

遅延を伴う移動ロボット遠隔操作時における 血圧脈波によるストレス評価

Quantitative stress assessment by blood pressure pulse wave obtained in tele-operating a mobile robot with delay

岡島 康二 (中央大) 学 端 智士 (中央大)
正 堀 正峻 (中央大) ○正 土肥 徹次 (中央大)
正 池 勇勲 (中央大) 正 梅田 和昇 (中央大)

Koji OKAJIMA, Chuo University, okajima@msl.mech.chuo-u.ac.jp
Satoshi HATA, Chuo University
Masataka HORI, Chuo University
Tetsuji DOHI, Chuo University
Yonghoon JI, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University

This paper reports on quantitative assessment of human stress in tele-operating a mobile robot. In operating the mobile robot remotely, the operator acquired vision from a camera on the mobile robot, and blood pressure pulse wave was measured during operation constantly. LF/HF, which is one of the indexes for quantitative stress assessment, was used for this research. In calculating LF/HF, Fourier transformed graph of PPI (peak-to-peak interval) is needed. PPI graph is acquired by plotting the period of each two peaks of blood pressure pulse wave. Stress assessment was conducted in 3 situations, sitting position, tele-operation of the mobile robot without delay, and tele-operation of the mobile robot with delay. In comparison to sitting position, LF/HF increased by 114% on average in tele-operation without delay, and 303% on average in tele-operation with delay. Therefore, we could assess stress quantitatively in operating a mobile robot remotely using blood pressure pulse wave.

Key Words: MEMS, Tele-operation, Blood pressure pulse wave, Stress assessment, Mobile robot

1. 研究背景と目的

近年、通信技術の発達に伴い、ロボットと操作者が遠隔地に存在した状態で情報の送受信を行う場面が増加している。医療分野では遠隔で精密な動きが要求される外科手術、観光分野では人混みや障害物の中で行われる案内作業などが挙げられる[1][2]。これらには共通して繊細な作業が求められ、また、作業が長時間に渡るといった特徴がある。遠隔地のロボットを操作するにあたり、操作する現場で直接作業するわけではないため、通常の作業とは異なるストレス負荷が生じると報告されている[3]。操作中のストレスが生じる一因として操作中の遅延が挙げられ、コマンドごとに発生する遅延はわずかであるものの、長時間の操作により操作者へストレスが負荷されてしまう。そのため、ロボットアームの遠隔操作時には、操作者へストレスが負荷されてしまうことが報告されている[4]。このような状況のため、ロボット遠隔操作時におけるストレスの定量的な評価が求められているが、負荷されたストレスの定量化は行われていない。

一方、ストレスを定量評価する手法の1つとして、唾液中の α アミラーゼ濃度測定が挙げられる[5]。この手法は現在広く用いられており、市販の測定器も多く販売されているが、一回の測定に約1分かかり、連続的な計測を行うことができないという問題がある。これに対し、光電式により取得された脈波波形を周波数解析することにより得られるLF/HF値は、用いる脈波の区間を一定時間ずらすことにより、連続的なストレス評価が可能である。そのため、光電容積脈波法により得られるLF/HF値を用いてストレスを定量的に評価する試みがなされてきたが[6]、光電式容積脈波法による脈波計測では、外乱光や体動の影響により正しい計測が行われない場合があるといった問題がある[7]。

これに対して我々の研究グループでは、トノメトリ法を用いたウェアラブル血圧脈波計測デバイスの研究を行っており、

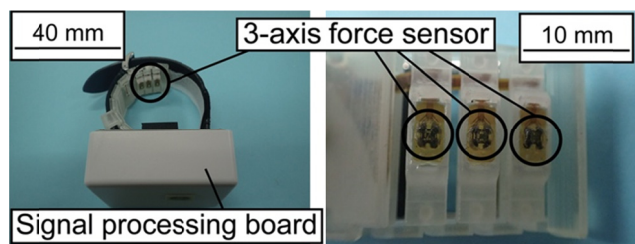


Fig. 1 Schematics of blood pressure pulse wave measurement device.

