

人間と協調して荷物搬送を行う四輪ロボットのパワーアシスト制御

Power-assist control of a four-wheeled robot that cooperates with humans to transport luggage

電気電子情報通信工学専攻 長田 宗一郎

Department of Electrical, Electronic and Communication Engineering, Soichiro NAGATA

1. 背景・目的

近年、少子高齢化社会において人間への支援を行うため、ロボットの支援技術が望まれている。また、ロボットの中でも荷物搬送を目的としたロボットのニーズが高いも知られている。荷物搬送ロボットは大きく自律搬送型と人間協調型の二つに分けられる。自律搬送型は完全に人の手を必要としないため、労働力不足の解消には非常に有効な手段であるといえる。一方で、ロボットがあらかじめ認知できない環境での利用が困難であるというデメリットがある。人間協調型は自律搬送型に比べ、人の手を必要とするものの、人間がロボットを使用しない場合に比べて労働力不足の解決に寄与するとともに、ロボットがあらかじめ認知できない環境であっても、人間の認知機能や軌道修正能力を活用することができるため、適応的に操作することが可能になる。そのため、本研究では、人間協調型のロボットに関する研究を行っている。研究の目的は、人間とロボットが協調して荷物搬送を行う際に、ロボットの貢献度を適応的に変化させ、タスクのパフォーマンスを向上させるアドミタンスコントローラを設計することである。

2. 研究対象のロボット

研究対象のロボットは、Fig.1 に示すような四輪型ロボットである。二つの前輪は駆動力を持つ。また、駆動輪の車輪角は光学式エンコーダにより取得可能である。また、ロボットにはハンドルが付いており、ハンドルとロボットのには力覚センサがついているため、人間がロボットに印加した力を測定することができる。また、ロボットはセンサ情報のやり取りやロボットの制御に seagull を用いている。

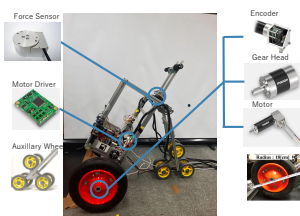


Fig. 1: Mechatronic System

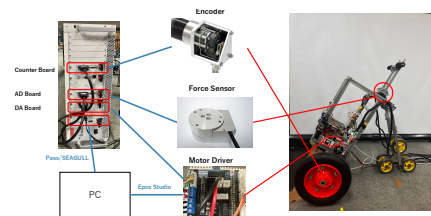


Fig. 2: Electrical System

3. 研究内容

3.1. 人間の意図の推定

3.1.1 Fuzzy Logic Controller

、Fuzzy 論理は不確実性（真実度）に関するもので、別の意味では Fuzzy 論理は人間の推論、意思決定および人間のような思考の数学的モデリングである。本研究では、人間の加減速の意図を Fuzzy Logic Controller により、定量的な値として出力する。人間がロボットを前方に押す際には、速度は正となる。このとき、人間が加速を意図している際は力の変化量が正、減速を意図している際は力の変化量が負となる。逆に、人間がロボットを後方に引く際には、速度は負となる。このとき、人間が加速を意図している際は力の変化量が負、減速を意図している際は力の変化量が正となる。そのため、本研究では、人間の意図の推定に力の変化量と速度を用いる。よって、

入力と出力に以下のような関係が成り立つような Fuzzy Logic Controller を作成した。Fuzzy Logic Controller の出力は Fig.5 のような出力になるが、ゲインを乗じることで、人間が加速を意図している際に大きくなるようにスケーリングし、減速を意図している際には小さくなるようにスケーリングするようなゲインを算出するために、数式的な処理を行う。処理を行った結果, Fig.7 のようなゲイン \mathbf{G}_H が算出される。

