

# 遠隔地コミュニケーションにおける血圧脈波を用いたロボット操作者状態評価

## Evaluation of Robot Operator's Condition Using Blood Pressure Pulse Wave in Remote Communication

精密工学専攻 51号 廣江大瑚

Daigo Hiroe

### 1. 研究の背景と目的

近年、ロボット技術の新しい適用対象領域として災害現場での探索救助活動やロボットを介した遠隔地とのコミュニケーションが注目されている<sup>[1]</sup>。特に遠隔地コミュニケーションにおいては、遠隔地にいる者同士が操作するロボットをアバターとして、あたかも直接対面してコミュニケーションをとっているかのような状況を作り出すことができる。それによって、ノンバーバルコミュニケーション不足の解消、移動時間の省略などが期待されている<sup>[2]</sup>。しかしこれらの作業においては、ロボットが実際に駆動、走行する環境と、操作者がロボット操作を行う環境とが完全に隔てられている。そのためロボット作業におけるパフォーマンスはその操作の難易度に大きく左右されるという課題がある。そのため、ロボット作業において、行う操作が操作者に対して与える影響がより少ない行動、移動ルートを選択することはパフォーマンスの向上につながると考えられる。これを実現するためにはロボット操作難易度の変化が操作者に与える影響を定量的に評価しなければならない。

生体信号を利用したストレス評価に関しては多くの研究が行われている。それらの従来研究においては、脳波や心電図、LF/HF値を用いた評価が行われているが、ロボット操作中の生体信号について連続的、かつ定量的な評価は行われていない<sup>[3]</sup>。そこで本研究ではロボット操作中におけるイベントの発生、操作難易度の変化に準ずる生体信号の変化を評価するうえでの血圧脈波の有効性を示すことを目的とする。

### 2. 計測する血圧脈波成分と解析手法

血圧脈波の概形を Fig. 1 に示す。ロボットを操作する際には、操作環境や操作内容が刻一刻と変化し、それにより操作ミスが発生することもある。そしてそれらにより人体は少なからず影響を受ける。血圧脈波成分はそれら影響によって生じた呼吸変動、心拍変動がリアルタイムに反映される。よって、この血圧脈波を、製作した血圧脈波計測デバイスによって計測し、解析することにより、ロボット操作により操作者に生じる影響をリアルタイムに評価することが可能であると考えられる。

本研究では取得した血圧脈波データの中から、波形一拍分の中で出力された力の最大点を血圧脈波最大値、最小点を血圧脈波最小値として取得した。その後、最大値同士の間隔 PPI (Pulse Pressure Interval) を取得した。その後、血圧脈波の振幅(血圧脈波最大値-血圧脈波最小値)を算出した。また、得られた PPI に対して高速フーリエ変換 (FFT : Fast Fourier Transform) を行い、低周波数帯 (0.05~0.15 Hz) と高周波数帯 (0.15~0.45 Hz) のパワースペクトルの比を算出し LF/HF 値<sup>[4]</sup>とした。

自律神経は交感神経、副交感神経の二つに分かれており、交感神経はストレスの多い状況、緊急事態に対して体内プロセスを促進する。これに対して副交感神経は日常において体内プロセスを抑制するといった役割を担っている。これらの理由から、前述した各血圧脈波成分である血圧脈波振幅、PPI、LF/HF 値はこの二つの神経のうちどちらが優位

であるかによって変動することが知られている<sup>[5]</sup>。交感神経の影響が優位な状況においては、血圧脈波最大値、血圧脈波最小値、LF/HF 値は上昇し、PPI、血圧脈波振幅は減少する。そして副交感神経が優位な状況においてはこの逆となる<sup>[6]</sup>。