手首装着する腕時計型デバイス[8]や頭部で計測できる眼鏡型デバイスの研究[9]を研究している。本研究で使用する腕時計型のウェアラブル血圧脈波計測デバイスの写真を図1に示す。使用するデバイスは、シナノケンシ株式会社、タッチエンス株式会社と共同開発したMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いた微小な3軸力センサによって、血圧の連続的な変化である「血圧脈波」を計測することが可能なデバイスとなっている。光電容積脈波法により計測される脈波と類似した脈波を計測することができる。

そこで本研究では、トノメトリ法を用いて計測された血圧脈波から算出されるLF/HF値の有用性を確認し、血圧脈波を用いた移動ロボット遠隔操作時に負荷されるストレスの定量評価を行う。

2. 移動ロボットの遠隔操作システムの概要

2.1 構築した移動ロボットの遠隔操作システム

本研究で構築した移動ロボットの遠隔操作システムと使用デバイスを図2に、デバイスの接続関係を図3に示す。移動ロボットとして、Adept Mobile Robots社のPioneer 3-ATを使用し、ロボット制御用PCと前方確認用のカメラを搭載している。

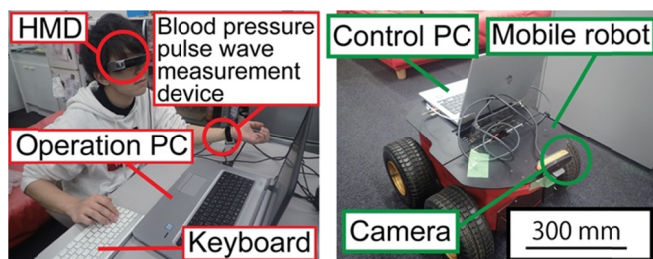


Fig. 2 Devices and setup.

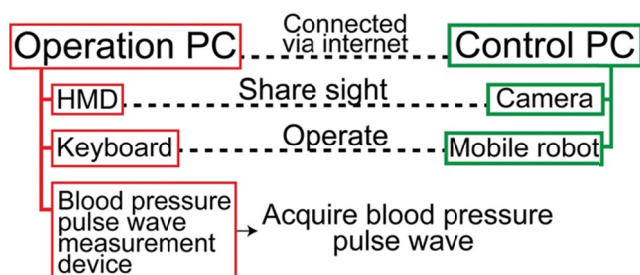


Fig. 3 Connection of each device.

これに対して操作者側は、操作用 PC によって移動ロボットの移動制御を行うことができるようになっている。この際、操作者の頭部にヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着し、移動ロボットに搭載されているカメラで取得した画像を映し出すことで、移動ロボットの状況を確認しながら操作制御できるようになっている。また、操作者の左手首には血圧脈波計測デバイスを装着し、移動ロボットを遠隔操作している際の血圧脈波をリアルタイムで計測可能となっており、計測データを操作用 PC に取り込んで記録できるシステムとなっている。

2.2 トノメトリ法と血圧脈波計測デバイスの概要

本研究では、血圧脈波の計測手法としてトノメトリ法を用いる。トノメトリ法の概要を図4に示す。トノメトリ法とは、血管直上の皮膚に力センサを押し当て、血管上部を平坦にすることで血圧を測定する手法である。力センサを押し当てるだけで血圧が計測できるため、低侵襲で連続計測が可能であるという特徴をもっている。しかし、その一方で体動によるノイズに弱く、精度が低いという問題を持っている。そこで、我々の研究グループでは、MEMS 3 軸力センサアレイを利用して、隣接したセンサ間でのデータ処理を行うことによって、体動によるノイズを低減する試みを進めている[10]。この体動ノイズ低減機能を用いることによって、ウェアラブルで負荷の低い血圧脈波計測デバイスを実現している。

本研究で使用する血圧脈波計測デバイスの概略を図1に示す。使用するデバイスは、MEMS 3 軸力センサアレイと、締付バンド、信号処理基板により構成されており、PC と USB 接続、または Bluetooth によって無線接続してデータ伝送することで、リアルタイムに血圧脈波を計測可能なデバイスとなっている。また、使用するデバイスでは、市販血圧計と比較した初期校正を行うことによって、MEMS 3 軸力センサによって計測された力を血圧値へと変換することができる[7]。ただし、本研究では後述する LH/HF 値を用いて評価を行うため、血圧値へ変換する前の 3 軸力センサの値を用いても周波数解析後の値は同じ値になるため、血圧に変換する前の力の計測データを使用する。

