Illusory Control:人の意思と時間を錯覚により制御する遠隔操作手法

A Teleoperation method using the illusion of human intention and time

○青木　惇季（(株) リコー）　正　山科　亮太（(株) リコー）　正　倉爪　亮（九州大学）

Junki AOKI, Ricoh Co. Ltd., junki.aoki@jp.ricoh.com
Ryota YAMASHINA, Ricoh Co. Ltd.
Ryo KURAZUME, Kyushu University

Shared control, in which teleoperation and autonomous control are mixed to move the robot, is expected to improve the efficiency of the user's teleoperation operation. However, there is a problem that the user's acceptability decreases due to the conflict of intention between teleoperation and autonomous control. In this paper, we address this problem by providing an illusion to humans. We proposed a teleoperation method called "Illusory Control" that can achieve both mobility efficiency and user acceptance by implementing a cyber-physical system that controls a robot in a real space through robot operations in a virtual space. Illusory　Control has two functions: one is "Illusion of Intension", which gives the illusion that the robot is operating according to human intention, and the other is "Illusion of Time", which gives the illusion of time to fill the gap by changing human behavior when the positions of the robot in the virtual space and the robot in the real space diverge.

***Key Words*:** Human Robot Interaction, Human Computer Interaction, Teleoperation, Shared Control

1.　はじめに

近年の労働力不足や在宅勤務の増加を背景に，遠隔地からロボットを操縦する遠隔移動ロボットの活用が盛んである．遠隔移動ロボットとは，例えば，カメラやマイクなどのインターフェースを搭載した移動可能なコミュニケーションロボットのことを指す．

遠隔地から移動型ロボットを操縦する際，通常は人間の操縦に加えて，ロボットに搭載したセンサなどにより障害物を検出し，ロボットが自律的に回避，あるいは停止するなどの安全システムが備えられている．人間の操縦とロボットによる自律性を共有しながら移動タスクを効率的に達成するこの仕組みは, Shared Control として研究されており, 例えば Double Robotics 社のコミュニケーションロボット Double などでも実用化されている．しかし，実際にカメラ画像を見ながらロボットを操縦してみると，操縦者が気付かない程度の障害物にロボットが反応し，操縦者は自分が出した指令通りにロボットが移動しない，あるいはロボットが予想外の動きをするなど，強いストレスを感じる場合がある．これは Fig. 1 のようにロボットが出す移動指令と人間が出す移動指令が一致していないことにより発生する．過去の研究においては，操縦者の判断とロボットの判断が一致しないことにより，操縦者はロボットに対する受容性（システムに対する信頼感）を低下させる要因になることが挙げられている[1].

Shared Control の研究はタスクの効率向上が多く研究されているが，近年ではこの受容性低下の問題に着目されるようになってきている．この受容性は，人間がシステムを受け入れられるかを左右する重要な要素となっている[2][3]．本研究では，目標とするタスクの実行効率を担保しつつ，この受容性低下を解消することを目的とする．

受容性低下の問題に対する理想的な解決策は，ロボットは操縦者が気付かない障害物を（操縦者に悟られないように）自動で回避しつつ，操縦者はその回避行動自体に気づかず，自分の意のままにロボットが動いていると感じられることである．しかしロボットに自律性を持たせる限り，実際にはこれは不可能である．なぜなら，ロボットが勝手に動いているという感覚は，操縦者のコマンドとロボットの挙動が一致しない場合には，必ず生じるからである．

そこで，本研究では，人間の意思どおりにロボットを動作させられているという錯覚を与える Illusory Control と名付ける（心理学でいう Illusion of Control[5]の名称に由来する）手法によって，この問題の解決を試みる．錯覚を与えるためには，実空間をコピーした仮想空間を用いて，人間にはその仮想空間上を遠隔操作させることで実現する．仮想空間においてロボットの自律性は考慮せず，あくまで人間は自分自身で意のままにロボットを操縦させることができる．そして，仮想空間において人間が行った遠隔操作に追従するように，実空間にいるロボットが自律移動させる．実空間上での走行においては，障害物や人に対する安全性の観点から，自動で障害物を回避したり，衝突を予知して自動で止まったりする機能を備える．

