

直接的身体動作と振動触覚コミュニケーションが仮想空間における共同作業に及ぼす影響

Influence of Direct Body Motion and Vibrotactile Communication on Collaborative Work in Shared Virtual Environment

精密工学専攻 3号 阿部真大
Masahiro Abe

1. はじめに

近年、コンピュータにより三次元環境を生成するバーチャル・リアリティ (Virtual Reality: VR) 技術が急速に発展し、リモートコラボレーションと呼ばれる、遠隔地の仮想環境をネットワークによって接続し、地理的に離れた相手と仮想空間を共有してその中で共同作業をおこなう技術の研究が進められている⁽¹⁾。リモートコラボレーションでは三次元の情報を扱うことができるため、遠隔地にいるエンジニアなどの専門家たちが仮想的に一堂に会し、三次元形状物体の設計、製造などの作業を共同して効率よくおこなうことができる。

仮想空間内で円滑な共同作業を実現するためには、遠隔地に点在するユーザ間のコミュニケーションが不可欠であり、遠隔地の相手と仮想的にコミュニケーションをおこなう研究は数多く行われている。関連研究として、アバタを使った看護コミュニケーション教育支援システムの研究がある⁽²⁾。この研究では、表情や視線の変化、うなずきや手振りなどの非言語メッセージを表現する機能を有するアバタを用いたロールプレイングにより、看護コミュニケーションにおいて重要な、患者の潜在的なメッセージを読み取る能力の向上が期待されている。しかし、アバタを用いてのコミュニケーションは表情の変化や手振りなど、豊富な表現力を有するが、常に対象を注視していなければならないため、ユーザの行動は大きく制限される。また、表情の変化や手振りなどから瞬時に相手の意図を読み取ることは難しく、迅速な行動が求められる作業には対応できない。別なアプローチとして、力覚・触覚情報をコミュニケーションに利用する研究もおこなわれている⁽³⁾。二人で一つの仮想物体の操作をおこなう際、力覚提示デバイスによって互いの力覚を共有することにより、作業の成績が向上することが確認されている。力覚・触覚情報はハプティックデバイスを介して瞬時に伝わるため、共同作業との素早いコミュニケーションが可能となる。しかし、アバタやジェスチャを用いた場合と比べて表現力は乏しく、従来研究で用いられている PHANTOM⁽⁴⁾などの設置型の力覚デバイスによる操作には慣れが必要であり、ユーザの行動も制限される。

より複雑で迅速な行動が求められる共同作業においては、ユーザが直感的に作業できる仮想環境とユーザ間で素早くさまざまな情報の伝達を可能とするコミュニケーション手法が必要になると考えられる。

ユーザが直感的に作業できる仮想環境を実現するための方策として、三次元視覚表示デバイスによる視覚情報の立体提示、および仮想物体とのインタラクションといった仮想空間での作業に実空間でのユーザの実際の身体動作を直接反映させる手法が挙げられる。三次元視覚表示デバイスにより仮想空間や仮想物体を立体的に捉えることが可能となる。また、仮想空間での作業に実空間での実際の身体動作を直接反映させることにより、実空間に近い感覚で直感的に作業をおこなうことが可能になると考えられる。

仮想空間での素早く表現力豊かなコミュニケーションを実現する方策として、振動触覚グローブを利用することが挙げられる。ウェアラブルなグローブ型振動デバイスを用いることにより、身体動作を用いたさまざまな表現力と振動触覚による素早い情報伝達を両立したコミュニケーションが実現すると考えられる。

そこで本研究では、没入型 HMD による両眼視差立体視と距離画像センサによるユーザの身体動作計測を統合し、実空間での身体動作を操作に直接利用し、二人のユーザが振動触覚によりコミュニケーションをおこなう協力型三次元 VR ゲームを構築する。そして構築した VR ゲームのゲーム成績から、直接的な身体動作と振動触覚コミュニケーションが仮想空間における共同作業に及ぼす影響を明らかにする。作業をゲーム形式にすることにより、ユーザが作業内容を理解することが容易になるとともに、作業への意欲が向上し、積極的なコミュニケーションにつながることを期待できる。

2章では VR ゲームの設計について述べる。3章では VR ゲームシステムの構成について述べる。4章では空間立体視と直接的な身体動作が作業に及ぼす影響の検証実験について述べ、5章では振動触覚コミュニケーションの評価実験について述べる。6章ではまとめと今後の課題について述べる。