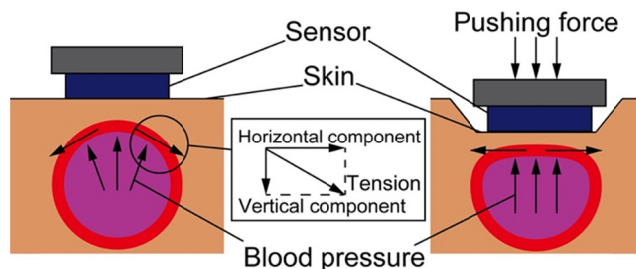


Fig. 4 Principle of the arterial tonometry method.

2.3 血圧脈波の周波数解析

本研究においてストレスの定量評価手法として用いる LH/HF 値は、血圧脈波波形を周波数解析することにより得られる。血圧脈波を用いた周波数解析の流れを図5に示す。

脈波を用いて LF/HF 値を算出する際、計測された脈波から脈波のピーク間隔(PPI)を計測し、その PPI 波形に対しフーリエ変換を行う。フーリエ変換後の波形の低周波成分 LF (0.04~0.15Hz)と高周波成分 HF (0.15~0.4Hz)の積算値の比を取り LH/HF 値とすることでストレスの指標として利用できると報告されている[11]。そこで、本研究でも同様に血圧脈波を用いて LF/HF 値を算出し、ストレス評価の指標とする。座位状態で計測された血圧脈波、PPI、フーリエ変換後の PPI のグラフを図5に示す。座位状態で算出された LH/HF 値は 0.950 となった。フーリエ変換後の PPI のグラフにおいて、複数のピークが見られることが分かる。フーリエ変換後の PPI のグラフに見られる各ピークにおける周波数と振幅が、分解された後の波形の周波数と振幅に対応するようになっている。

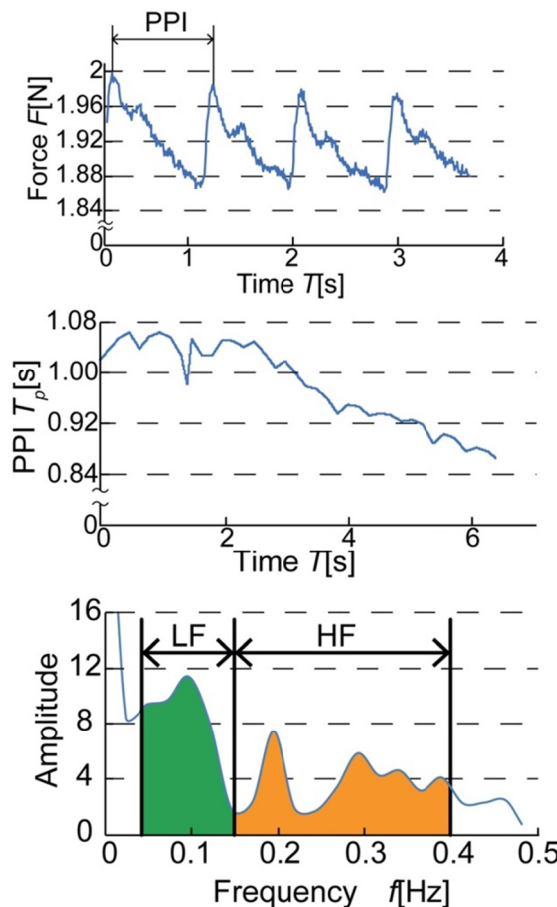


Fig. 5 Blood pressure pulse wave, PPI, PPI after Fourier transform (sitting position).