また、血圧脈波振幅、PPI は理論上、負荷を一切受けていない状態では発話による体動ノイズや電源ノイズのみが反映された値となる。これに対してロボット操作時イベントの発生、操作難易度の変化による心拍変動が加わった場合、それぞれの付近で値の標準偏差が大きくなると考えられる。よって評価の際には血圧脈波振幅、PPI、それぞれを微分した値、各標準偏差、LF/HF 値を特徴量として使用した。また、前述した自律神経の機能によって、一方の神経の亢進により変化した生体信号は、もう一方の神経の働きで抑制されるため、得られる特徴量は単調な変化をしないと考えられる。そのため、難易度ごとの代表値には平均値を利用した。

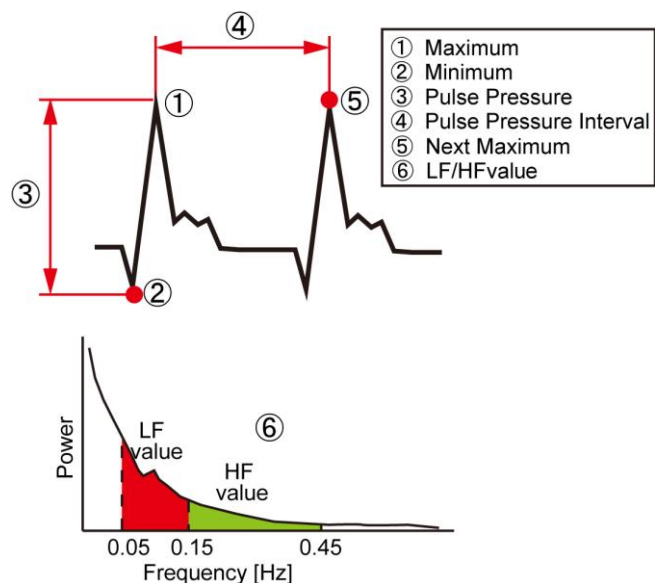


Fig. 1 Blood pressure pulse wave feature amount to be used

### 3. 製作したデバイスと浅側頭動脈を利用した血圧脈波計測

#### 3.1 製作したデバイスの概要

製作したデバイスの概要を Fig. 2 に示す。デバイスは MEMS 3 軸力センサアレイ、信号処理基板、紫外線硬化樹脂パーツ、ベルト、バンド、市販ヘッドセットから構成されている。MEMS 3 軸力センサはタッチエンス (株) と共同で開発したものである。

MEMS 3 軸力センサと信号処理基板はフレキシブル基板で接続されている。MEMS 3 軸力センサアレイはトノメトリ法で血圧脈波計測を行うために用いる。信号処理基板は MEMS 3 軸力センサで検知した電圧変化を増幅し、AD 変換を行った後に、PC に対して信号を送信する役割を担っている。信号処理基板で処理された信号は USB ケーブルを介して PC へ

送信され、シナノケンシ（株）と共同開発したソフトウェアによって記録される。このほかに紫外線硬化樹脂パーツはMEMS 3軸力センサを市販ヘッドセットに固定する役割があり、バンドはMEMS 3軸力センサを計測に適切な位置で固定すると同時に、押し付け力を調整する役割がある。

各パーツの設計、選別にあたってはデバイス全体の重量が大きくなってしまうと、体動によるセンサのずれが大きくなってしまいう上に、ヘッドセット単体の装着感から乖離してしまうため、なるべく軽量かつ小型になるよう留意した。

### 3.2 デバイス製作プロセス

製作したデバイスの構成を述べる。3D プリンタを使用して製作した紫外線硬化樹脂パーツをバンドによって市販ヘッドセットに固定した。紫外線硬化樹脂パーツにはMEMS 3軸力センサアレイをはめ込むためのくぼみを設けた。くぼみにMEMS 3軸力センサアレイをはめ込んだのちに、螺子によってMEMS 3軸力センサアレイを固定した。装着時は固定したMEMS 3軸力センサアレイが浅側頭動脈直上皮膚に接触するようにし、その後バンドにより固定する。

