

# 人間と知的に協調する倒立二輪型荷物搬送ビークルの実現

## Realization of Intelligent Cooperation with Humans for Inverted Two-Wheeled Luggage Transport Vehicle

電気電子情報通信工学専攻 松原 央堯

Department of Electrical, Electronic and Communication Engineering Hironori Matsubara

### 1. 研究目的

近年、少子高齢化による労働力不足が深刻化し社会問題となっている [1]。総人口に対する 65 歳以上割合を高年齢化率と呼ぶ。2020 年における日本の総人口は 1 億 2000 万人であるが、2060 年には 1 億人を下回り 8808 万人になる見込みである。2065 年には高齢化率が 38.4%となり、おおよそ 3 人に 1 人の割合で高齢者が存在することになる。したがって、非高齢者 2 人で 1 人の高齢者を支える必要があり、労働人口の低下に伴う経済力の低下が発生する。このような超高齢化社会では若年の減少に伴い、ロボット技術の応用が必要とされている。しかし、ロボットが人間環境にするためには階段環境への対処が必要となる。また、空間知能化及び Society5.0 に向けた知的制御の一環として、倒立二輪型ロボットにおける人間とロボットとのインタラクションを実現することが望まれる。

そこで、上記に述べた問題に対処するために本研究では倒立二輪型ロボットに着目した研究を行った。倒立二輪型ロボットには「小型（わずか 2 つの駆動輪のみ）」、「低コスト」、「その場旋回（高機動性）」、「斜面においても車体を水平に保つことができる」というメリットがある。したがって、産業応用に最適であると考えており荷物搬送ロボットやパーソナルモビリティとしての活躍が見込まれている。

### 2. 研究内容

本研究における研究内容は「ロバストな荷物搬送ロボットの走行制御」、「倒立二輪型ロボットの階段環境への対処」、「人間とのインタラクション（協調制御）」の 3 つである。このうち、「ロバストな荷物搬送ロボットの走行制御」は昨年までの自身の研究により達成されたため、割愛する。よって、本研究では「倒立二輪型ロボットの階段環境への対処」、「人間とのインタラクション（協調制御）」に対しての研究報告を行う。

ロボット技術の進歩により人間とロボットの使用環境が近づくことにより、階段環境への対処が問題となる。従来研究では様々な階段環境への対処を行っているロボットが提案されているが、そのほとんどは自律した機能による階段昇降機能である。また一般に階段昇降機能を有するロボットは大型かつ機械的なアプローチのものがほとんどあり、重量としても重く、人間の階段昇降速度と比較しても遅いことが言える。そこで、本研究では人間との協調制御を通して階段の乗り上げを実現する。人間との協調制御を通して押しつけ力を活用した制御により倒立二輪型ロボットの階段乗り上げを実現する。

また、倒立二輪型の高い機動性を活用した柔軟なアシスト制御が可能となる協調制御を実現し、倒立二輪型ロボットにおける知的制御の基礎を築く。

#### 2.1 倒立二輪型ロボット

本研究で用いた倒立二輪型ロボットを Fig. 1(a) に示し、Fig. 1(b) にモデル図を示す。Table 1 は倒立二輪ビークルの仕様である。Fig. 1(b) のモデルを用いて制御系を設計している。

車体幅 54cm, 車輪半径 18cm, 車体高さ 100cm であり、車体の傾きや速度、の計測には 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサにより行う。人間協調制御に用いる力の測定にはロードセルを 6 個使用している。6 個のロー

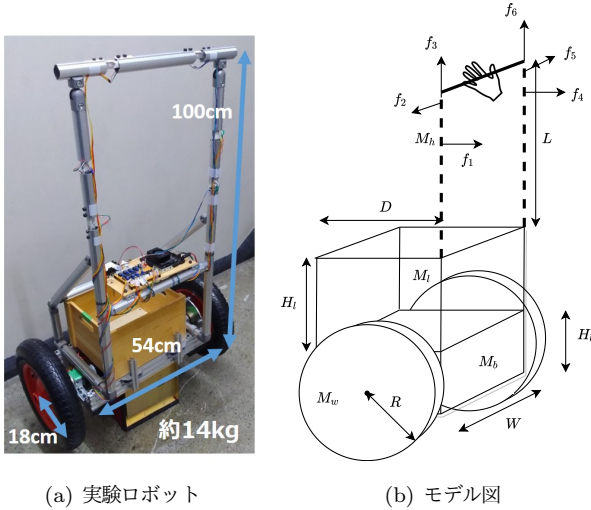


Fig. 1: 倒立二輪型ロボット

Table 1: 倒立二輪型ビークルの仕様

表記	仕様
(奥行 幅 高さ)	36cm 54cm 100cm
重量	約 14kg
コントローラ	STM32F446RE
ジャイロセンサ	MPU-9250
モータ	RE40(150W)
エンコーダ	HEDL-5540
モータドライバ	独自のドライバ (30A)
ロードセル	6 個
Edge AI	Jetson Nano NX (想定)