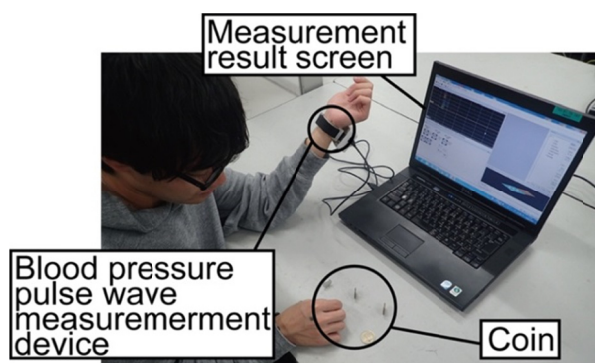


Fig. 6 Setup of coin experiment.

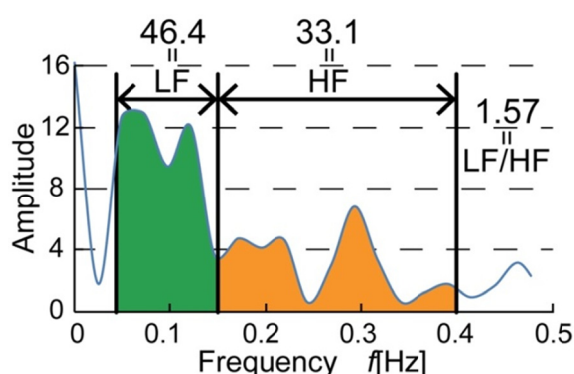


Fig. 7 PPI after Fourier transform (coin experiment).

3. 実験

3.1 血圧脈波を用いて得られる LF/HF の妥当性評価実験

LF/HF 値を用いたストレス評価として、平常時とコイン立てによるストレス負荷時における光電容積脈波から LF/HF 値を算出する研究が行われている[6]. そこでは平常時と比較し、ストレス負荷時において LF/HF 値が上昇し、値の上昇が主観評価と一致していることが確認されている。

本研究では、光電容積脈波の代わりに血圧脈波を用いて同様の実験を行い、血圧脈波を用いてもストレス評価の指標として使用可能か、確認を行う実験を行った。実験のセットアップを図 6 に示す。左手首に血圧脈波計測デバイスを装着し、計測部が心臓とほぼ同等の高さになるようにして計測を行う。これに対して、コイン立ての作業を右手のみを使用して 1 分間行い、コイン立て時の血圧脈波を計測した。

コイン立て時における血圧脈波から PPI を算出し、PPI をフーリエ変換したグラフを図 7 に示す。グラフより LF の積算値 46.4 と、HF の積算値 33.1 を算出し、LF/HF 値の 1.57 を求めた。コイン立て前の平常時にも同様に LF/HF 値を算出し、コイン立てによって LF/HF 値が約 58 % 上昇することを確認した。これより、血圧脈波を用いて算出される LF/HF 値を用いてもストレス値の算出が可能であることを示せたと考えられる。

3.2 移動ロボット遠隔操作時のストレス評価実験

次に、移動ロボットを遠隔操作する際のストレスを評価するための実験を行った。移動ロボットは図 8 に示す走行コースを目標として走行し、隣接した部屋から操作者が図 9 に示すコマンドを操作 PC から入力することによって遠隔操作を行う。実験は心身ともに健康な 20 代成人男性の協力のもと実施した。走行するコースは、直線や直角の右折、連続したカーブを含む全長約 11 m のコースであり、約 2 分間かけて走行させた。この際、操作 PC の上下左右ボタンを押すことで