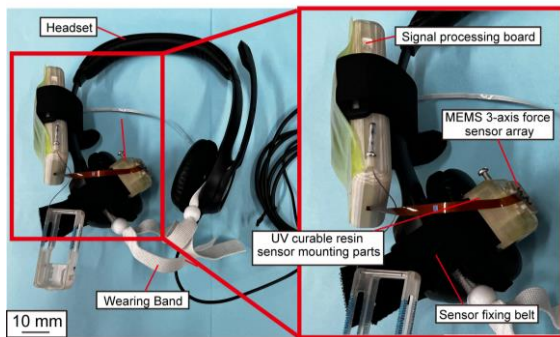


Fig. 2 Overview of the Headset-worn blood pressure pulse wave measurement device

### 3.3 浅側頭動脈を利用した血圧脈波計測

本研究では血圧脈波の低負荷かつ連続的な計測方法として知られるトノメトリ法を利用している<sup>[7]</sup>。トノメトリ法の概要を Fig. 1 に示す。トノメトリ法では力センサを血管直上の皮膚に押し付け、血管上部を圧偏することによって、血管の張力の垂直成分を無視することができる。これによって押し付け力と血圧が等しくなり、血圧を計測することが可能になる。この方法では血流を止めない状態での計測が可能であるため、低負荷で連続的な血圧計測が可能であるとされている<sup>[7]</sup>。また、トノメトリ法では手首の橈骨動脈を用いるのが主流であるが、トノメトリ法による血圧脈波の計測は体動によるノイズの影響を大きく受け、心臓との高さ関係によってもその値は変動する。本研究ではロボットを操作する実験の際に両手を使用するため、手首橈骨動脈に対してトノメトリ法を用いた場合、必然的に体動等の影響が大きくなることが予想される。そこで、実験ではその動きによる体動の影響が少ない浅側頭動脈に対し、トノメトリ法を用いている<sup>[8]</sup>。

浅側頭動脈は、外頸動脈の終枝で、一般的にトノメトリ法に用いられる橈骨動脈と同様に拍動を体表から触知できる主な動脈のうちの一つとして知られており、触診に使用される事もある。触診の際は頬骨弓と耳珠の上側で行われる。この血管の下には比較的平坦な側頭骨が存在するため、血管を圧偏して平坦にする必要があるトノメトリ法に適していると考えられる。

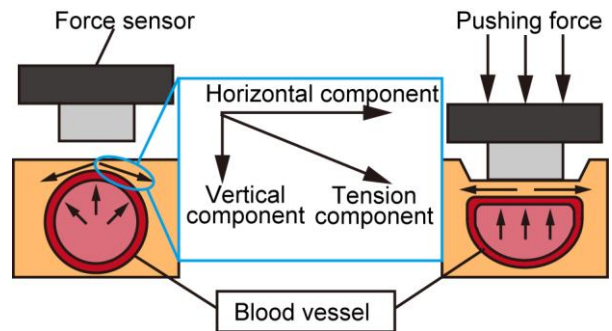


Fig. 3 Principle of the arterial tonometry method

## 4. 実験

### 4.1 製作デバイスを使用した血圧脈波計測実験

本実験では製作したヘッドセット装着型血圧脈波計測デバイスにより実際に血圧脈波を計測した。製作したヘッドセット装着型血圧脈波計測デバイスを使用して、5分間の血圧脈波計測実験を5回行った。被験者は心身ともに健康な20代男性1名とした。実験により計測した血圧脈波波形の一部を Fig. 4 に示す。各回の波形を Fig. 5 に示す。それぞれの計測において同程度の血圧脈波振幅、PPI が計測され、5度目の計測で最小振幅 0.22 N が、1度目の計測で最大振幅 0.36 N が検出された。また、PPI の平均は 0.89 sec となった。心拍数の正常値は1分間に50~99回程であるとされ<sup>[9]</sup>、これに相当するPPIは0.83~1.65 sec であるため制作デバイスによりPPIを計測できていると考えられる。よってLF/HF値に関しても算出が可能である。よって計測した血圧脈波から本研究で特徴量の算出に使用する血圧脈波振幅、PPI が取得できることを確認した。