2. VR ゲームの設計

2.1 ゲームの設計

共同作業における基本的なタスクとして、複数の人が協力して物体を持ち上げ、特定の位置まで運搬する Pick-and-Place や、人から人へ物体の受け渡しをおこなう Hand-to-Hand などが挙げられる。制作する VR ゲームにおいても、触覚情報の共有による共同作業を想定し、複数のユーザが同一物体を操作できることが望ましい。そこで本研究では、地理的に距離の離れた二人のユーザが一つの仮想空間で、振動触覚によるコミュニケーションをおこないながら協力して同一物体を操作し、ゲームクリアを目指す VR ブロック崩しを制作した。

2.2 VR ブロック崩しの概要

VR ブロック崩し (Fig.1) の基本的なルールは通常のブロック崩しと同様である。仮想空間には複数のブロック、球、プレートが配置されており、二人のユーザは背後から球が飛び出さないよう一つのプレートを共有して向かってきた球を弾き、ブロックにぶつけて崩していく。フィールドは横幅 4.5 m、奥行 7 m、高さ 2 m の直方体形状の仮想空間(床面は中央を境に二色のエリアに分かれており、グリッド線が表示されている)。フィールドには赤、青、緑のブロック 41 個(各 1 点)と黒のブロック 4 個(各 3 点)の計 45 個のブロックと紫色の球、半透明の緑色のプレートが配置されている。自分、およびパートナーの右手位置はそれぞれピンク、薄青色の球で表示されており、ユーザは右手でプレートに触れ、手を「グー」にすることでプレートを掴み動かすことができる。二人のユーザは左右のエリアに分かれて立ち、互いにパートナー

のエリアに入らないよう一つのプレートを受け渡ししながら向かってくる球を弾く。パートナーのエリアに入り込んで球を弾いた場合はペナルティとして-1点となる。プレートは二人のユーザで同時に持つこともでき、その状態で球を弾くことにより球が強化されて黄色いエフェクトが発生し、一人で弾いたときには崩せない黒ブロックを崩すことができる。ユーザは後述する振動触覚グローブを右手に装着してゲームプレイをおこなう。5本の指に対してグローブから、プレートを掴んでいるときには弱振動、プレートで球を弾いたときには強振動がそれぞれ提示される。また、ユーザはプレートの受け渡しをしたいとき、手招き動作をおこなうことにより、パートナーの画面に”Hey PASS”の文字が表示され、パートナーのグローブを振動する。これにより、パートナーにその意思を伝えることが可能となる。すべてのブロックを消滅させるか球が5回空間から飛び出すとゲーム終了となり、スコア(崩したブロックの数)、プレイ時間、ヒット数(球をプレートで弾いた回数)が表示される。

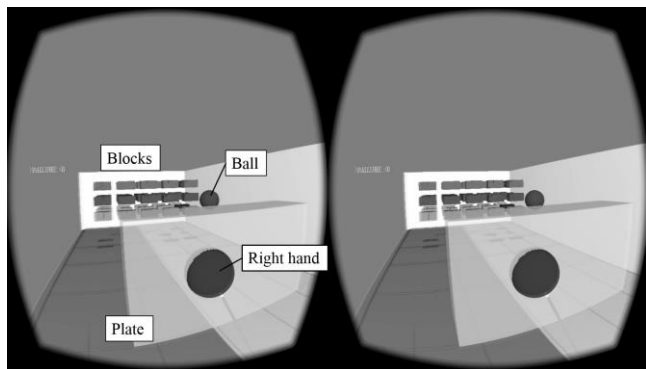


Fig.1 VR Breakout

3. VR ブロック崩しシステムの構成

VR ブロック崩しシステムは身体動作計測部と仮想空間描画面部、触覚情報提示部、そして頭部姿勢の計測と視覚情報の出力をおこなう HMD によって構成される。以下に各システム構成部の詳細を示す。

3.1 身体動作計測

仮想空間での作業に実空間での身体動作を利用するためには、センサにより人の動作を計測する必要がある。そこで本研究では、人の身体動作計測に距離画像センサ Kinect v2 (Microsoft) を使用する。Kinect v2 は人の頭部や胴体、手先などの三次元座標を取得することができ、マーカレスで動作計測をおこなえるため、ユーザの身体動作を阻害しない。また、任意の動作を含む動画を訓練データとして学習させることにより、その動作をジェスチャとして認識することが可能となる。これにより、ユーザの動作に合わせた仮想空間での移動、右手による仮想物体の操作、および手招き動作のジェスチャ認識を実現した。