本研究では，このアプローチを用いて，ロボットの遠隔操作におけるタスク効率と受容性を担保できることを目的とする．

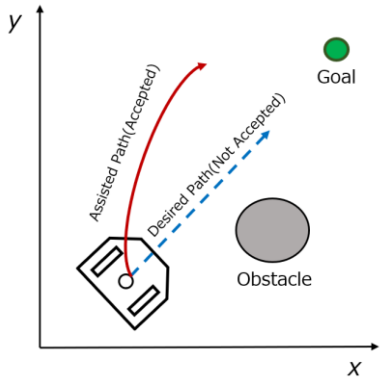

Fig.1 Mismatch between human intention and robot intention

2.　Illusory Control

人間とロボットが協調しあい，対象をコントロールする制御手法は総じて Supervisory Control と呼ばれている[4]. その中で，人間とロボットが制御権限を交換しながら対象をコントロールすることを Traded Control といい，一方で人間とロボットが制御コマンドを混合しながら 1 つの対象を制御すること

を Shared Control という．本研究のシステムは後者の Shared Control の考え方がベースとなっているが，本研究で提唱する Illusory Control は，仮想空間での制御結果を以て実空間のロボットを制御する，またはその逆に，実空間の状態を仮想空間にフィードバックすることで環境が人間を制御する，Traded Control と Shared Control の手法に並ぶ新しい制御手法である．

第 1 章で述べたように，遠隔移動ロボットの移動に際して，人が違和感を覚えるのは，自分の指令通りにロボットが動いていないと感じたときである．これを避けるには，ロボットが思い通りに動いていないことを操縦者に感じさせないか，操縦者に気付かれないように操縦者の指令自体を変えるか，のいずれかであると考案した．

まず第 1 に，ロボットが思い通りに動いていないことを操作者に感じさせないために，Illusion of Intention という機能を提案する．たとえロボットが自動的に障害物を避け，時には静止したとしても，人にそれを知らせなければ，人は思い通りに順調に操縦しているように錯覚するだろう．つまり，実際に動作するロボットは自動的に障害物を避けたり，静止したりと，安全に配慮した行動をとるが，その映像を人間には提示しないことで，人間の意思通りにロボットが動いていると感じさせる．

次に，操縦者に気付かれないように操縦者の指令自体を変えるための手段として，Illusion of Time という機能を提案する．前述した Illusion of Intention の問題は，時間の経過とともに，人間が操作するロボットと，実際に動作するロボットの位置の差異が生じることである．そこで，位置の差異を縮めるために，操作者の指令を，時間をかけてシステム側に無意識的に誘導する必要がある． これに対して，操縦者に気付かれないように操縦者の指令や操作者が知覚している環境を変えることで，操縦者の思考を乗っ取り，実際にはシステム（ロボット）の意図に合うような指令を出しているにも関わらず，あたかも操縦者が自分の意思でロボットを操縦しているように錯覚させることで解決する．

2.1-2.2 にて，前述した Illusion of Intention と Illusion of Time の実現手段について詳述する．

2.1 Illusion of Intention

提案システムでは実空間と，その実空間をセンシングした 3D モデルで再現した仮想空間をそれぞれ構築することで実現した．また，ROS を用いて仮想空間のロボットを制御するためのモジュール群と実空間を制御するためのモジュール群を準備し，双方が位置情報をインタラクションしながら機能を実現する．システムのコンセプトを Fig.2 に，モジュール構成を Fig.3 に示す．

まず，人間は仮想空間にあるロボットに対して操作コマンドを送り，ロボットの移動を行わせる．人間の操作によって移動した仮想空間上のロボットの現在位置を推定する．そして，推定した仮想空間上のロボットの現在位置を実空間のモジュール群へ伝達する．

次に，実空間上のモジュール群は，仮想空間から受け取った現在位置をゴールとし，ナビゲーションを行う．ナビゲーションは ROS の Navigation Stack を用いて実現している．Navigation Stack は，ゴールポジションを与えられると，そのゴールに対してダイクストラ法に基づくパスプランニングを行い，Dynamic Window Approach によって障害物回避を行いながら自律移動を行う．実空間上で，ロボットのナビゲーションが行われる間にも，ユーザが仮想空間の遠隔操作を続けることによって仮想空間のロボットの現在位置は逐一変化する．そのため，仮想空間上のロボットの移動量に基づいて，前回推定した位置からある閾値以上移動した場合に，新たな現在位置を実空間のモジュール群へ伝達する．実空間上のモジュール群は，位置情報を与えられると，ゴール地点をアップデートし，新たなパスプランニングを行ってナビゲーションを再開する．