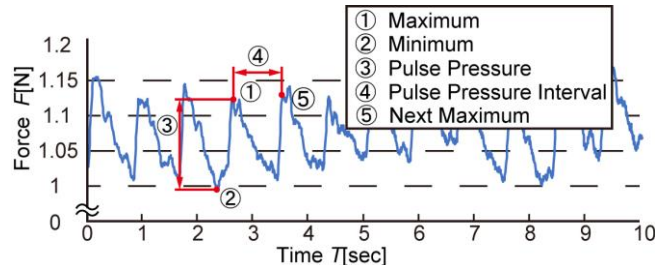


Fig. 4 Part of the acquired blood pressure pulse wave

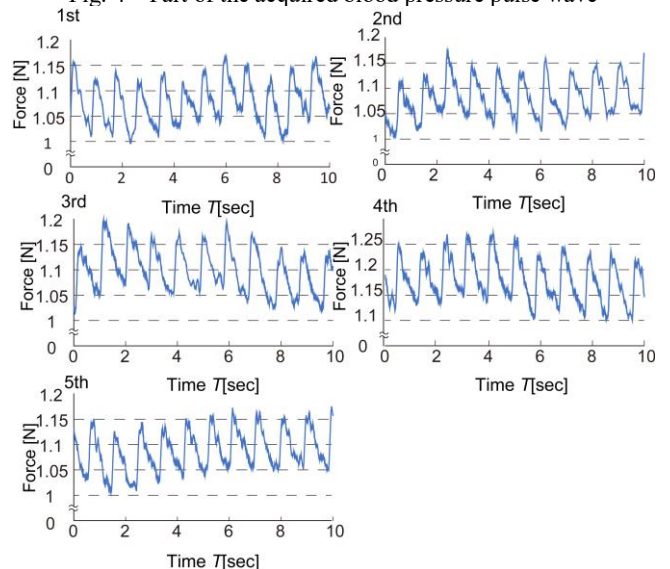


Fig. 5 Blood pressure pulse wave measured at each section

## 4.2 操作難易度別血圧脈波計測実験

本実験ではロボットが駆動する環境を変化させ、操作者に対して意図的な操作難易度変化を付与した場合の血圧脈波変動を計測、解析した。被験者は心身ともに健康な 20 代男性一名とした。解析の際には特徴量である血圧脈波振幅、PPI、それぞれを微分した値、各標準偏差、LF/HF 値を使用した。

実験セットアップ（操作者側）を Fig. 6 に、実験セットアップ（移動ロボット側）を Fig. 7 に示す。操作者は頭部にヘッドホン装着型血圧脈波計測デバイス、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着し移動ロボット上のカメラの映像を見る。移動ロボットには PC、Web カメラ、スピーカーマイクを搭載し、カメラ、マイクは PC により制御を行う。操作者は手元のタブレット端末によりロボットを操作する。ロボットに送ることのできる指令は、前進、後退、右旋回、左旋回の四種類である。前進、後退のコマンドは各方向に 1 m ずつ移動するものであり、右、左旋回のコマンドは車体を 90 deg ずつ右、左方向に旋回させるものとなっている。

実験環境を Fig. 8 に示す。本実験ではロボット走行ルートの両側に移動可能な壁を設置し、この間隔を狭めていくことで操作者にストレスを付与した。使用した移動ロボットの車幅 50 cm に対して、壁の初期間隔は 150 cm とした。実験ではこの壁を左右 10 cm ずつ縮めていき、最も狭い間隔は 70 cm とした。ロボットは壁から 50 cm 地点を移動開始位置とし、壁と壁の間を走行、壁を抜けたのちに 180 deg 旋回し、再び壁と壁の間を走行、開始位置到着後に 180 deg 旋回するまでを 1 連の動作として、各壁の間隔ごとに行った。