3.2 三次元仮想空間の描画と視覚情報提示

三次元仮想空間の描画にはオープンソースツールキットの openFrameworks を使用し、視覚情報の提示には OculusRift DK2 (Oculus VR) を使用する。OculusRift DK2 にはジャイロセンサが搭載されているため、頭部の姿勢データを取得できる。これにより、ユーザの頭部の向きに応じた仮想空間描画が可能となる。

3.3 触覚情報提示

先行研究で用いられている設置型の力覚・触覚提示デバイスでは、ユーザはその場を動くことができないため、行動が大きく制限される。また、マニピレータを使つての操作は

実際の作業感覚と大きく異なり、直感的な操作が難しいことが考えられる。そこで本研究では、触覚提示に Fig.2 に示す振動触覚グローブを使用する。5本の指の爪上部分と甲部分には、それぞれ円盤型振動モータが配置されており、手首部の PIC マイコンによる制御により 10 段階の強度の振動が提示できる。また、Bluetooth による振動刺激生成部との無線通信が可能であり、ユーザの行動を制限しない。これにより、場面に応じた振動の提示と実空間での身体動作を直接反映させた仮想空間での作業を実現した。

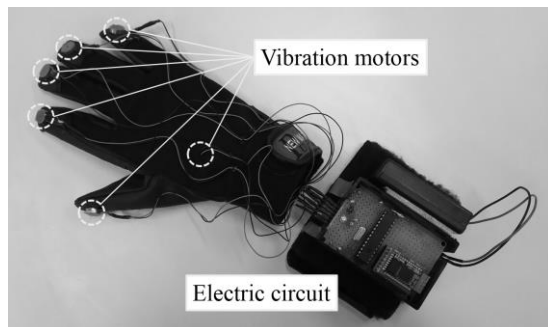


Fig.2 Vibrotactile glove

3.4 システム構成

VR ブロック崩しのシステム構成を Fig.3 に示す。本システムでは、実空間におけるユーザの身体動作をゲームプレイに直接反映させるために、距離画像センサ Kinect v2 から頭部や右手先などの位置座標データを取得する。これに、Oculus Rift DK2 のジャイロセンサから取得した頭部の姿勢データを合わせることで、ユーザの移動、頭部姿勢に応じた仮想空間の提示が可能となる。また、プレートの把持や球の衝突といったイベント発生時に、特定のコマンドを振動触覚グローブに送ることにより、イベントに応じた振動提示が可能となる。

地理的に距離の離れた二人のユーザによる協力プレイは二つのシステム間での相互通信により実現する。各システムで取得されたユーザの手の位置座標を相互に送りあうことにより、仮想空間におけるパートナーの位置を互いに知ることが可能となる。また、マスター・スレーブ方式により、マスター側で計算された球の位置、ブロックの状態などの物体情報をスレーブ側の仮想空間に反映させることにより、遠隔地の二人のユーザによる同一仮想空間での協力プレイが可能となる。

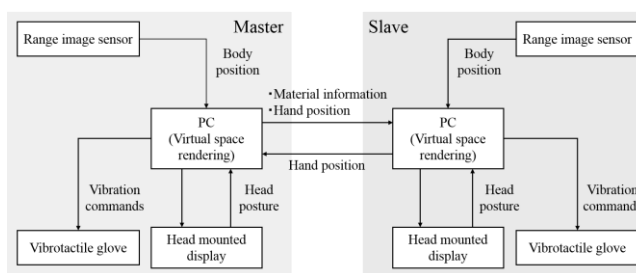


Fig.3 Configuration of VR system

4. 空間立体視と直接的な身体動作が作業に及ぼす影響の検証

ユーザが直感的に作業できる仮想環境実現のため、VR ブロック崩しを用いて HMD による空間立体視、および直接的な身体動作による操作が仮想空間における作業に及ぼす影響を検証する。