この構成により，操作者は仮想空間において，自分の意思通りにロボットが動作していると錯覚させつつ，安全に実空間での自律移動ができる．

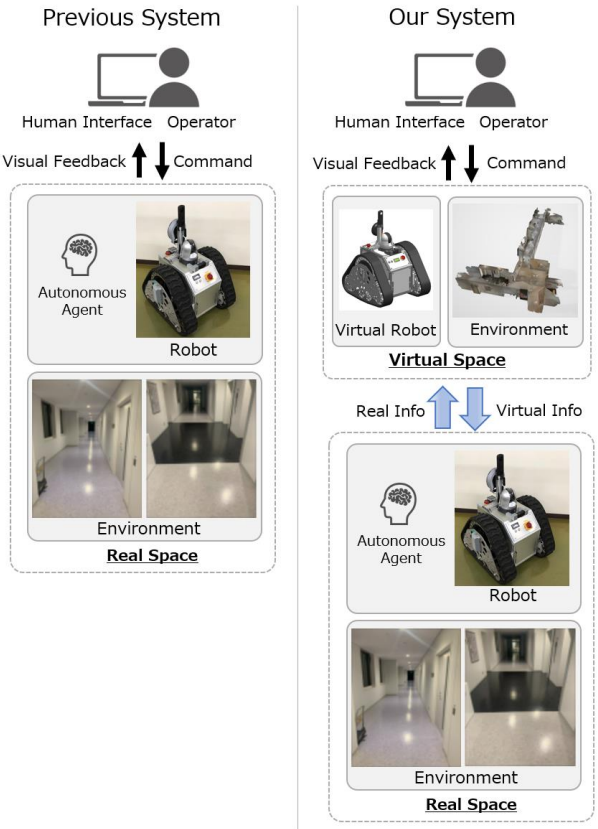

Fig.2 System Concept

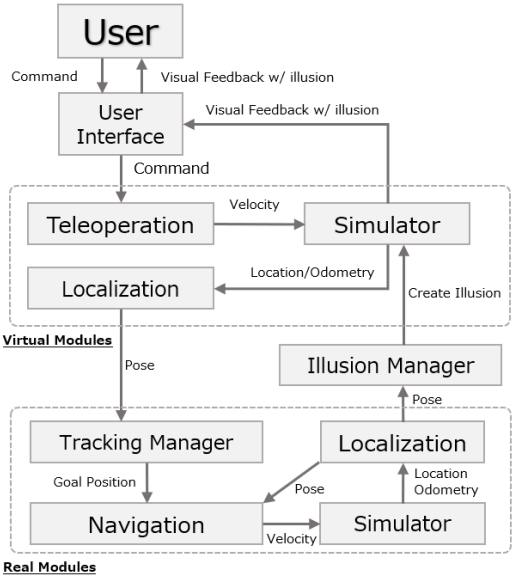

Fig.3 System Architecture

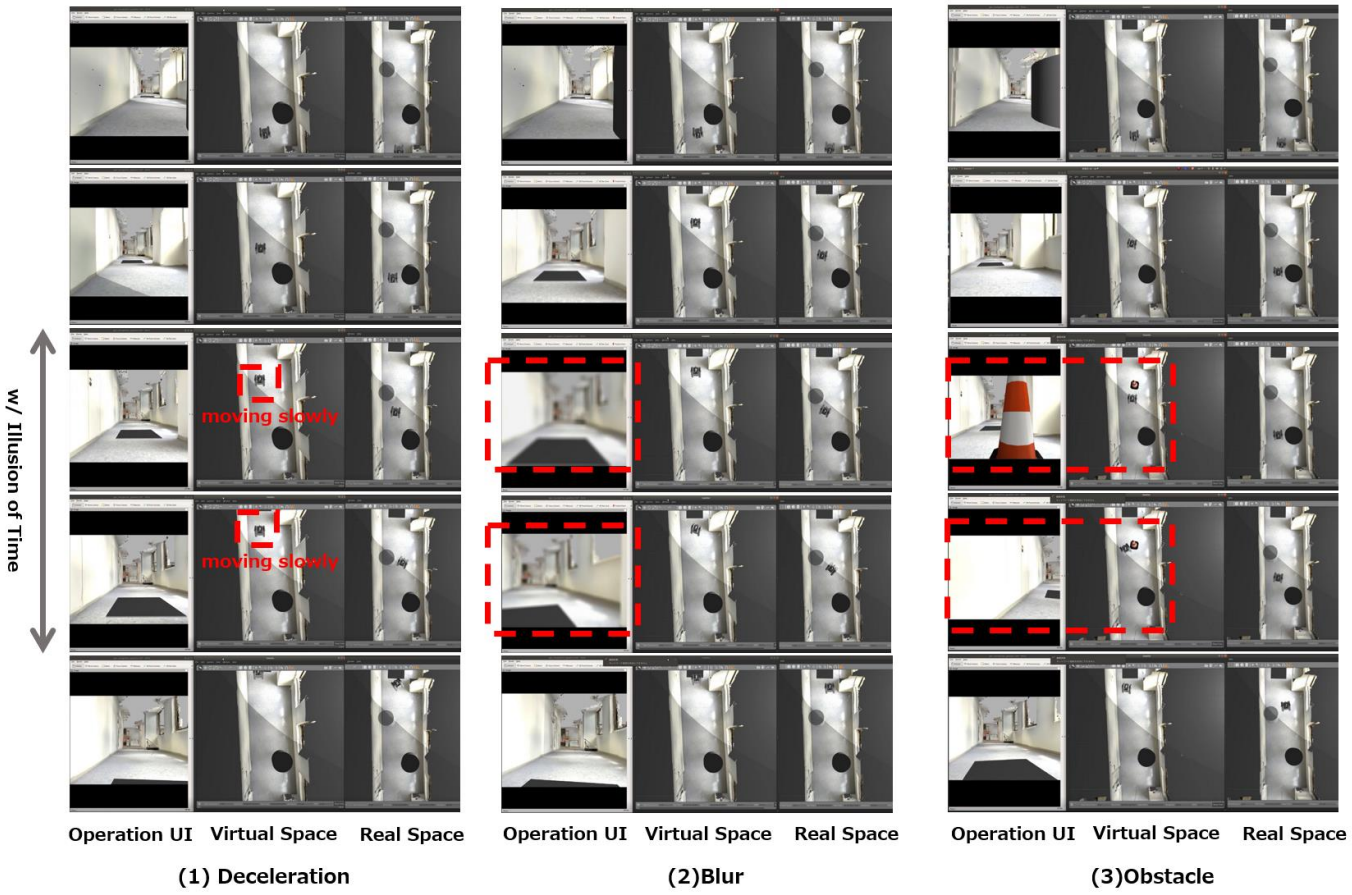

Fig.4 Validation result of Illusory Control

2.2 Illusion of Time

前述のように，Illusion of Intention を用いて遠隔操作を行うと，仮想空間と実空間のロボットの位置に差異が生じる．そのため，時間をかけてこの差異を縮めるように，人間を無意識的に誘導する．Illusion of Time の機能が働くタイミングは，仮想空間のロボットと実空間のロボットの現在位置に基づいて決定される．仮想空間上のロボットと，実環境上のロボットの距離がある閾値を超えた際に，Illusion of Time の機能が動作する．本研究では，Illusion of Time 機能の実現手法を 3 つ考案し，比較実験を行った．2.2.1-2.2.3 にて，該実現手法について詳述する．

2.2.1 Deceleration Method （減速手法）

これは，仮想空間のロボットと実空間のロボットの距離に応じて，仮想空間のロボットの移動をだんだん減速させる手法である．仮想空間上のロボットの移動速度が減速することで，実環境上のロボットが仮想環境上のロボットに近づくまでの時間を待ち合わせる効果がある．

