (低い/高い)  
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、自己満足をどの程度感じたか?

これらの下位尺度について、「低い-高い」または「良い-悪い」を端点として、0~100 の評価値  $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) を刻み幅 5 のビジュアルアナログスケールでつける。

さらに、6 つの下位尺度の 15 対の組合せに対して、どちらの項目がより作業負荷への寄与が高いと思うか、被験者に選択させ、各下位尺度の選択回数を重み付け係数  $w_i$  とする。最後に、NASA-TLX の総合評価値の中でも一般的な指標である加重平均ワークロードスコア (WWL) を式 (1) により算出する。本研究では、下位尺度の評価値  $v_i$  と WWL を主観的負担度評価の結果として扱う[7]。

$$WWL = \sum_{i=1}^6 \frac{(v_i \times w_i)}{\sum_{j=1}^6 w_j} \quad (1)$$

### 3.5 客観的負担度評価法

本研究は、心電図の R 波同士の間隔である RRI データを取得する。安静時と作業中の測定には、Polar 社製の Polar H10 を使用した。Polar H10 は、チェストストラップで被験者の胸部の下に装着する形式の心拍計である。Polar H10 は、Bluetooth で Android 11 対応タブレットに接続し、Polar Sensor Logger というアプリと連携させてデータを取得した。分析対象は、作業中と安静時の 10 分間の RRI データである。なお、測定開始直後と終了直前は作業を行っていないため、開始直後と終了直前の 20 個のデータは抜いた。

Lee et al. [8]は、時間領域指標である Mean NNI (RRI の平均), SDNN (RRI の標準偏差), SDDSD (隣り合った RRI の差の標準偏差), pNNI50 (隣り合った RRI の差が 50 ms を超える比率) を用いて、短時間の激しい運動によるストレスを測定している. Schneider et al. [9]は、周波数領域指標として、LF (パワースペクトル解析の 0.04 Hz~0.15 Hz までの低周波成分), HF (パワースペクトル解析の 0.15 Hz~0.4 Hz までの高周波成分), LF/HF (LF と HF の比) を用いて、救急医の作業負荷を評価している. Lo[10]は、ポアンカレプロット (LP) から得られる時間領域指標として SD1 (LP の楕円の短軸方向の標準偏差), SD2 (LP の楕円の長軸方向の標準偏差), SD2/SD1 (SD1 と SD2 の比) を用いて、禅瞑想の効果を検証している. ポアンカレプロット (LP: Lorenz Plot) とは、k 番目と k+1 番目の RRI データすなわち、 $(RRI_k, RRI_{k+1})$  をプロットした図である.

本研究ではこの代表的な心拍変動指標を Python の hrv-analysis というライブラリを用いて算出した.

### 3.6 ベイジアンネットワーク

本研究は、ベイジアンネットワークを用いて、作業要素と心拍変動指標、NASA-TLX の因果関係を明らかにする. ベイジアンネットワークとは、変数間の因果関係を有効非巡回グラフで表す確率モデルである. 変数間の定量的な依存関係は条件付確率表によって定義される[11-12].

確率推論は、モデルを解釈し、妥当性を確認するために行われる. 確率推論は、観測された変数の値  $e$  を事実 (エビデンス) として入力し、確率伝播法により、知りたい確率変数の事後確率  $P(X|e)$  を求める[11-12]. さらに、各指標間の相互依存度合をみるために式 (2) で定義される確率変数  $X$  と  $Y$  の相互情報量を求める[13].

$$I(X; Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} P(x, y) \log \left( \frac{P(x, y)}{P(x)P(y)} \right) \quad (2)$$

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 相関分析の結果

本研究は、各心拍指標が安静時に比べて実験時にどの程度変化したかを式 (3) で定義した安静比増減率で表す.

$$(\text{安静比増減率}) = \frac{(\text{実験値}) - (\text{安静時の値})}{(\text{安静時の値})} \times 100[\%] \quad (3)$$

モデルは事前知識から得られる既知の依存関係を指定することで性能を高めることができる[11]. Critchley and Garfinkel [14]は、感情が体内の生理的变化から生じることを示唆している. この知見をもとに、作業要素→心拍変動指標の安静比増減率→NASA-TLX という因果関係の仮説を立て、相関分析により指標間の関係の強さを確認する.