実験から得られたデータから得た特徴量と壁の間隔との相関を Table 2 に示す。Table 2 において色付けた値が特に相関が高くなった値である。各データに対し、体動によるノイズが多く見られた。これに対して、周波数解析、移動平均法をそれぞれ適用した。その中で 9 項移動平均を算出した際、各特徴量と道の幅の相関係数が他に比べ高い値を示した。それぞれの数値と道幅の変化との関係を示したグラフを Fig. 9 に示す。相関係数は PPI 微分値の標準偏差、振幅微分値の標準偏差ともに -0.73 となった。このことから算出した特徴量である PPI 微分値の標準偏差、振幅微分値の標準偏差によって、ロボット操作中に発生したイベントや操作内容の変化による操作者への影響を評価することができると考えられる。

グラフの中で道幅 70 cm の際、標準偏差が非常に高い値を示しているが、これは実験時の体動ノイズの影響が強く出てしまったことによるものであると考えられる。

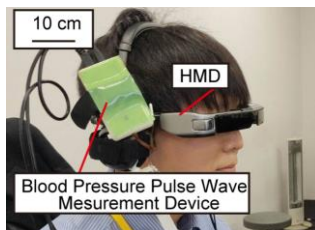


Fig. 6 Experiment setup (operator)

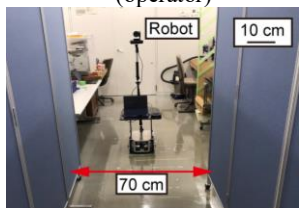


Fig. 8 Experiment with changing road width



Fig. 7 Experiment setup (robot side)

Table 2 Blood pressure pulse wave measurement experiment with varying operational stress analysis

	LFHF value	Max [N]	PPI [sec]	Standard deviation (PPI) [sec]	Differentiated value (PPI) [sec]	Standard deviation Differentiated value(PPI) [sec]
150	33.23	0.90	0.59	0.26	0.19	0.13
130	56.33	0.99	0.69	0.31	-0.36	0.14
110	32.34	1.02	0.67	0.32	-1.21	0.23
90	41.17	0.94	0.42	0.31	-2.43	0.36
70	62.98	0.94	0.54	0.30	-0.22	6.44
Correlation coefficient	-0.51	-0.12	0.54	-0.62	0.44	-0.73
Road width [cm]	Amplitude [mN]	Standard deviation (Amplitude) [mN]	Differentiated value (Amplitude) [mN]	Standard deviation Differentiated value (Amplitude)[mN]		
150	40.75	0.53	-15.2	1.80		
130	59.76	0.42	-3.10	2.01		
110	66.34	0.55	-7.21	2.55		
90	47.38	0.35	-1.15	2.57		
70	44.86	0.38	-1.96	2.81		
Correlation coefficient	0.061	0.64	-0.51	-0.73		

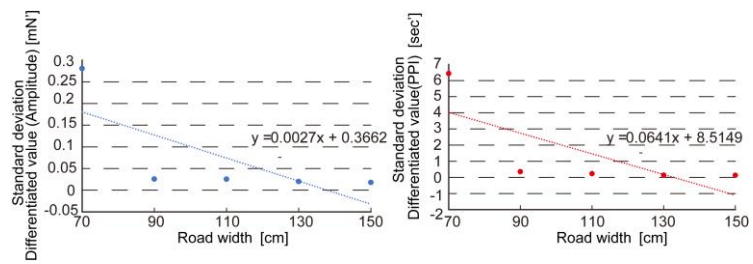


Fig. 9 Relationship between each feature and wall spacing

## 4.3 遠隔地コミュニケーション中の血圧脈波解析実験

本実験では実際にロボットが駆動する場所と操作者がロボットに指令を送る場所とが隔られた状態で、ロボットを介してコミュニケーションをとるデモンストレーションを行った。実験中の操作者血圧脈波を製作した血圧脈波計測デバイスにより計測し、特徴量の変化を解析した。被験者は心身ともに健康な 20 代男性 1 名とした。実験のセットアップに関しては前述の操作ストレス別血圧脈波計測実験と同様にして行う。操作者、移動ロボットに搭載された各機器により遠隔地コミュニケーションシステムを構成した。実験を行うにあたって、遠隔地からの研究室訪問を想定したフローチャートを作成した。作成したフローチャートを Fig. 10 に示す。実験ではこのフローチャートに沿ってロボット操作を行う。操作中、操作者は自らがストレスを感じた点、操作を誤った点などをイベントとして種類と時間を記録した。本実験では評価の際に、各イベントについて操作をしていない区間（操作なし）、操作をしている区間（操作あり）、近くに障害物が多いなど通常より難しい操作を行った区間（難操作（ミスなし））、通常より難しい操作を行った結果ミスをした区間（難操作（ミスあり））に分けて評価を行った。計測は 30 分間行い、開始、終了の 3 分間は、体動や発話、各デバイスセットアップによるノイズが大きく見られたため、解析の際は無視をした。