$$v \times \dot{F}_h > 0 \Rightarrow \{Intent : acceleration.\}$$

$$v \times \dot{F}_h < 0 \Rightarrow \{Intent : deceleration.\}$$

$$v \times \dot{F}_h \approx 0 \Rightarrow \{Intent : no change\}$$

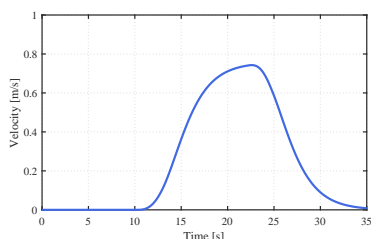


Fig. 3: Velocity

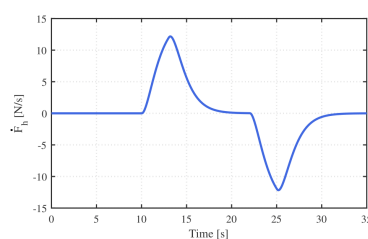


Fig. 4: Differentiation Of Force

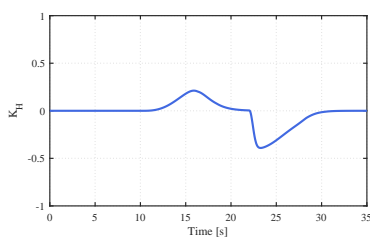


Fig. 5: Human Intention Index

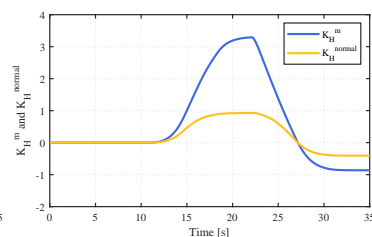


Fig. 6: Human Intention Index

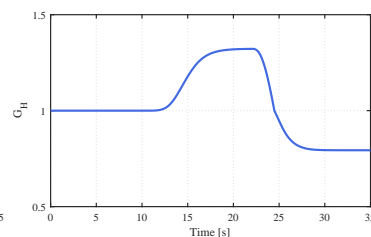


Fig. 7: Desired Gain

3.2. 可変アドミタンス制御

可変アドミタンス制御 [2] では、仮想ダンパ係数は人間の意図やタスクに基づいて調整される。人間が加速を意図していると推定される時に仮想ダンパ係数が小さくなり、減速を意図していると推定される時に仮想ダンパ係数が大きくなるように可変仮想ダンパ係数を設定する。Fuzzy Logic Controller から直接出力される \mathbf{K}_H を用いて、可変仮想ダンパ係数は式 (1) のような方法で調整する。ここで、 β は調整パラメータである。可変アドミタンス制御の有効性を示すために固定アドミタンス（仮想ダンパ係数が大きいものと小さいもの）と比較した。シミュレーション結果より, Fig.10 から、人間が加速を意図していると推定される場合には、仮想ダンパ係数が小さくなり、人間が減速を意図していると推定される場合には、仮想ダンパ係数が大きくなっていることが分かる。また、その結果 Fig.9 のように人間が加速を意図していると推定される場合には低仮想ダンパ係数の時のような速度指令値となり、人間が減速を意図していると推定される場合には高仮想ダンパ係数の時のような速度指令値となっており、アドミタンスコントローラーのパラメータが一定の場合に生じるトレードオフ問題の解決に寄与していることを示した。

$$\mathbf{D}_{acceleration} = \mathbf{D}_0 - \beta|\mathbf{K}_H|$$

$$\mathbf{D}_{deceleration} = \mathbf{D}_0 + \beta|\mathbf{K}_H|$$

(1)

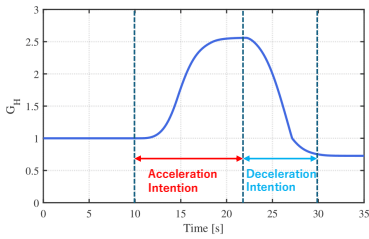


Fig. 8:Desired Gain

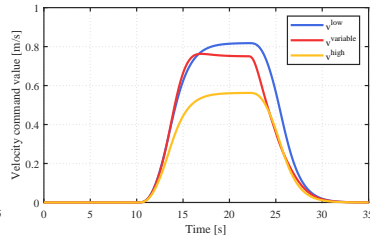


Fig. 9:Velocity Command

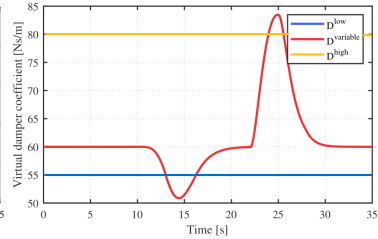


Fig. 10:Virtual Damper

3.3. 適応的な力のスケーリングによるパワーアシスト

人間がロボットに加える力に対して、人間の意図の推定に基づき、適応的に変化するアシストゲイン [1] G_H をアドミタンスモデルの入力とする。また、 G_H をアシストゲインとすることにより、人間が加速を意図していると推定される際にアシスト率が高く、減速を意図していると推定される際にアシスト率が低くなるようなパワーアシスト制御を行う。適応的な力のスケーリングによるパワーアシストの有効性を示すために、固定のアシストゲイン（アシストゲインが高いものと低いもの）を比較対象とする。Fig.13 より、人間が加速を意図していると推定される際には、加速を促すように力がスケーリングされているため、アシストゲインが高い時のように速度指令値が上昇し、減速を意図していると推定される際には、減速を促すように力がスケーリングされているため、アシストゲインが時のように速度指令値が下降している。以上より、人間の意図に応じて適応的に力がスケーリングされ、ロボットの直感的な操作に寄与していることを示した。