作業要素と心拍指標の安静比増減率との相関に対して、 $t$  検定により有意性を判定する. なお、Benjamini-Hochberg 法[15]による多重比較検定補正を行った. 既存研究[8-10]と比べて心拍指標の変化が妥当で有意な相関が見られた組み合わせは、正常作業域外の作業数と Mean NNI ( $r = -0.81, p < 0.01$ ), SDDSD ( $r = -0.44, p < 0.05$ ) であった. 本実験は、高齢者の認知機能の低下が負担度に及ぼす影響を見るため、Pattern C を行ったが、複数オーダーの処理回数に対して有意な変化を持つ心拍指標はなかった.

同様に、心拍指標の安静比増減率と NASA-TLX において、既存研究と比べて妥当で有意な相関が見られた組み合わせは Mean NNI と MD ( $r = -0.38$ ), PD ( $r = -0.64$ ), TD ( $r = -0.53$ ), OP ( $r = -0.68$ ), EF ( $r = -0.60$ ), FR ( $r = -0.55$ ), WWL ( $r = -0.57$ ) で、MD は、 $p < 0.05$ , 他の下位尺度と WWL は、 $p < 0.01$  であった.

### 4.2 モデルの構築

ベイジアンネットワークの構築では、4.1 節において、 $p < 0.01$  で高度に有意だった指標の組み合わせに因果関係があると仮定する. また、既存研究[4-5]より ASS の着用が生体情報や主観的負担度に影響を及ぼすと考えられる. そこで ASS の着用と Mean NNI においても因果関係があると仮定した. ベイジアンネットワークは、離散値のみを扱えるため、Zuo and Kita[12]をもとにウォード法による離散化を行った. さらに Mojena[16]が提案した Upper Tail 法を用いて、クラス数数を決定した. その結果、正常作業域外の作業数の区分は 3 つ (多い・中くらい・少ない), ASS の着用の区分は 2 つ (あり・なし), Mean NNI の区分は 3 つ (非常に小さい・小さい・やや小さい), PD と WWL の区分は 4 つ (非常に高い, やや高い, 中くらい, 低い), TD, EF, FR の区分は 3 つ (高い・中くらい・低い), OP の区分は 3 つ (悪い, 中くらい, 良い) に分類された.

本研究は、NTT データ数理システム社製の BayoLinkS (Ver 9.1.1) を用いて、欠損値がない全 30 行のデータは、24 行を学習データに、6 行を検証データに分割した. グラフ構造を全て探索することは計算量の観点から困難であるため、Greedy 探索により、学習データからモデルを構築した[11]. また、モデル構築の評価基準として赤池情報量基準 (AIC) を採用した.

### 4.3 モデルの解釈と妥当性の確認

モデルの構築結果を図 2 に記す. モデルを解釈し、妥当性を確認するため、次のエビデンスを与えて、Loopy BP を用いた確率推論を行った: (i) ASS の着用「あり」(ii) ASS の着用「なし」(iii)正常作業域外の作業数「多い」.

エビデンス(i)と(ii)で確率推論を行った結果の一部を図 3 に記す. 図 3 から、ASS の着用「あり」の場合は「なし」の場合よりも、NASA-TLX の下位尺度や WWL の評価値  $x$  が「高い」または「悪い」という状態をとる確率が高いことがわかる. また、Mean NNI の安静比増減率  $h[\%]$  が「非常に小さい」という状態を取る確率が高かった. さらに、エビデンス(iii)、すなわち正常作業域外の作業数が「多い」場合においても、NASA-TLX の下位尺度や WWL が大きくなり、Mean NNI の安静比増減率が小さくなった.