4.1 実験設定

実験条件を Table.1 に示す. 本実験では, 仮想空間での作業に有効な視覚情報提示手法, および操作手法を明らかにするため, ディスプレイ条件として通常ディスプレイと HMD, 操作条件として Geomagic Touch (3DSYSTEMS)と直接的身体動作を用意し, 2×2 の計 4 条件を設定した. Geomagic Touch はスタイラス型のエンドエフェクタから 3 自由度の力覚提示が可能な 3 次元力覚入力デバイスであり, 力覚提示を用いる多くの研究で用いられている. 被験者は一人で VR ブロック崩しを A, B, C, D の 4 条件でおこない, 定量評価としてスコア, プレイ時間, 球を打ち返した回数を記録する. 実験後, 被験者はゲームの印象に関するアンケートに回答する. アンケートでは, [1]空間の把握しやすさ, [2]操作感, [3]フラストレーション, [4]満足感, [5]作業負担の 5 項目を 5 段階で評価する. また, ゲームプレイ時における被験者の精神状態を評価する指標として, 安静時, およびゲームプレイ時の心拍数を腕時計型心拍計 Fitbit Charge2 (fitbit) を用いて測定する.

実験は 20 代の男女 15 名でおこない, 被験者には実験前に口頭でゲームに関する説明をし, ゲームに十分に慣れるまで練習時間をもうけた.

Table.1 Experiment condition

	Display	Operation
A	2D	Geomagic Touch
B	3D (HMD)	Geomagic Touch
C	2D	Direct Body Motion
D	3D (HMD)	Direct Body Motion

4.2 実験結果

Fig.4 に各実験条件におけるスコア, プレイ時間, 球の打ち返し回数の平均を示す. 平均スコアは HMD を用いた条件 B, D が高くバラつきも小さい結果となり, t 検定による有意差検定の結果, それぞれ同じ操作条件の A, C と有意差が見られた. しかし, A-C 間, B-D 間では有意差が見られず, 操作条件の違いによる影響は見られなかった. プレイ時間については, HMD を用いた場合のほうがより長くゲームを続けていることがわかる結果となった. 球の打ち返し回数については, 条件 A が最も大きい結果となった. ここで, スコアの結果と合わせてみると, 条件 B, D は条件 A よりも高得点を取っているにも関わらず球を打ち返した回数は A よりも少ないということがわかる. これは, より少ない手数で高得点をあげているということであり, HMD による空間立体視により, 球との位置関係を正確に把握し, プレートで的確に球を打ち返すことが可能になったのだと考えられる.

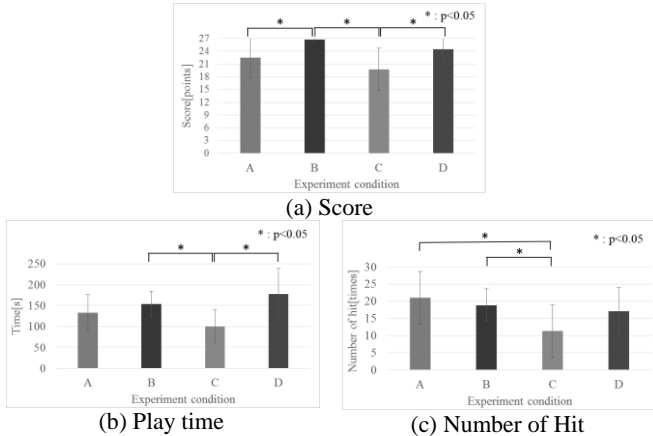


Fig.4 Experimental result of work performance

印象評価アンケートの結果を Fig.5 に示す. 条件 B, D は全項目で評価点が 3 以上の高評価であり, 特に[1]空間把握と [4]満足感では 4 以上という非常に高い評価を得ていることから, HMD により空間把握が容易となり, 作業の印象が良くなったのだと考えられる. [2]操作感の結果を見てみると, 同じ操作条件である A-B 間, C-D 間で評価が大きく異なっており, HMD を用いた場合のほうが良い印象になっていることがわかる. このことから, 仮想空間での操作感は視覚情報の提示手法の影響を受けるのだと考えられる. 条件 C は全体的に評価が低めであったが, [5]満足感が高い評価となった.

