



サドル型歩行デバイスを用いた歩行動作による 移動ロボットの遠隔操作

Remote Control of Mobile Robot by Walking Motion Using Saddle Type Device

久米俊輔¹⁾, 坂口正道²⁾

Shunsuke KUME and Masamichi SAKAGUCHI

1) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, s.kume.272@stn.nitech.ac.jp)

2) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, sakaguchi.masamichi@nitech.ac.jp)

概要: 我々はサドルに座り体重を免荷しつつ実際の歩行と同様の動作が可能なサドル型歩行デバイスを開発した。また、これまでに我々は直感的な操作を実現すべく、ユーザーの頭部および手の動きをもとに移動ロボットの方向制御を行う方法を確立した。本研究では、より直感的な操作の実現に向けて新たにユーザーの足の動きによる方向制御方法について提案する。

キーワード: 遠隔操作, 移動ロボット, ロコモーションインタフェース, 方向制御

1. はじめに

テレグジスタンス (telexistence) とは現存する場所とは異なる場所に人間が実質的に存在し、その場所で自在に行動する存在拡張の概念であり、それを可能とするための技術体系である[1]。これまではテレグジスタンスの活用例としてロボティクスと複合し、時間的および空間的制約から解放したシステムが数多く開発されてきた。その分野において、ロボットに限定した作業は当然のこと、より容易かつ直感的に遠くのものを見たい、触りたい、動かしたい、という人間の自己拡張願望からの欲求を満たすべく、ロボティクスと融合させたテレグジスタンスの適用分野は今後も拡大することが考えられている[2]。

その中で我々は体重を免荷しつつ実際の歩行と同様の動作が可能なサドル型歩行デバイス[3][4]を使用して、より容易にかつ直感的に移動ロボットを遠隔操作する上で身体動作を採用した。サドル型歩行デバイスの外観を図1に示す。これまでに我々は移動ロボットの前進を行う遠隔操作の実現のため身体動作の中でも歩行動作に着目し、ユーザーの歩行動作と移動ロボットの動作が連動するアルゴリズムを構築した[5][6]。また、移動ロボットの自由度を高めるため、HMDやVIVE Controller (以降 Controller と呼称) を用いてユーザーの頭部や手の動作から移動ロボットの方向制御を行うアルゴリズムも構築した[7]。

本研究では身体動作の中でも我々の普段の歩行の中で本能的に実施している、足を出した方向へ行き先を転換す



図 1: サドル型歩行デバイス

る動作をサドル型歩行デバイス上で行う、より直感的かつ自然な移動ロボットの方向制御方法を提案する。

2. システム構成

本研究で構成するシステムの全体像は大きく「操作部」と「ロボット部」の2つに大別することができる。

2.1 操作部

操作部はサドル型歩行デバイス上のユーザーの歩行動作を操作入力として、離れたロボット部における後輪駆動かつ前輪はステアリング操作可能な4輪移動ロボットへ向けて操作コマンドを送信する。我々はこの処理の実行のため、ユーザーの足首にVIVE Tracker (以降 Tracker と呼称) を取り付けて歩行動作のトラッキングを行い、SteamVRを搭載したコンピュータを経由してユーザーの動作と対応した操作コマンドを移動ロボットへ送信する。操作コマンドについてはユーザーの足首に取り付けた Tracker で取得した位置および速度値に応じて変化する。本研究で取り扱う操作コマンドの一覧は以下の表1に示す。なお、こ

表 1: 操作コマンド

| コマンド名 | 機能 |
|--------|-------------|
| Left | 前輪を左に切り替える |
| Center | 前輪を正面に切り替える |
| Right | 前輪を右に切り替える |

これらの操作コマンドは SteamVR を搭載したコンピュータから Wi-Fi を用いた無線通信によって移動ロボットへ送信可能であり、伝送媒体としてモバイルルーターである Softbank 社 5G ルーター UC-5GA101-1YS を用いる。