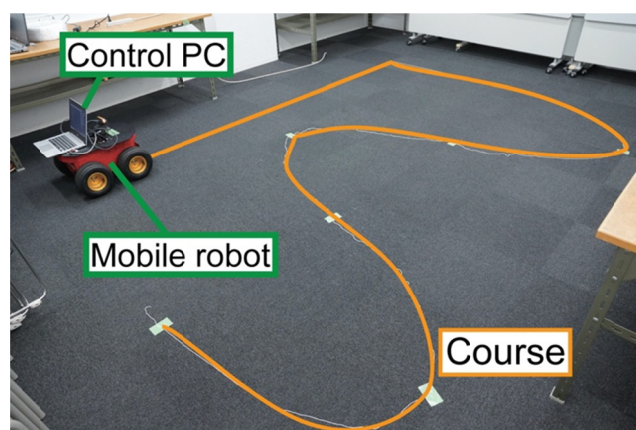


Fig. 8 Running course

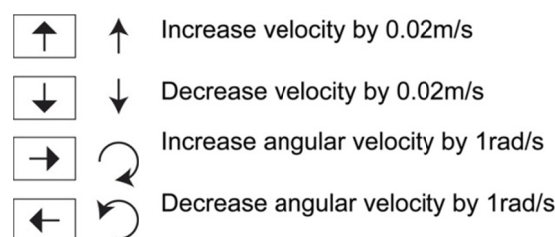


Fig. 9 Commands

前進・後退のコマンドでは速度を 0.02 m/s 増加・減少させ、右・左旋回のコマンドでは車体を 1 rad/s の角速度で右・左方向に旋回させるものとなっている。また、旋回時に前・後退のコマンドが送信されると旋回がキャンセルされるようになっている。なお、操作者は HMD から得られる映像から走行コース上を走行できているか判断し、HMD の映像から右手でコマンド操作を行う。これと同時に左手首には血圧脈波計測デバイスを装着し、遠隔操作時の血圧脈波を取得する。また、ストレスの負荷方法としては、コマンド操作時に 0.5 秒～2 秒の遅延をランダムに発生させるという手法を用いた。ストレス負荷時と比較するためのデータとして、座位時、そして遅延を伴わない状態での走行時の血圧脈波も計測し、それぞれ座位時、遅延なし時のデータとした。

図 10 に実験の結果を示す。座位時（青線）、遅延なし時（赤線）、遅延あり時（緑線）の LF/HF 値の推移が確認できる。なお、計測された血圧脈波について、最初と最後の 5 秒間のデータは操作開始・停止作業に伴うノイズを考慮し無視した。各状態における最小値と最大値の差を算出したところ、座位時では 0.39、遅延なし時は 0.8、遅延あり時は 1.2 となり、また、遅延あり時は約 20 秒の周期を持っていることが分かった。

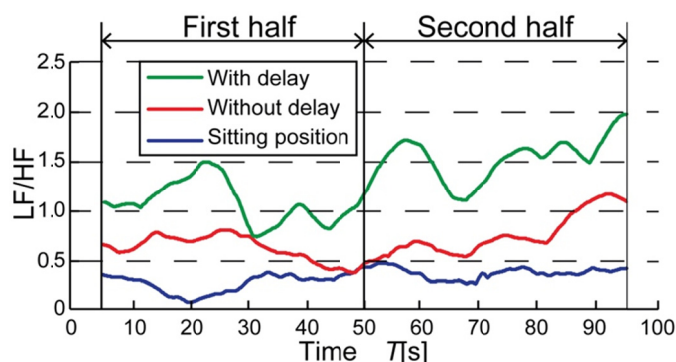


Fig. 10 Transition in LF/HF

Table 1 Average of LF/HF

	First half	Second half	Whole
With delay	1.065	1.557	1.311
Sitting position	0.280	0.367	0.325
Without delay	0.628	0.764	0.696

また、図 10 より、遅延ありの場合、実験開始時に約 1.0 であった LF/HF 値が大きく上下しながらも全体的に上昇しつづけ、実験終了時には LF/HF 値が 2.0 まで上昇していることがわかる。これに対して、遅延なし時の場合、開始時に 0.7 程度であった LF/HF 値は実験中もそれほど大きな変化は見られないが、実験終了間際の 80 s 頃から上昇し、実験終了時には LF/HF 値が 1.1 程度まで上昇した。最後に比較用の座位時のデータについては、実験開始時に約 0.3 であった LF/HF 値はほとんど変化することなく推移し、実験終了時も 0.4 程度とほとんど変化することはなかった。