2.2.2 Blur Method（ぼかし手法）

これは，仮想空間のロボットと実空間のロボットの距離に応じて，ユーザが仮想空間の状況をだんだん知覚しづらくなっていくという手法である．ユーザは遠隔操作アプリケーション越しに仮想環境を知覚し，遠隔操作を行うが，仮想空間の映像をぼかして知覚させづらくすることで，障害物の間を縫って走行することが難しくなったり，目先にあるゴールを知覚しづらくなったりという効果が見込める．その結果として，ユーザが自身の意思で，仮想空間上のロボットを遠隔操作するスピードを落とす効果が見込める．その結果，仮想空間，実空間双方の距離が縮まるまでの時間の調整が行われる．

2.2.3 Obstacle Method（障害物手法）

これは，仮想空間のロボットと実空間のロボットの距離がある閾値を超えたときに，仮想空間上でユーザが操作するロボットの目の前に障害物を提示する手法である．目の前に障害物が生成されることにより，ユーザは自分の意思で障害物を回避する手順が発生する．この障害物を回避する手順を踏んでいる間に，実環境上のロボットが仮想環境上のロボットの位置に近づくまでの時間を待ち合わせる効果がある．

3. 実験

3 章で示した本システムが動作することのシミュレーションによる動作検証実験を行った．また，9 人の被験者にシステムを利用してもらい，使用感に関するインタビュー調査を行った．本稿では機能コンセプトの検証のため，実空間と仮想空間を双方とも Gazebo 上に構築してプロトタイプを実現した．以上で説明した Illusory Control の各機能が動作する様子を Fig.4 に示す．