2.2 ロボット部

ロボット部では操作部からの操作コマンドを受信可能な移動ロボットとして SunFounder 社製の PiCar-V Kit V2.0 for Raspberry Pi を使用する。移動ロボットの外観を図 2 に示す。この移動ロボットは Raspberry Pi を搭載したプログラマブルロボットであり操作コマンドの受信に加え、Python を活用した移動ロボットの挙動の決定が可能である。また、前方には 2 自由度の姿勢制御可能な USB カメラを搭載しており、このカメラ映像は操作部のユーザーが装着した HMD へ提示することも可能である。



図 2: SunFounder PiCar-V Kit V2.0 for Raspberry Pi

3. 歩行動作を用いた移動ロボットの方向制御

先述した通り、これまでに我々はサドル型歩行デバイスを用いたユーザーの身体動作によって移動ロボットの前進あるいは方向制御のためのアルゴリズムを構築した。中でも方向制御に関してはユーザーの頭部に装着した HMD や手に持った Controller で取得した各デバイスの姿勢角に応じて Left, Center, Right の操作コマンドを移動ロボットへ送信するアルゴリズムを構築し、前輪のステアリング操作を可能にした。これらの手法の場合、顔を向けた方向あるいは手を傾けた方向へ直感的に移動ロボットを方向制御することが可能である一方で、いずれもユーザー自身の下肢を動かす歩行動作とは独立した身体動作によって移動ロボットの方向制御を行っている。このような方向制御に対して、我々は普段方向転換の際に足を斜め前方に出す身体動作に倣い、サドル型歩行デバイス上の歩行動作によってより直感的で自然な移動ロボットの方向制御を考える。そこで、本章ではサドル型歩行デバイス上におけるユーザーの歩行動作による方向制御方法および方向制御アルゴリズムについて説明を行う。

サドル型歩行デバイス上におけるユーザーの歩行動作

による移動ロボットの方向制御方法について、前進や停止を行う場合と同様にユーザーの足首に装着した Tracker を用いてリアルタイムで取得する位置および速度値をもとに操作コマンドを移動ロボットへ送信する。すなわちユーザーは Tracker を装着した足の動きに応じて後輪駆動の切り替えや前輪のステアリング操作を一元的に行う。

移動ロボットの方向制御アルゴリズムに関して図 3 にサドル型歩行デバイスを基準とした Tracker の位置座標系を示す。本座標系について、ユーザーの足を前後に動かす長手方向に z 軸、 z 軸と直交する軸を x 軸とし、足を後ろから前に出す方向、左から右に出す方向を各座標軸の正とする。また、 z 軸と x 軸が直交する原点はサドル型歩行デバイスの中心部分として相当するように設定する。

次にアルゴリズムの詳細としては時間的および空間的に一定間隔を空けつつ取得する、ユーザーの足首に装着した Tracker で取得した 2 点の位置座標から割り出した角度 θ [°] をもとに移動ロボットの前輪のステアリング操作を行う。ステアリング操作を行う場合の主要なパラメータとなる θ の導出手法については図 4 を用いて説明する。 θ の導出にあたり、Tracker で取得する 2 点をそれぞれ P_1 、 P_2 とする。また、各点の位置座標はそれぞれ $P_1(x_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, z_2)$ とする。さらに、2 点の位置座標を取得する際には P_1 を取得した後にプログラム上で先述した一定間隔の待機時間を設け、続けて P_2 を取得するようにした。なお、 P_1 を取得した後に P_2 を取得して θ の導出までに要する時間は Python を用いて Tracker の位置座標を 1500 回取得することに要する時間として設定し、実際の時間としては約 0.3 秒程度である。しかしながら、 θ を導出する上で Tracker が電気的ノイズを原因とした外れ値となる位置座標を取得した場合に θ は不安定な値となる。そこで、我々は θ の導出に必要な 2 点の位置座標について直接的に 1 点ずつ取得するのではなく、取得した複数点の位置座標の平均とした 2 点 $\overline{P}_1(\overline{x}_1, \overline{z}_1)$ 、 $\overline{P}_2(\overline{x}_2, \overline{z}_2)$ から導出することを考える。なお、本研究では位置座標を 5 回取得した平均として \overline{P}_1 、 \overline{P}_2 を導出する。加えて、 θ の導出に必要な、Tracker で取得した 1500 個の位置座標の中で \overline{P}_1 は 1 個目から 5 個目、 \overline{P}_2 は 1496 個目から 1500 個目に取得した位置座標の平均となる点である。以下に 2 点 \overline{P}_1 、 \overline{P}_2 から θ を導出する式を示す。

$$\theta = \text{Arctan}\left(\frac{\overline{x}_2 - \overline{x}_1}{\overline{z}_2 - \overline{z}_1}\right) \quad (1)$$