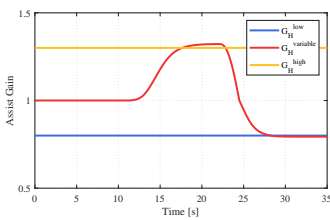


Fig. 11:Desired Gain

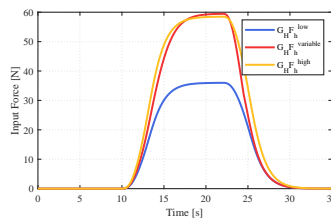


Fig. 12:Input Force

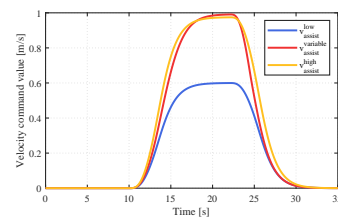


Fig. 13: Velocity Command

3.4. 提案手法

上記の可変アドミタンス制御と適応的な力のスケーリングによるパワーアシストを組み合わせる。上記の可変アドミタンス制御と同様に仮想ダンパ係数 D_d は推定された人間の意思指数 K_H を用いて、リアルタイムで変化させる。また、上記の適応的な力のスケーリングによるパワーアシストと同様に G_H を人間の力のアシストゲインとし、 G_H を人間の力で乗じたものをアドミタンスモデルの入力とする。シミュレーション結果より、Fig.15 から提案手法の速度指令値は、人間が加速を意図していると推定される際には、他の二つの手法と比べて即座に上昇し、人間が減速を意図していると推定される際には、他の二つの手法と比べて即座に下降していることが分かる。また、Fig.14 と Fig.15 より人間の加減速の意図に応じて、適応的にアシストゲインが変化することにより、提案手法では適応的な力のスケーリングによるパワーアシストが行えている。さらに、Fig.16 より、人間の加減速の意図に応じて、適応的に仮想ダンパ係数が変化することにより、提案手法では適応的な可変アドミタンス制御が行えている。以上より、提案手法は既存の2つの手法に比べ、より直感的なロボットの操作に寄与していることを示した。

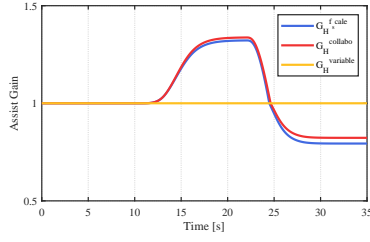


Fig. 14: Desired Gain

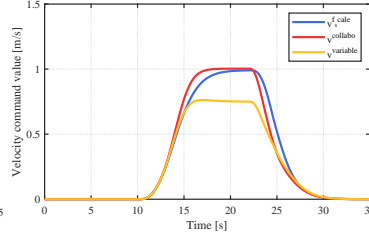


Fig. 15: Velocity Command

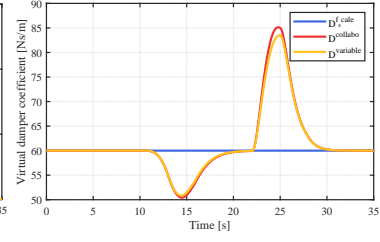


Fig. 16: Virtual Damper

4. 実機実験

実機実験では、基準となるスタート地点からゴール地点までの平地での操作を行う。スタート地点ではロボットを静止させ、人間がロボットを押し、ゴール地点で停車させる。今回、平地の走行距離は 3m としている。

4.1. 評価方法

本実験では、各手法のパフォーマンスを評価するために、人間の負荷を以下の指標で評価する。

$$\delta = \int_{t_{start}}^{t_{goal}} F dt \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{F} は、

$$\mathbf{F} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad (3)$$

とする。ただし、 $\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_z$ は力覚センサから取得される x, z 軸の力とし、 t_{start}, t_{goal} は開始、終了時間である。

4.2. 実験結果

それぞれの手法で 10 回ずつ実験を行った。各手法での δ の平均値を Table1 に示す。Table1 より、いずれの手法も制御をせず操作する時よりも δ の平均は小さくなっているため、人間の力をロボットがアシスト出来ていることが分かる。また、提案手法の δ の平均が最も小さくなったことから、提案手法は他の二つの手法に比べ、適応的にアシストすることにより人間の負荷が低減したと考えられる。

Table 1: Results Of Experiments

method	δ [kg · m/s]
No Control	292.5300
Variable Admittance Control	170.5303
Force Scaling Admittance Control	156.5704
Proposed Method	150.4517

参考文献

- [1] "Adaptive Human Force Scaling via Admittance Control for Physical Human-Robot Interaction", *Yahya M. Hamad, Yusuf Aydin, Cagatay Basdogan*, IEEE TRANSACTIONSONHAPTICS, VOL.14, NO. 4, OCTOBER-DECEMBER 2021
- [2] "Variable admittance control of a four-degree-of-freedom intelligent assist device", *Alexandre Lecours, Boris Mayer-St-Onge, Clément Gosselin*, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA May 14-18, 2012