

〔経常研究A〕

ヒューマンセンタードesignにおける時系列分析手法の検討

森 亮太

1 目的

ヒトを対象とした評価において、多くの被験者からのデータ取得は容易ではなく、効率的かつ効果的な分析方法が求められている。特に、作業計画や製品開発の初期段階では少数の被験者のデータをもとに、新しい作業動作や試作のデザインの効果を確認する必要があるため、被験者に対して介入を行い、その有効性を検証する実験手法の適用が妥当であると考えられる。このような場合、単一事例実験法が有効であり、介入の有無に基づくデータを取得し、その結果を比較することで効果を判断する。介入の効果を正確に評価するためには中断時系列分析¹⁾が適用される。しかしながら、ヒューマンセンタードesignにおける時系列データの効果的な分析モデルは明確ではない。そこで、本研究では、中断時系列分析に着目し、デザインの影響を統計的に検証する手法の有用性について検討した。

2 方法

本研究では、重量物の持ち上げ動作における作業台の適切な高さの検討を例として、2つの異なる動作時の時系列データを対象として分析した。重量物の位置がヒトの重心動揺（前後方向の Center Of Pressure：以下、COP）や力学的負荷（関節トルク）に与える影響を中断時系列分析によって明らかにするため、1番目は荷物を腰高さから持ち上げる動作であり、2番目は荷物を床から持ち上げる動作とした。その際の被験者の時系列データから作業台高さ変更の影響を明らかにする。その変更を中断時系列分析における「介入」として捉え、外生変数または外因性成分として扱った。

統計解析では、時間を独立変数とし、介入の有無をダミー変数として回帰分析を行った。その際、Pythonで実装された、最小二乗法（Ordinary Least Squares regression：以下、OLS）、一般化最小二乗法（Generalized Least Squares regression：以下、GLS）、およびボックスジェンキンス法を用いた回帰モデル（Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average with exogenous variables：以下、SARIMAX）をCOPデータに適用し動作間の違いを明らかにする。また、因子得点化した関節トルクデータでも、同様のモデルを適用し介入が与える影響を評価した。

重心動揺の時系列データとしてフォースプレートを用いてCOPを測定し、関節トルクはXsensによるモーションキャプチャーデータから、DhaibaWorks²⁾を用いてデジタルヒューマンを生成し、その人体モデルの逆動力学演算を行い算出した。

3 結果と考察

COPデータに対して、まずその定常性を確認するために拡張ディッキー・フラー（ADF）検定を行った。その結果、すべての時系列データが有意な水準で定常であることが確認された。次に、介入前後のデータに対して、外生変数として作業台の高さの変更を導入し、SARIMAXモデルによる回帰分析を実施した。分析の結果、介入前後のCOPに対する変動が統計的に有意であることが示された。具体的には、外生変数に関連付けられた係数に対して有意差が認められ（ $p < 0.05$ ）、作業台の高さ変更によるCOPの変動は偶然ではなく、介入による影響であると結論づけられた。また、残差の自己相関についても、ほぼ解消されたことから、モデルの適合度は十分に高いものと判断された。

これにより、作業台の高さを変更することで、被験者の重心動揺に明確な変化が生じることが確認された。特に、腰高さでの作業においては、床からの持ち上げに比べてCOPの変動が小さいことが示

された。この結果は、作業台の高さがヒトのバランス保持に及ぼす影響を定量的に評価する上で、重要な知見を提供するものである。

動的因子分析を用いて、20種類の関節トルクの時系列データから3つの潜在因子を抽出した。第1因子は、全体的なトルクの傾向を表すものであり、第2因子および第3因子は、特定の動作時におけるトルクの急激な変動や特異なパターンを示すものであった。

関節トルクデータにおける第1因子に対して、中断時系列分析を適用した。まず、因子得点が非定常であることが確認されたため、1階差分を取ることで定常化を図った。その後、外生変数として作業台の高さ変更を導入し、SARIMAXモデルによる分析を行った。COPの結果と同様に、外生変数に関連付けられた係数は有意であった ($p < 0.05$)。しかし、残差に自己相関が見られたため、介入の影響があると断定できない結果となった。

COPと関節トルクの第1因子得点の時系列データにOLS回帰モデルとGLS回帰モデルを用いた分析を適用し、各モデルの統計的有意性や残差について詳細な分析を行った。その結果、OLSとGLSによる影響の有無は示されなかったが、外生変数の係数を推定してその影響を視覚的に把握することは可能であった(図)。

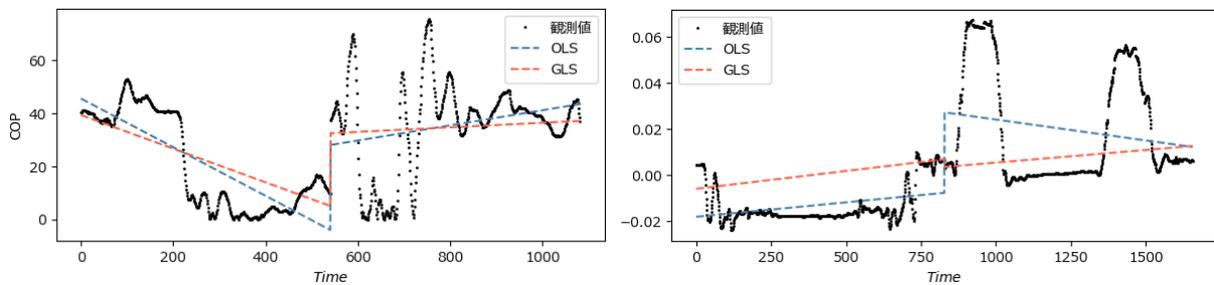


図 OLS と GLS の結果 (左が COP、右が関節トルクの因子得点)

COPにおいては、SARIMAXモデルによって作業台高さの影響が明らかにされた。SARIMAXモデルの残差を分析した結果、COPデータに対しては、ホワイトノイズと同じようにランダムであることが示唆され、残差の自己相関は見られなかった。このことから、SARIMAXモデルは、系列依存性や季節性などの要因を考慮しながら外生変数の影響をモデル化することができる点で優れているといえる。各モデルの適合度、係数の解釈、残差の性質に検討の余地はあるが、外生変数の影響を把握した。

4 結論

本報告では、ヒューマンセンタードデザインにおける時系列分析手法として、中断時系列分析の有用性を示した。特に、SARIMAXモデルを用いることで、少数の被験者から得られるデータでも統計的に有意な結果を得ることができ、デザイン評価や改善において効果的な手法としての可能性が示唆された。今後の研究では、他のデータへの応用やさらなる手法の改良を通じて、ヒューマンセンタードデザインの評価手法の進化に貢献していくことを目指す。

参考文献

- 1) Bernal, J.L., Cummins, S., and Gasparrini, A., Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: a tutorial. International journal of epidemiology, Vol. 46, No. 1, pp.348-355, 2017
- 2) <https://www.dhaibaworks.com/>

(問合せ先 森 亮太)