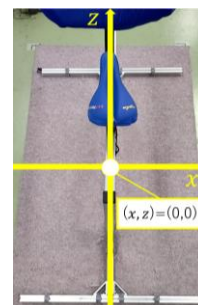


図 3: Tracker の座標系

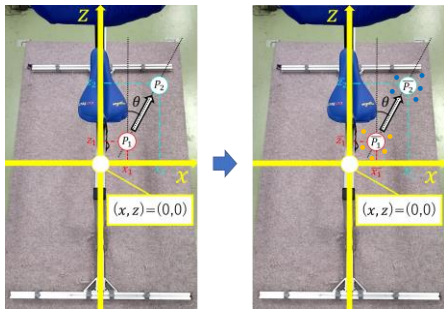


図 4 : θ の導出手法

式 (1) で導出した θ から移動ロボットに向けて操作コマンドを送信する部分については θ の値に対して閾値を設け、 θ の値に応じて Left, Center, Right を送信する。また、予め設定した θ の値に対する閾値は操作コマンドを送信する際の移動ロボットの前輪が切り替わっている向き（正面、左、右）によって異なる。これは本アルゴリズムにおいて、電子回路分野におけるヒステリシスを持ったシュミットトリガと同様な性質を導入しているためである。これは電子回路分野におけるシュミットトリガにおいて、回路素子を工夫して低電位から高電位に変化する際の閾値と高電位から低電位に変化する際の閾値を異なる値に設定することと同様に、サドル型歩行デバイス上のユーザーが移動ロボットの方向制御を行うにあたり移動ロボットの前輪を正面から左右に切り替える際の θ の閾値と左あるいは右から正面に切り替える際の θ の閾値を異なる値として設定するということである。このように電子回路分野におけるヒステリシスのような閾値の差分を設ける理由としては、閾値を一律で設けていた場合において θ の値が閾値付近にある場合、 θ の値のごく僅かな揺らぎによって移動ロボットへ送信される操作コマンドが小刻みに変化するためである。そこで、前輪が切り替わっている向きに応じて異なる θ の閾値を設けることで θ の揺らぎに対してより安定した操作コマンドを送信することが可能となる。本アルゴリズムにおける θ の閾値については 25° および 15° の 2 種類を採用した。移動ロボットの前輪が正面に切り替えられている場合、 θ が 25° を超過すると Right、 -25° を下回ると Left を送信し、 θ の絶対値が 25° 以下である場合には前輪は正面に切り替わった状態を維持する。その一方で、移動ロボットの前輪が右 (左) に切り替えられている場合、 θ が -25° を下回る (25° を超過する) と Left (Right)、 θ の絶対値が 15° を下回ると Center を送信し、 θ の絶対値が 15° 以上で前輪は右 (左) に切り替わった状態を維持する。そして、操作コマンドを移動ロボットへ送信した後は再度 2 点 P_1, P_2 を定めて新たに θ を導出する段階へ移行する。つまり、Tracker の位置座標から θ を導出後、 θ の値に応じて各操作コマンドを移動ロボットへ送信することを繰り返し、リアルタイムな前輪のステアリング操作を実現する。

最後に本アルゴリズムの全体像を表すフローチャートを図 5 に示す。なお、図 5 中の C は足に装着した Tracker によって位置座標を取得した回数に相当する。

