

車体重心に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムの制御

○工藤 聖人（青山学院大学） 山口 博明（青山学院大学）
若林 諒（青山学院大学） 米澤 直晃（青山学院大学）

本論文では、車体重心に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムにおいて、荷台重心を目標経路に沿って移動させながら、荷台姿勢を目標経路の接線の向きに応じて変化させる経路追従フィードバック制御法を、新たに提案する。本制御方法では、仮想的な機械要素の導入により、連結点が車軸中点に配置されていないオフフック型の構造を解消し、運動学的方程式を正準系であるチェインド・フォームに変換した上で、仮想的な機械要素の冗長な自由度を拘束することで、実体の運動学的モデルに則した制御入力を設計している。本制御方法の有効性はシミュレーションを通して検証されている。

1. 序論

本論文では、車体重心に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムにおいて、荷台重心を自由曲線で指定される目標経路に沿って移動させながら、荷台姿勢を目標経路の接線の向きに応じて変化させる経路追従フィードバック制御法を、新たに提案する。

移動ロボットが複数のトレーラを牽引する連結車両システムにおいて、連結点を牽引車両の車軸中点、あるいは、前方のトレーラの車軸中点に配置するとき、運動学的方程式を正準系であるチェインド・フォームへ変換することができる [1]。一方、車軸中点に配置されないオフフック型の構造を有する連結点が複数あるとき、運動学的方程式をチェインド・フォームへ変換できないことが広く知られている [2][3]。

これまでに著者らは、後輪車軸中点に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムにおいて、運動学的方程式をチェインド・フォームへ変換し、これに基づいて、荷台の2つの連結点のうちの1つを目標経路に沿って移動させながら、荷台姿勢を目標経路の接線の向きに応じて変化させる制御方法を提案し、その有効性を実験的に確認している [4][5]。後輪車軸中点に連結点を配置すると、荷重を4つの車輪で均等に支持することができず、荷重が極端に大きいとき、前輪が浮き十分な操舵を行えない問題がある。このような問題を解決するために、車体重心に連結点を配置し、荷重を4つの車輪で均等に支持する必要がある。もちろん、このとき、連結点はオフフック型の構造を有し、運動学的方程式をチェインド・フォームへ変換することはできない。

本制御方法では、運動学的モデルにおいて、仮想的な機械要素の導入により、オフフック型の構造を解消し、運動学的方程式をチェインド・フォームへ変換している [6]。もちろん、仮想的な機械要素は、実際には存在しない。このため、仮想的な機械要素の冗長な自由度を拘束することで、実体の運動学的モデルに則した制御入力を、チェインド・フォームに基づいて算出している。言い換えれば、運動学的方程式をチェインド・フォームへ変換できない機械システムの制御入力を、仮想的な機械要素の導入と冗長な自由度の拘束に

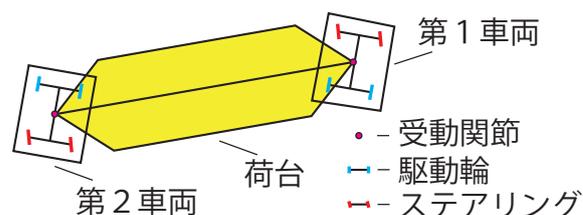


図1 協調搬送システムの運動学的モデル

より、チェインド・フォームに基づいて算出するという全く新しい制御系の設計の概念を提案している。本制御方法の有効性は、シミュレーションを通して検証されている。

2. 協調搬送システムの構造

図1は、車体重心に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムを示している。本協調搬送システムにおいては、第1番目の車両型移動ロボット（以下、「第1車両」と呼ぶ）に、その重心に配置されている第1番目の受動的な回転関節（以下、「第1関節」と呼ぶ）を介して、荷台の端点が連結されている。同様に、第2番目の車両型移動ロボット（以下、「第2車両」と呼ぶ）に、その重心に配置されている第2番目の受動的な回転関節（以下、「第2関節」と呼ぶ）を介して、荷台のもう1つの端点が連結されている。本協調搬送システムでは、第1、2車両の後輪を駆動し、それらのステアリングを操舵することで、荷台の運動を制御することができる。

3. 仮想的な機械要素の導入

図2は、本協調搬送システムに導入する仮想的な機械要素を示している。具体的には、荷台重心に第1番目の仮想的な受動的な回転関節（以下、「第1仮想関節」と呼ぶ）を介して、第1番目の仮想的な車両型移動ロボット（以下、「第1仮想車両」と呼ぶ）が取り付けられている。第1仮想関節は第1仮想車両の後輪車軸中点に配置されている。荷台重心と第1関節との間の中点に第2番目の仮想的な受動的な回転関節（以下、「第2仮想関節」と呼ぶ）を介して、第2番目の仮想的な車両型移動ロボット（以下、「第2仮想車両」と呼ぶ）が取り付けられている。第2仮想関節は第2仮想車両の後輪