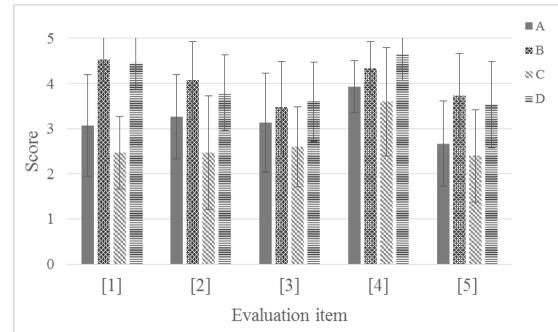


Fig.5 Experimental result of the questionnaire

ゲームプレイ時の心拍数と安静時の心拍数の差を加算平均した結果を Fig.6 に示す. 条件 A, B はゲームプレイ時と安静時においてほとんど心拍数に差がなく, 条件 C, D はゲームプレイ時に心拍数が増加しており, 直接的身体動作の利用が心拍に影響を与えていることがわかる. アンケートで条件 C の満足感の評価が高いことに加え, 人は心拍数が増加すると高揚した状態になることから, 直接的身体動作を仮想空間での作業に用いることにより, 作業の印象が向上する可能性が考えられる.

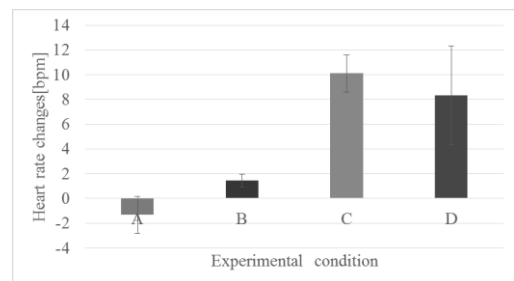


Fig.6 Experimental result of heart rate changes

4. 振動触覚コミュニケーションの評価実験

振動触覚によるコミュニケーションが仮想空間での共同作業に与える影響を明らかにするため, VR ブロック崩しを用いて検証実験をおこなった.

5.1 実験設定

被験者は二人一組のペアで VR ブロック崩しを振動触覚提示あり・なしの 2 条件でおこなう. 順番の影響を考慮して, 振動触覚あり・なしの順番はペアごとにランダムに決定して実施する. 定量評価としてスコア, プレイ時間, 球を打ち返した回数, ジェスチャ回数, プレートのパス回数, イベント発生時の時刻を記録し, 主観評価として被験者は実験後, ゲームの印象に関する SD 法によるアンケートに回答し, NASA-TLX⁽⁵⁾を用いたメンタルワークロード(MWL)の測定をおこなう. NASA-TLX は作業負担の大きさを評価するツールであり, 作業負担が大きいほどスコアは大きくなる.

実験は 20 代の男女 8 名でおこない, 被験者には実験前に

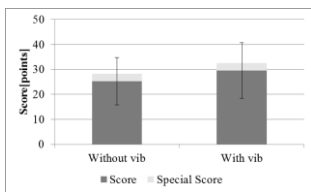
口頭でゲームに関する説明をし、ゲームに十分に慣れるまで練習時間をもうけた。

5.2 実験結果

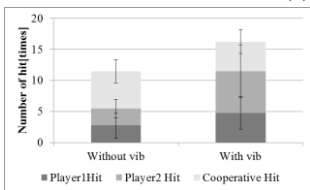
Fig.7 に(a)スコア, (b)球を打ち返した回数, (c)プレイ時間, (d)パス回数, (e)ジェスチャ回数の結果を示す。t 検定による有意差検定の結果、振動なし・ありの2条件間において有意な差は確認できなかった。しかしながら、ジェスチャ回数の結果から、ジェスチャ時に”Hey PASS”が画面表示されるだけの振動なし条件と比較して、画面表示と共にグループから振動が提示される振動あり条件で多くジェスチャがおこなわれていることが確認できた。このことから、振動触覚の利用により、ユーザ間の積極的なコミュニケーションが誘発されたことがわかる。

Fig.8 にアンケート結果を示す。アンケート結果に対して t 検定による有意差検定をおこなったところ、「自然な-不自然な」、「にぎやかな-さびしい」、「楽しい-苦しい」、「滑らかな-ぎこちない」、「本当の-嘘の」、「面白い-つまらない」、「生き生きした-生気のない」の形容詞対において有意差が確認された。また、自由記述において、振動触覚により「相手のパス要求がはっきり伝わった」、「パスを要求されたとき、相手の存在を感じた」などの意見を得られた。このことから、三次元 VR ゲームでのコミュニケーションに振動触覚を用いることにより、ユーザに他者の存在をよりリアルに感じさせ、協力ゲームの楽しさを向上させることが確認できた。