ドセルの測定力は座標変換によって 6 自由度の力・トルクが測定可能となっている。また、モータドライバには独自に開発したものを使用しており、階段乗り上げ時に必要な瞬時トルクの生成に十分な電流を流すことができる。このような機能を持つ倒立二輪型ロボットを利用することで、研究目的を達成できると考えている。

## 2.2 倒立二輪型ロボットの階段乗り上げ

倒立二輪型ロボットの階段乗り上げを実現する制御系の設計を行う。本研究では力制御(力ベース)と押し込み力制御を統合することで階段乗り上げを実現する。押し込み力制御の有効性は単車輪におけるシミュレーションを通して確認した。ノミナル質量行列: $\mathbf{m}_n$ , 仮想質量行列: $\mathbf{m}_c$ , 測定操作力: $\mathbf{F}_h$ , ダンパ係数: $\mathbf{D}_c$ , ロボット速度: $\dot{\mathbf{x}}^{res}$  とすると, 力制御の力参照値  $\mathbf{f}_f^{ref}$  は式 (2) である。力ゲイン: $\mathbf{K}_f$ , 目標押し込み力: $f_p^{cmd}$ , 推定反力: $\hat{f}_d^{reac}$  とすると, 押し込み力制御の力指令値  $\mathbf{f}_p^{ref}$  は式 (3) で表される。測定操作力ベクトル: $\mathbf{F}_h$  の要素は式 (1) である。 $\bar{F}_x$  は押し込み力,  $\tau_R$  はロール角方向の操作力を表している。

$$\mathbf{F}_h = \begin{bmatrix} 0 & \bar{F}_x & \tau_R \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_f^{ref} = \mathbf{m}_n \mathbf{m}_c^{-1} \left[ \mathbf{F}_h - \mathbf{D}_c \dot{\mathbf{x}}^{res} \right]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_p^{ref} = \mathbf{K}_f \left[ f_p^{cmd} - \hat{f}_d^{reac} \right]^T \quad (3)$$

推定反力  $\hat{f}_d^{reac}$  は文献 [2] による反力推定オブザーバを用いる。ここで, 力指令値  $\mathbf{f}_f^{ref}$ ,  $\mathbf{f}_p^{ref}$  に対して可変ゲイン  $\alpha$  を導入して結合する。 $\hat{f}_d^{dis}$  は外乱オブザーバによる外乱推定値を表す [2]。

$$\mathbf{f}^{ref} = \alpha \mathbf{f}_p^{ref} + (1 - \alpha) \mathbf{f}_f^{ref} + \hat{f}_d^{dis} \quad (4)$$

可変ゲイン  $\alpha$  には双曲線関数と低域通過フィルタ (LPF) を用いている。人間の操作力  $\bar{F}_x$  に応じて変化し, カットオフ周波数  $g_\alpha$  の LPF を通した値として式 (2.3) で計算される。

$$\alpha = \frac{g_\alpha}{s + g_\alpha} \left[ \frac{\tanh(\beta(f_p^{cmd} - \bar{F}_x) + 1)}{2} \right] \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (5)$$

ここで,  $\bar{F}_x$  は人間の押し込み力を表しており,  $\beta$  は押し込み力に対する変化量を示している。押し込み力  $\bar{F}_x$  が小さい範囲では  $\alpha$  は 1 であり, 押し込み力制御達成される。押し込み力  $\bar{F}_x$  が十分大きくなり,  $f_p^{cmd}$  よりも大きく