本実験における解析においては、操作ストレス別血圧脈波計測実験の結果から、難易度との非常に高い相関を示した。PPI、血圧脈波振幅それぞれの微分値の標準偏差を使用した。得られた PPI、血圧脈波振幅の微分値に対して 10 点ごとの標準偏差を算出しプロットしたグラフに対して前述した区間を重ね合わせたグラフを Fig. 11 に示す。

Fig. 11 の点群の中で、緑に囲まれたものに注目すると、操作者がロボットを操作している区間、通常の操作よりも難しい操作を行っている区間において、それぞれの点群が他の区間の点群に比べ、大きな値を示していることが分かる。このことから、操作内容や、難しい操作、操作のミス等のロボッ

ト操作中のイベントによる操作者への影響により特徴量がリアルタイムに変化していると考えられる。また、イベント発生時以外の部分においても点群が示す値が上昇している箇所が見受けられる。これに関しては操作者はロボット操作から何らかの影響を受けたものの、操作者に自覚がなかったため、イベントとして記録されなかったものであると考えられる。

以上のことから使用した特徴量によってロボット操作から操作者が受ける影響をリアルタイムに評価することができることを確認した。また、操作者が自覚していないようなロボット操作からの影響についても評価できる可能性を示した。しかし、Fig. 11 からわかるように、操作者がイベントを自覚しているにもかかわらず、特徴量の変化が見取れない区間が存在した。これに関しては、まず体動の影響が表れてしまったこと、次に、他のイベント区間に比べ、イベントの発生している時間が短く、イベントによる操作者への影響が血圧脈波に反映されなかったことなどが原因として考えられる。

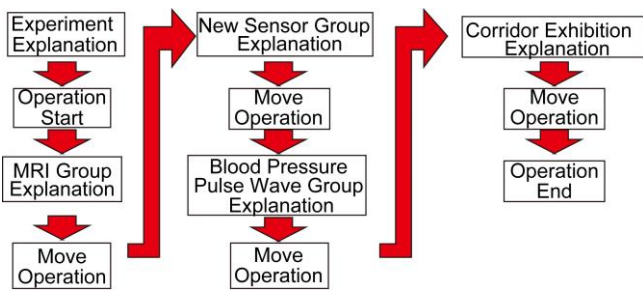


Fig. 10 Experimental flow

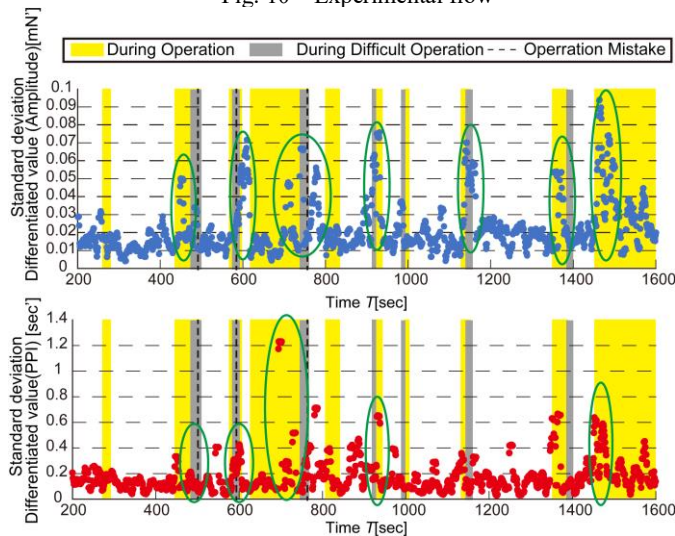


Fig. 11 Changes in features according to events during robot operation

## 5. 結論

本研究ではロボットが駆動する場所と操作する場所とが隔たれた状態でロボットを介してコミュニケーションを行うことができるシステムを構築し、コミュニケーション中の血圧脈波を計測、解析した。解析には特徴量として PPI、血圧脈波振幅、LF/HF 値を使用した。