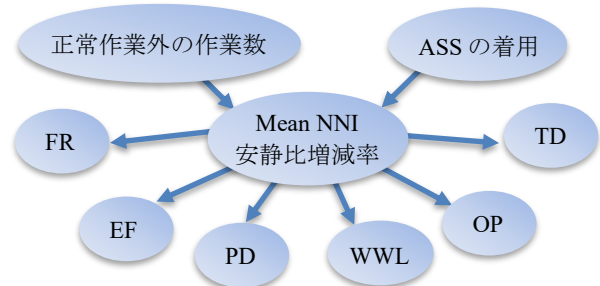


図 2 ベイジアンネットワークモデル

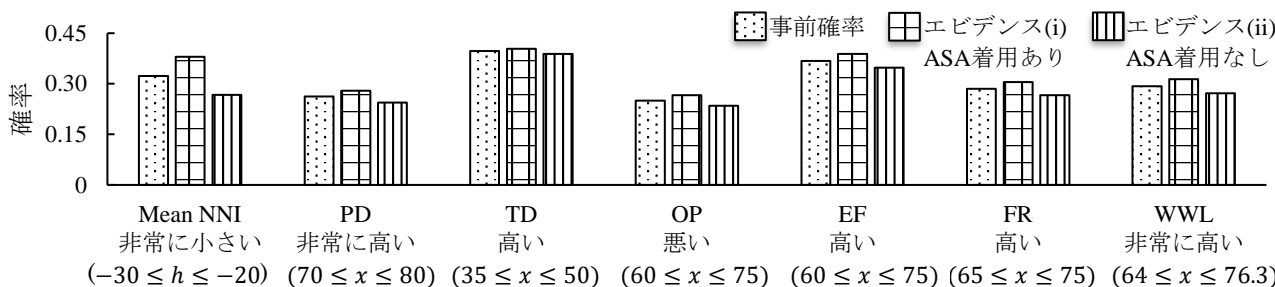


図3 エビデンス(i)(ii)における確率推論の結果

既存研究[8]では、身体的負荷が大きい運動後は安静時より、正常洞調律 (NNI) が短くなると報告されている。従って、Mean NNI と NASA-TLX の各指標の変化は妥当であり、正常作業域外の作業数が多い場合や ASS の着用時は、生理学的にも主観的にも負担度が大きくなることがわかった。

Mean NNI が主観的負担度 (WWL) や負担要因 (NASA-TLX の下位尺度) の状態を推定するのに有効な指標であることはわかったが、どの NASA-TLX の指標との関係が強いかわかるまでは明らかにできていない。そこで、Mean NNI と NASA-TLX の各指標との相互情報量を表 1 のように求めた。

表2 Mean NNI の NASA-TLX との相互情報量

PD	TD	OP	EF	FR	WWL
0.168	0.115	0.192	0.162	0.128	0.21

表 1 から、Mean NNI との相互情報量が大きい指標として、WWL, OP, PD が挙げられる。このことから、ASS の着用や正常作業域外の作業数の増加により引き起こされた Mean NNI の変化は、負担要因の中では、作業成績の悪さや身体的要求の高さと因果関係が強いことがわかった。

### 5. おわりに

本研究では、ベイジアンネットワークを用いて、心拍指標の Mean NNI から作業中である模擬高齢者と若者の負担状態を推定できた。また、正常作業域外の作業数が多い場合は作業者の負担度が増加することがわかった。この知見から、現場では、出荷頻度の高い商品を正常作業域内に保管することで作業者の負担度を軽減できると考えられる。

今後の課題は、2つある。1つ目として、本研究は、被験者が 1 名のみ、実験回数も 5 回と少なかつたため、より多くの被験者と回数で実験を行いたい。2つ目は、身長異なる、すなわち正常作業域が異なる作業者を WS に配置し、ロボットに作業者の正常作業域内における作業がある棚を運搬するように学習させたシミュレーションを行いたい。これにより、多様な人材が十分に能力を発揮できる労働環境を実現し、生産性の向上や負担度の軽減に貢献したい。