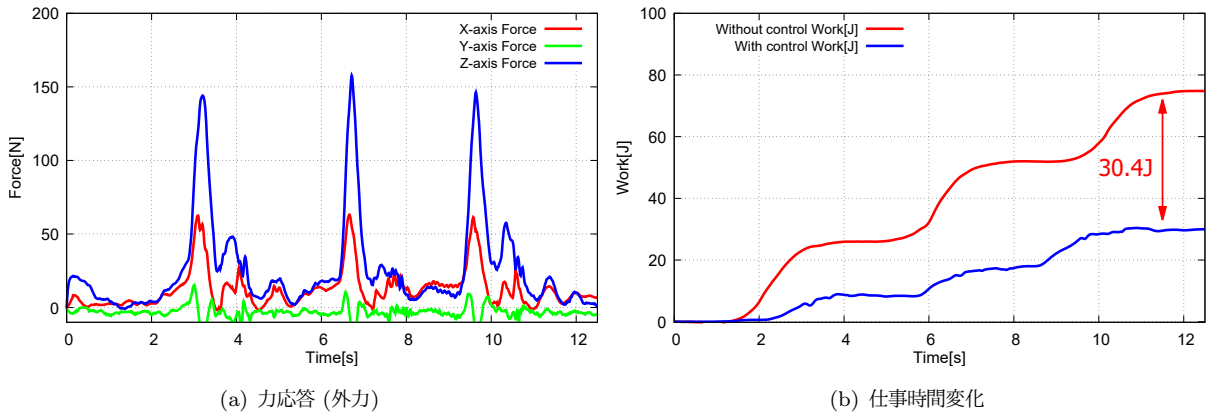


Fig. 2: 倒立輪型ロボットの階段乗り上げにおける各実験応答

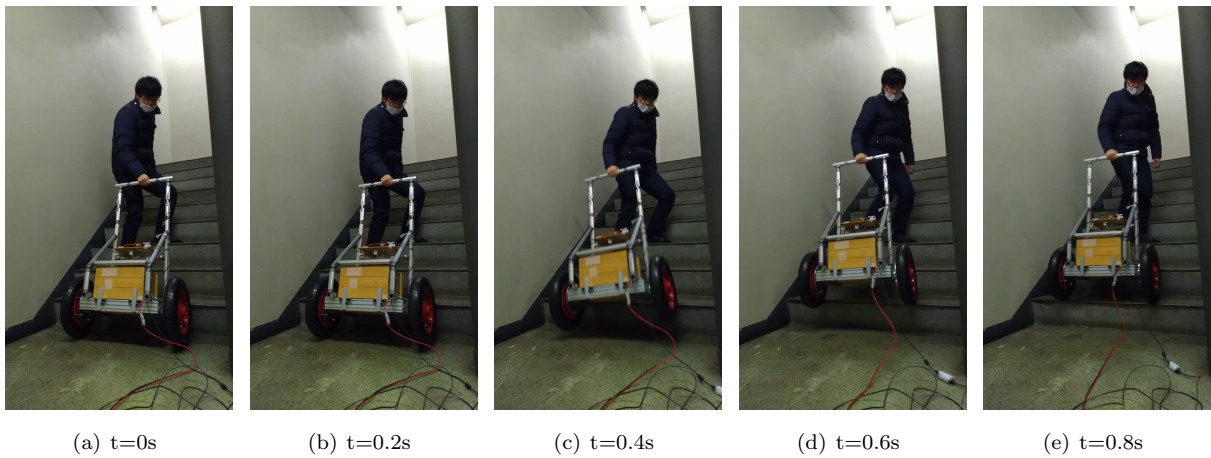


Fig. 3: 倒立輪型ロボットの階段乗り上げ動作

なれば  $\alpha$  が低下し、力制御に制御モードが変化する。このように可変ゲインを導入することで、制御モードを滑らかに遷移することが可能となる。

提案手法の有効性を確認するために、実機実験を1号館4階東側階段で実験を行った。階段の高さ:18cm, 階段の奥行:31cm, 次の踊り場まで9段のステップがある。Fig. 3に実験開始0sから0.8sまでの階段乗り上げの様子を示し、Fig. 2(a)に3段階目までの力応答を示す。Fig. 3とFig. 2(a)からわかるように、力がインパルス的に発生し、階段乗り上げを達成していることがわかる。

さらなる提案手法の有効性を確認するために仕事  $J_W$  [J] による評価を行う。仕事  $J_W$  [J] は外力とロボット速度との積に対する時間積分により計算する。Fig. 2(b)に制御なしで引き上げた場合の応答と提案手法による階段乗り上げを行った仕事の時間変化を示す。ただし、乗り上げ段数は3段である。Fig. 2(b)の結果より制御なしの場合では最終仕事値  $J_W$  [J] は74.3Jであるが、制御ありの場合では30.4であり、提案手法を用いることで半分以下のエネルギーによって乗り上げ可能なことが示された。また、乗り上げ時間は9段において15sであり、0.6 step/sの乗り上げ速度である。これは類似研究が12cmの階段において0.56step/sを実現していたことを考えれば比較的高速であると言える。