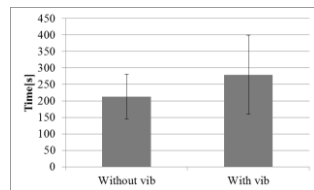
Fig.9 に MWL の WWL の結果を示す。MD (精神的要求), EF (努力), FR (フラストレーション), AC (作業成績) の評価項目において、振動ありの場合のほうが振動なしの場合より値が小さく、良い成績であることが確認できる。また、t 検定による有意差検定の結果、AC において有意差が確認できた。MD, EF, FR, AC の評価が向上した理由として、振動触覚を使用した場合、プレートとの接触状態、相手からのパス要求を目視で確認する必要がないことが挙げられる。ユーザは振動触覚により、自分とパートナーのプレートの接触状態や相手からのパス要求を即座に認識することができるため、球に注意を向けつつパートナーとスムーズに協力できたのだと考えられる。



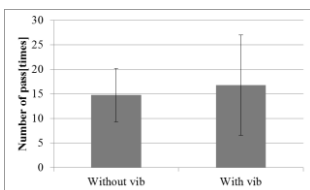
(a) Score



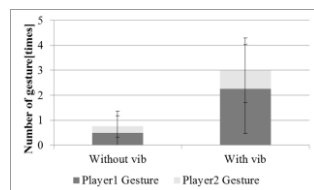
(b) Hit



(c) Play time



(d) Pass



(e) Gesture

Fig.7 Experimental result of work performance

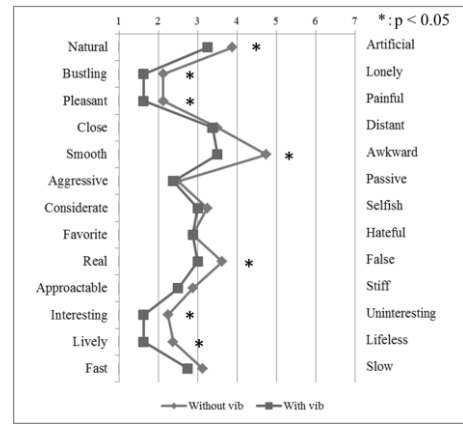


Fig.8 Questionnaire result

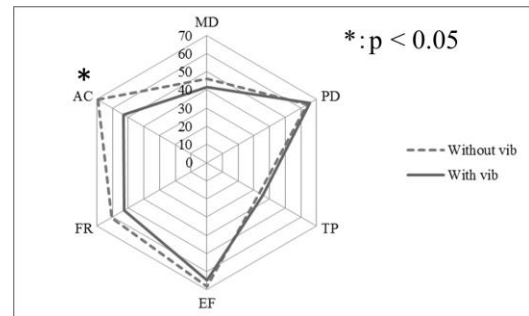


Fig.9 WWL's factors

6. おわりに

本研究では、没入型 HMD による両眼視差立体視と距離画像センサによるユーザの身体動作計測を統合し、実空間での身体動作を操作に直接利用し、二人のユーザが振動触覚によりコミュニケーションをおこなう協力型三次元 VR ゲーム「VR ブロック崩し」システムを構築した。

VR ブロック崩しを用いた評価実験から、仮想空間での作業において、空間立体視が作業成績の向上に寄与し、直接的な身体動作の利用が作業の印象を向上させることが示された。また、振動触覚コミュニケーションを用いることにより、他者の存在をよりリアルに感じさせ、協力ゲームの楽しさを向上させることが示された。

今後の課題として、身体動作計測の精度の向上や、より豊かなコミュニケーション実現のため、振動触覚情報、および振動パターンの追加などが挙げられる。

参考文献

- (1) Péter Galambos, et al., Virca net: A case study for collaboration in shared virtual space, Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2012 IEEE 3rd International Conference on(2012), pp.273-277.
- (2) 高林範子, 山本真代, 小野光貴, 渡辺富夫, 石井裕, 人間工学, 52-3(2016), pp.112-123.
- (3) Liu, L., Liu, G., Zhang, Y., Guo, W., Lu, K., Zhou, M., In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on(2011), pp.913-918.
- (4) J.K. Salisbury, M.A. Srinivasan, Phantom-based haptic interaction with virtual objects, IEEE Computer Graphics and Applications, 17-5(1997), pp.6-10.
- (5) S. Miyake, M. Kumashiro, Subjective mental workload assessment technique-An introduction to NASA-TLX and SWAT and a proposal of simple scoring methods, The Japanese Journal of Ergonomics(1993), 29-6, pp.399-408.