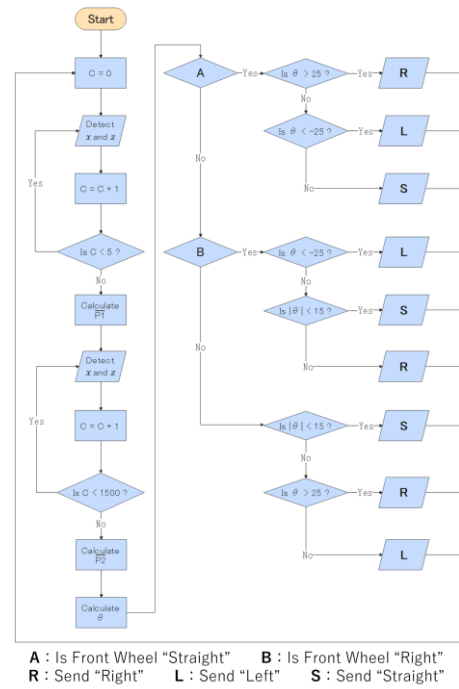


図 5 : Tracker を用いた方向制御のアルゴリズム

4. アルゴリズムの有用性の検証

本章では前章で説明した方向制御アルゴリズムの有用性について検証する。前章の方向制御アルゴリズムの中でも、複数取得した位置座標の平均値を用いて導出した θ およびシュミットトリガを参考にした差分を設ける閾値設定の 2 つの工夫点 (以降座標平均&差分閾値と呼称) に着眼してアルゴリズムの有用性を検証する。

アルゴリズムの有用性の検証方法として、サドル型歩行デバイス上のユーザーは足首に Tracker を装着した状態で歩行動作を行いつつ、一定時間移動ロボットの前輪の向きを正面、左、右に維持するようにステアリング操作を行う。その際に Tracker の位置座標から導出した θ および移動ロボットに向けて送信する数値化した操作コマンドの 2 点を方向制御アルゴリズム中の座標平均&差分閾値を適用した場合と適用しない場合 (閾値は $|\theta|=20$ とし $\theta < -20$ で Left, $|\theta| < 20$ で Center, $\theta > 20$ で Right を送信) で計測する。具体的な計測方法として、計測者は 20 代男性 1 名でサドル型歩行デバイス上にて 60BPM のペースで歩行動作を行い、前輪のステアリング操作を行った。また、前輪のステアリング操作に関して、計測者は正面、左、右の順に前輪の向きを維持しつつ足を動かさず方向を変化させた。なお、移動ロボットの前輪の向きを正面、左、右の各方向へ維持する時間に関してはいずれも 8 秒程度とした。

5. 検証結果

本研究で提案した方向制御アルゴリズムの中で座標平均&差分閾値の有用性を示した検証結果を図 6 に示す。図 6 において横軸は経過時間、縦軸は数値化した操作コマンド、第 2 縦軸は θ を示す。なお、数値化した操作コマンドについて Center を送信する際には 0、Left を送信する

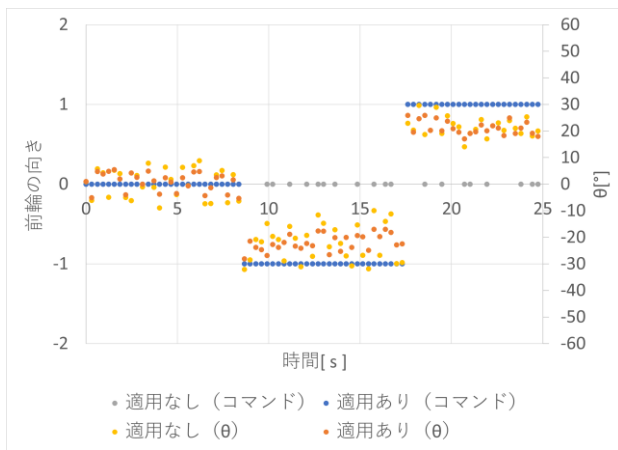


図 6：検証結果

際には-1, Right を送信する際には 1 を取得し, 取得した数値をもとに前輪の向きを変化させるものとする。

図 6 から読み取ることができるように方向制御アルゴリズム中の座標平均&差分閾値の適用の有無に応じて経過時間に対する θ および数値化された操作コマンドは異なる。前者に関しては座標平均&差分閾値の適用が無い場合と比較してばらつきが小さくなっている。このことは θ を導出する際に用いる 2 点の位置座標について P_1 と P_2 のように直接的な 1 点ずつの位置座標からではなく、 \bar{P}_1 と \bar{P}_2 のようにいずれも 5 点の位置座標の平均値から θ を導出することで Tracker を用いて位置座標を取得する際に生じる電氣的ノイズや取得した位置座標の誤差による影響を軽減し, ユーザーの足の動きが成す θ の真値により近づいているためであると考えられる。