そこで、得られた LF/HF 値の推移のうち、中間地点である 50 秒地点を境に前半、後半と分け、各状態における前半、後半、全体の LF/HF 値の平均値を算出した。算出した結果を表 1 に示す。座位時と比べ、全体では遅延なし時、遅延あり時において LF/HF 値がそれぞれ平均 114 %、303 % 上昇していることが分かった。また、LF/HF 値の上昇率について、前半ではそれぞれ約 125 %、281 %、後半ではそれぞれ約 106 %、320 % となった。

以上より、LF/HF 値の変動幅について、ストレス負荷の度合いが大きくなるほど変動幅が大きくなることが分かった。また、平常時と比較し、遅延を伴わない遠隔操作において、ストレス負荷が認められるものの時間経過によるストレスの蓄積は見られないこと、そして、遅延を伴う遠隔操作においてストレス負荷と蓄積の両方が認められることが示せた。

3. 結論

本研究では、視覚を共有した状態で移動ロボットの遠隔操作が可能なシステムを構築し、移動ロボット操作時に計測された血圧脈波を用いてストレスの定量評価を行った。座位時と比較し、遅延を伴わない操作時と遅延を伴う操作時においてストレス指標である LF/HF 値が全体でそれぞれ 114%、303% 上昇することが確認された。また、一連の計測結果を前半と後半に分け LF/HF 値の平均値を比較した。遅延なし時では、座位時と比較し前半では 125%、後半では 106% の上昇が見られた。遅延あり時では、座位時と比較し前半では 281%、後半では 320% の上昇が見られた。以上より、座位時と比較し、遅延を伴わない操作時も遅延を伴う操作時もストレスが負荷されていることが分かった。一方、遅延を伴わない操作時は前半と後半で上昇率が減少しており、遅延を伴う操作時は前半と後半で上昇率が増加している。これらより、遅延を伴わない操作において時間経過によるストレスの堆積は見られないが、遅延を伴う操作においては時間経過によるストレスの堆積が見られることが分かった。

参考文献

- [1] 橋爪誠, “手術支援ロボットの現状と将来,” 日本ロボット学会誌, vol. 22, no. 4, pp. 423-425, 2004.
- [2] 村井亮介, 松野文俊, “自律移動搬送ロボットのホテル・空港におけるサービス提供の可能性に関する実証試験の実施,” 日本ロボット学会誌, vol. 36, pp. 279-285, 2018.
- [3] 山田宏尚, “建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース,” 日本ロボット学会誌, vol. 33, no. 6, pp. 400-403, 2015.
- [4] 黒木雅嗣, 嶋哲男, 大川明宏, 河野治, 館暲, “遠隔操作における能動立体視の効果と生理指標を用いる評価法,” 電気学会論文誌 C, vol. 115, pp. 182-187, 1995.
- [5] 山口昌樹, “唾液マーカーでストレスを測る,” 日本薬理学雑誌, vol. 129, no. 2, pp. 80-84, 2007.
- [6] 中山春希, 上杉悠気, 水沼充, 横山道央, “光電容積脈波を用いた 3D 映像酔い検出の研究,” 計測自動制御学会東北支部第291回研究会, pp. 1-7, 2014.
- [7] 加川敏規, 中嶋信生, “体動によるノイズの影響を除去した高感度腕時計型脈波計測センサ,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J96-D, no. 3, pp. 743-752, 2013.
- [8] K. Shimura, H. Hori, T. Dohi, H. Takao, “The calibration method for blood pressure pulse wave measurement based on Arterial Tonometry method,” 40th Int. Conf. of IEEE EMBC '18, pp. 3642-3645, 2018.
- [9] 栗山大祐, 堀正峻, 土肥徹次, “姿勢変化に伴う影響を低減可能な眼鏡装着型血圧脈波計測デバイス,” 電気学会バイオ・マイクロシステム研究会, BMS-19-022, 2019.
- [10] 深堀俊, 堀正峻, 土肥徹次, “血圧脈波計測における体動ノイズの低減と評価,” 電気学会バイオ・マイクロシステム研究会, BMS-18-038, 2018.
- [11] 小川洋二郎, 岩崎賢一, 加藤実, “周波数解析を用いた自律神経機能評価機器,” Anesthesia 21 Century, vol. 13, no. 2-40, pp. 20-25, 2011.