まず、難易度を段階的に故意に変化させる実験において、血圧脈波振幅、PPI、それぞれを微分した値の標準偏差が操作の難易度変化と高い相関を示した。相関係数はともに  $-0.73$  であった。次に実際の遠隔地コミュニケーションを想定したデモンストラーション実験において、操作者自身が記録した、

操作内容の変化などのイベント時間と、難易度を故意に変化させる実験において特に相関の高かった二つの特徴量の時間変化を解析したところ、両値がイベント付近でほかの区間の値よりも高い値を示した。また、イベント区間以外でも値の上昇が見られ、これは操作者にとって無自覚なイベントの影響であると考えられる。これより血圧脈波によってロボット操作中の自覚イベント、無自覚イベントが操作者に対して与える影響を特徴量において定量的に評価することができる可能性を示唆した。

また、今後の展望として、本研究で行ったロボット操作難易度に関しては壁の間隔が変化することで、道の幅が狭くなるといった状況のみを想定している。操作難易度についてはロボットの移動スピード、旋回時の回転スピード、道の平坦さ等多くのパラメータが考えられる。それらの操作難易度の細かな変化に対する血圧脈波の変動については未検討である。また、研究全体において、歯のかみしめや、発話、その他体動によるノイズの影響が見受けられる。また最後に行った遠隔地コミュニケーション中の血圧脈波解析実験においての結果から、すべてのイベント区間に対して特徴量は変化しなかった。

以上のことから、今後の研究、実験において、操作の種別、難易度を細分化し、各動作について十分に長い計測時間を設けたうえで、取得した脈波に対して体動除去を行い、解析することでロボット操作内容と血圧脈波変動の関わりをより詳しく検証していくことができ、特徴量変化の陽性、陰性、擬陽性、偽陰性の判別も可能になっていくのではないかと考えている。

## 参考文献

- [1] 堀口由貴男, 榎木哲夫, 桑谷雅之, 遠隔操作ロボットを用いた探索行為における技能解析と生態学的考察, 日本知能情報ファジィ学会誌, **17-4** (2005) pp. 441-449.
- [2] 山岡史享, 神田崇行, 石黒浩, 萩田紀博, 遠隔操作型コミュニケーションロボットとのインタラクションによる印象評価, 情報処理学会論文, **48-11** (2007) pp. 3577-3587.
- [3] 黒木雅嗣, 嶋哲男, 大川明宏, 河野治, 館章, 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, **115-2** (1995) pp. 182-187.
- [4] 堀尾恵一ら, 脈波信号に基づく身体的・心理的状態の推定およびその可視化, 第 25 回ファジィシステムシンポジウム, **25-116** (2009) pp. 2B4-04.
- [5] 大須賀美恵子, ストレスを因る生理学的方法, Health Sciences, **13-1** (1997) pp.18-22.
- [6] Luczak, H. Fractioned heart rate variability, Ergonomics, **22-12** (1979) pp. 1315-1323.
- [7] 劔物修, トノメトリ法による血圧測定, 呼吸と循環, **42-12** (1994) pp. 1173-1179.
- [8] 白井凌, 土肥徹次, 日常的な血圧計測のための眼鏡装着型血圧脈波計測デバイス, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, **15-2** (2015) pp. 2A2-U04 (1)-(4).
- [9] Bjerregaard, Mean, P. Mean 24hour heart rate, minimal heart rate and pauses in healthy subjects 40-79 years of age, European Heart Journal, **4-1** (1983) pp. 44-51.