### 2.3 人間とのインタラクション

人間とのインタラクションを実現するための制御系を設計する。式(9)に協調制御で用いた力参照値  $f_s^{ref}$  を示す。人間とのインタラクションの実現には力制御と倒立制御を利用した。倒立制御の力指令値  $f_{inv}^{ref}$  は式(7)で

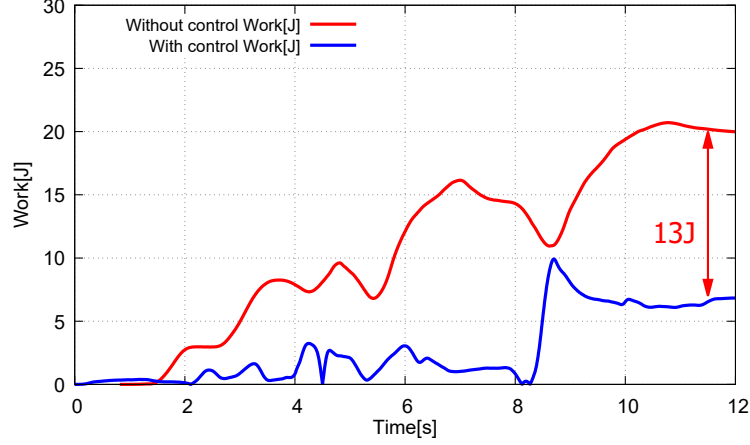


Fig. 4: 仕事の絶対値  $|J_W|$  に対する時間変化

あり,  $\theta_p^{cmd}$ ,  $\theta_p^{res}$ ,  $\mathbf{K}_p$ ,  $\mathbf{K}_v$  はそれぞれ, ピッチ角指令値, ピッチ角応答, 位置ゲイン, 速度ゲインを表す. 測定操作力ベクトル:  $\mathbf{f}_h$  の要素は式 (6) である.  $\tau_Y$  はヨー角方向の操作力である. また, ピッチ角指令値には常に平衡角度となるような指令値を常に入力している.

$$\mathbf{f}_h = \begin{bmatrix} 0 & \bar{F}_x & \tau_Y \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_{inv}^{ref} = \mathbf{K}_p (\theta_p^{cmd} - \theta_p^{res}) - \mathbf{K}_v \dot{\theta}_p^{res} \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_{fs}^{ref} = \mathbf{m}_n \mathbf{m}_c^{-1} [\mathbf{f}_h - \mathbf{D}_c \dot{\mathbf{x}}^{res}] \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_s^{ref} = \alpha \mathbf{f}_{inv}^{ref} + (1 - \alpha) \mathbf{f}_f^{ref} + \hat{\mathbf{f}}^{dis} \quad (9)$$

人間とのインタラクションにおいても, の可変ゲイン  $\alpha$  を用いている. 可変ゲインによって, 倒立制御と力制御のモードが滑らかに変化する.

Fig. 4 に制御なしで行った場合と制御ありで協調制御を行った場合の比較を行う. 左右の旋回制御, 傾けて旋回制御, 牽引動作を行った. 仕事  $J_W$  の絶対値  $|J_W|$  の時間応答を示す.

制御ありの場合は制御なしの場合と比べて半分以下の仕事で済んでいることがわかる. したがって, 柔軟な協調制御が実現されたことが言える.

### 3. 結論

本研究では倒立二輪型ロボットを用いた新しいシステムを提案した. 提案したシステムロバストな荷物搬送, 倒立二輪型ロボットの階段乗り上げ機能及び平地における人間との協調制御を実現するロボットである. 本研究の手法を用いることで, 従来型のロボットよりも高速な階段乗り上げが可能になり, より少ない仕事で荷物の搬送を行えることが確認された. また, 協調制御を用いることで空間知能化及び Society5.0 に向けた知的制御への基礎となることが期待できる. これらの事実から倒立二輪型ロボットの有効性を示すことができた.

### 参考文献

- [1] 1 高齢化の現状と将来像 — 令和元年版高齢社会白書 (全体版)-内閣府. [https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2019/html/zenbun/s1\\_1\\_1.html](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2019/html/zenbun/s1_1_1.html), (2020.12.26 アクセス).
- [2] T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi. Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 259–265, 1993.