#### 謝辞

本研究の一部は挑戦的研究 (萌芽) 23K17574 の助成を受けたもので、感謝の意を表す。また、本研究にご協力いただいた SBS 東芝ロジスティクス株式会社の皆様に心から謝意を表す。

#### 参考文献

[1] 一般社団法人日本倉庫協会, “倉庫業 高齢者の活躍に向けたガイドライン ~シニア人材の強みを生かす~ (令和 5 年)”,

高齢・障害・求職者雇用支援機構,

<https://www.jeed.go.jp/elderly/enterprise/guideline/ledngs0000005606-att/ledngs000000561t.pdf>, (参照 2024-05-19)

[2] Kumar, S., Sheu J. B., Kundu, T., “Planning a parts-to-picker order picking system with consideration of the impact of perceived workload”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 173 (2023).

[3] Hernandez, M. E., Goldberg, A., Alexander, N. B., “Decreased Muscle Strength Relates to Self-Reported Stooping, Crouching, or Kneeling Difficulty in Older Adults”, *Physical Therapy*, Vol. 90, No. 1, pp. 67-74 (2010).

[4] Zijlstra, E., Hagedoorn, M., Krijnen, W., P., van der Schans, C. P., Mobach, M. P., “Route complexity and simulated physical ageing negatively influence wayfinding”, *Applied Ergonomics*, Vol. 56, pp. 62-67 (2016).

[5] Vieweg, J., Schaefer, S., “How an Age Simulation Suit affects Motor and Cognitive Performance and Self-perception in Younger Adults”, *Experimental Aging Research*, Vol. 46, No. 4, pp.273-290 (2020).

[6] Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., Puente, J.M., “Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods”, *Journal of Applied Psychology*, Vol. 53, No. 1, pp. 61-86 (2004).

[7] Miyake, S., Kumashiro, M., “Subjective mental workload assessment technique - An introduction to NASA-TLX and SWAT and proposal of simple scoring methods-”, *Japanese Journal of Ergonomics*, Vol. 29, No. 6, pp. 399-408 (1993).

[8] Lee, S.-G., Song, Y. D., Lee, E. C., “Experimental Verification of the Possibility of Reducing Photoplethysmography Measurement Time for Stress Index Calculation”, *Sensor*, Vol. 23, No. 12, (2023).

[9] Schneider, F., Martin, J., Hapfelmeier, A., Jordan, D., Schneider, G., Schulz, C. M., “The validity of linear and non-linear heart rate metrics as workload indicators of emergency physicians”, *PLoS ONE*, Vol. 12, No. 11 (2017).

[10] Lo, P.-C., Tsai, P.-H., Kang, H.-J., Miao Tian, W. J., “Cardiorespiratory and autonomic-nervous-system functioning of drug abusers treated by Zen meditation”, *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, Vol. 9, No. 3, pp. 215-220, (2019).

[11] Motomura, Y., “Daily life behavior modeling from large scale data -Statistical learning and probabilistic reasoning of Bayesian networks through real services-”, *Synthesiology*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-11, (2009).

[12] Zuo, Y., Kita, E., “Stock price forecast using Bayesian network”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 8, pp. 6729-6737, (2012).

[13] Jiang, M., Lu, J., Yang, Z., Li, J., “Risk analysis of maritime accidents along the main route of the Maritime Silk Road: a Bayesian network approach”, *Maritime Policy & Management*, Vol. 47, pp. 815-832, (2020).

[14] Critchley, H. D., Garfinkel, S. N., “Interoception and emotion”, *Current Opinion in Psychology*, Vol. 17, pp. 7-14, (2017).

[15] Benjamini, Y., Hochberg, Y., “Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing”, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, Vol. 57, No. 1, pp. 289-300, (1995).

[16] Mojena, R., “Hierarchical grouping methods and stopping rules: an evaluation”, *The Computer Journal*, Vol. 20, No. 20, pp. 359-363, (1977).