後者に関しては座標平均&差分閾値の適用が無い場合と比較して操作コマンドを正確に送信する精度が格段に向上した。座標平均&差分閾値の適用が無い場合において, ユーザーが移動ロボットの前輪を左および右に転換した状態を維持するステアリング操作を行う際に Center が断続的に送信されていることを読み取ることができる。この状態はユーザーが斜め前後に足を動かしつつ歩行動作を行っているにも関わらず移動ロボットの前輪が途切れ途切れに正面に転換する瞬間があることを示している。これに対して座標平均&差分閾値を適用することで, θ の値のばらつきをより小さい状態に保ちつつ, θ のごく僅かな揺らぎによる操作コマンドの小刻みな変化の影響を大きく軽減することができる。グラフからも確認することができるように左右へのステアリング操作を実行する際に θ の値は $\pm 20^\circ$ 前後を取得している。座標平均&差分閾値の適用が無い場合においては閾値を少しでも前後する度に異なる操作コマンドが送信されているが, 適用した場合においては絶対値が 25° および 15° となる θ の値に対する 2 つの閾値を設定し, 一度いずれかの閾値を超過して操作コマンドを送信してから異なる操作コマンドを新たに送信するまでに数値的なゆとりを持たせることで, 閾値付近にお

ける θ の値の揺らぎを原因とした移動ロボットの前輪の向きの小刻みで断続的な変化が激減したのではないかと考えられる。また, Tracker で取得した位置座標の平均値を用いた θ の値の導出を通じて θ の値のばらつきが小さくなったことにより, 閾値を超過して操作コマンドを送信してから別の操作コマンドを送信しにくくなるといったことも移動ロボットの前輪の向きの小刻みで断続的な変化の激減に起因しているのではないかと考えられる。

以上から方向制御アルゴリズムの中でも座標平均&差分閾値の適用によって方向制御アルゴリズムの有用性を確認することができたとともにサドル型歩行デバイス上のユーザーの意図通りに歩行動作による移動ロボットの前輪のステアリング操作を実現することができた。

6. おわりに

本研究ではより容易かつ直感的な移動ロボットの遠隔操作を実現すべく前進同様に歩行動作による方向制御アルゴリズムを提案した。また, 提案した方向制御アルゴリズムに関して, 新たに導入した座標平均&差分閾値の適用の有無によって異なる θ の値や移動ロボットへ送信する操作コマンドのグラフへの視覚化を通じて有用性の検証を試みた。そして, 検証結果からは座標平均&差分閾値の適用による θ や操作コマンドの値の是正のみならず方向制御アルゴリズムの有用性を確認することができた。

参考文献

- [1] Susumu Tachi: "Telexistence", World Scientific, ISBN-13 978-981-283-633-5 (2010)
- [2] 横小路泰義: "テレロボティクスフロンティア", 日本ロボット学会誌, 30 巻, 6 号, pp. 564 (2012)
- [3] 高瀬仁翔, 坂口正道: "全力疾走可能なサドル型歩行インタフェースの提案", 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 32C-5 (2018)
- [4] 高瀬仁翔, 坂口正道: "体重免除に着目したサドル型 VR 運動デバイスの提案", 計測自動制御学会第 20 回システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 1712-1715 (2019)
- [5] Kume S., Sakaguchi M.: "Teleoperation of Mobile Robot by Walking Motion Using Saddle Type Device", HCII 2021, CCIS 1420, pp. 139-147 (2021)
- [6] 坂口正道, 久米俊輔: "サドル型歩行デバイスを用いた移動ロボットの遠隔操作に関する研究", 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3D2-8 (2021)
- [7] 久米俊輔, 坂口正道: "サドル型歩行デバイスを用いた移動ロボットの方向制御", 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3A2-08 (2021)