Fig.4 の 1 コマ中の左側が，操作者が操作中に見るユーザインタフェースの画面である．ユーザインタフェースの画面には，1 コマ中の真ん中に配置されている仮想空間を想定した環境の様子がフィードバックされる．ユーザはこの画面を確認しながら仮想環境を知覚し，コントローラによって進行方向の指示を行う．ユーザからの進行方向指示に従って仮想空間のロボットが移動を行う．また，1 コマ中の右側は実空間を想定した環境であり，仮想空間のロボットの情報を受けて，ロボットが自律移動を行っている．

1 列目は減速手法，2 列目はぼかし手法，3 列目は障害物手法で動作させた様子を示している．それぞれ，3 行目 4 行目の

区間において，実空間のロボットと仮想空間のロボットの距離が離れてきたことを受けて，それぞれの手法による機能が作用している．

減速手法に関しては，ほとんどの被験者が，ロボットが減速したことに気がついた．減速することにストレスを感じたと述べる被験者がいる一方，他の手法と比べて視覚的な変化がないことから，安心して利用できるという意見が得られた．

知覚抑制手法に関しては，本手法の機能を知っている人と知らない人で違いが見られた．機能を知らない人は，一時的に自分の意思で減速する効果が見られたが，機能を知っている人については，機能が発動しても減速するような効果が見られなかった．このように，前提知識や習熟度に応じて錯覚提示の手法を切り替える手段について検討の余地がある．

障害物生成手法に関しては，目の前に障害物が現れることに対する驚きがあるものの，その後のアクションは障害物を避けるということが明確であるため，説明不要で使用できるという意見が得られた．

また，ROS の Navigation Stack を用いた自律移動に関しては課題があることがわかった．本稿のプロトタイプでは，仮想空間にあるロボットの現在位置に対して，現実空間のロボットが追従するという構成である．そのため，仮想空間を操作するユーザが，実空間ではありえない位置（例えば，実環境上では障害物があるが，仮想環境上では障害物がない位置）にいた場合には，実空間のロボットがグローバルパスを算出することができない問題があることがわかった．これは，実空間では成し得ない行動を仮想空間で人間がとっていることに起因しているものである．そのため，この問題に対して，ユーザの辿った軌跡の情報に基づくものの，ユーザの行動を適度に信用せずユーザの意思（ゴール地点）を推定して，実空間のロボットがパスプランニングを行うよう，ナビゲーションアルゴリズムの改善を行う．

今回実験したそれぞれの手法において，人間が受ける感覚は異なり，個人差があることがわかってきている．今後は，移動タスク効率の評価やユーザが受ける印象に関するアンケートによる定量評価を行い，従来の遠隔操作手法と比較して有意性を検証する予定である．

4. 結論

遠隔操作ロボットにおける移動タスク効率とユーザの受容性を向上するために，Illusory Control という新しい制御手法を提案し，提案した機能がシミュレータ上で動作できることの検証を行った．本稿では，実空間を想定したシミュレータ環境を構築して動作検証を行ったが，今後は実空間でロボットの実機を動作させ，検証する予定である．

本稿では，3 つの Illusion of Time の機能を提案したが，これらの機能のことを知っている人と知らない人であったり，操作に慣れた人やそうでない人であったりと，前提知識や習熟度によって印象の違いが表れる可能性がある．そこで，これらの条件に合った複数の被験者に対して実験を行い，違いが表れるかどうかを検証する予定である．

また，現状システムにおいて，仮想空間を操作するユーザが，実空間ではありえない位置（例えば，実環境上では障害物があるが，仮想環境上では障害物がない位置）にいた場合には，実空間のロボットがグローバルパスを算出することができないという問題がある点に対しては，ナビゲーションアルゴリズムの改善を今後行っていく．

参考文献

[1] Hiroyuki Tokushige, Takuji Narumi, Sayaka Ono, Yoshitaka Fuwamoto, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, "Trust Lengthens Decision Time on Unexpected Recommendations", Human-agent Interaction, (2017), pp.245-252.

[2] C. Brooks and D. Szafir, "Visualization of Intended Assistance for Acceptance of Shared Control," 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 11425-11430, 2020.

[3] A. D. Dragan and S. S. Srinivasa, "A policy-blending formalism for shared control", The International Journal of Robotics Research, vol. 32, no. 7, pp. 790-805, 2013.

[4] T.B. Sheridan, "Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control", MIT Press, 1992.

[5] Langer, E. J. (1975). The illusion of control. Journal of Personality and Social Psychology, 32(2), 311–328, 1975.