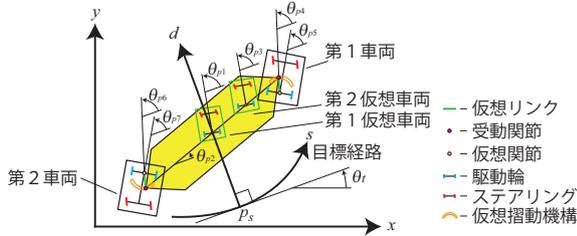


図2 仮想的な機械要素と状態変数

車軸中点に配置されている。さらに、第1車両の車体に第1番目の仮想的で弧の字の摺動機構（以下、「第1仮想摺動機構」と呼ぶ）が取り付けられている。第1仮想摺動機構の摺動中心は第1車両の車体重心に、その円弧中心は第1車両の後輪間中点に、それぞれ、配置されている。荷台の端点に取り付けられている第1関節は、第1仮想摺動機構上を受動的に移動する。同様に、第2車両の車体に第2仮想摺動機構が取り付けられ、第2関節も、第2仮想摺動機構上を受動的に移動する。なお、第1関節と第1仮想摺動機構の円弧中心を結ぶ線分を第1仮想リンクとする。第2関節と第2仮想摺動機構の円弧中心を結ぶ線分を第2仮想リンクとする。

このように仮想的な機械要素を導入することで、本協調搬送システムの運動学的方程式を、正準系であるチェインド・フォームへ変換することができる。もちろん、実際には、第1、2仮想摺動機構は存在しない。第1、2関節を、それぞれ、第1、2仮想摺動機構の摺動中心に拘束することで、実体に則した、つまり、第1、2仮想摺動機構の存在しない運動学的モデルに則した制御入力をチェインド・フォームに基づいて設計することができる。

4. 運動学的方程式の導出

4.1 曲線座標系における状態変数ベクトル

図2は、目標経路を一つの座標軸（以下、「 s 軸」と呼ぶ）とし、目標経路の接線に直交する直線をもう一つの座標軸（以下、「 d 軸」と呼ぶ）とする曲線座標系を表している。図2に示すように、ベクトル $(s, d)^T$ は、荷台重心の本曲線座標系における位置ベクトルを表している。第1仮想車両、荷台、第2仮想車両、第1仮想リンク、第1車両、第2仮想リンク、第2車両、これらの目標経路の接線の向き θ_t に対する相対姿勢 $\theta_{pi}, i = 1, 2, \dots, 7$ は、本曲線座標系における姿勢を表しており、以下のように与えられる。

$$\begin{cases} \theta_{pi} = \theta_i - \theta_t, \\ i = 1, 2, \dots, 7. \end{cases} \quad (1)$$

本協調搬送システムの状態変数ベクトル \mathbf{X} を以下のように定義する。

$$\mathbf{X} = (s, d, \phi_1, \theta_{p1}, \theta_{p2}, \phi_2, \theta_{p3}, \theta_{p4}, \phi_3, \theta_{p5}, \theta_{p6}, \phi_4, \theta_{p7})^T. \quad (2)$$

ここで、角度 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ は、第1仮想車両、第2仮想車両、第1車両、第2車両、これらのステアリング角度を、それぞれ、表している。

4.2 運動学的方程式

本協調搬送システムの運動学的方程式は、状態変数ベクトル \mathbf{X} より、以下のように与えられる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{G}_1 u_1 + \mathbf{G}_2 u_2 + \mathbf{G}_3 u_3 + \mathbf{G}_4 u_4 + \mathbf{G}_5 u_5, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_1 = (G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{15}, G_{16}, G_{17}, G_{18}, G_{19}, G_{110}, G_{111}, G_{112}, G_{113})^T, \\ \mathbf{G}_2 = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T, \\ \mathbf{G}_3 = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T, \\ \mathbf{G}_4 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)^T, \\ \mathbf{G}_5 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)^T, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} G_{11} = \frac{\cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \\ G_{12} = \sin \theta_{p1}, \\ G_{13} = 0, \\ G_{14} = \frac{\tan \phi_1 - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}}{l_1}, \\ G_{15} = \frac{\sin(\theta_{p3} - \theta_{p1})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \\ G_{16} = 0, \\ G_{17} = \frac{\tan \phi_2 \cos(\theta_{p1} - \theta_{p2}) - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}}{l_3 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})}, \\ G_{18} = K_{vp8} - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \\ G_{19} = 0, \\ G_{110} = K_{vp10} \tan \phi_3 - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \\ G_{111} = K_{vp11} - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \\ G_{112} = 0, \\ G_{113} = K_{vp13} \tan \phi_4 - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1-dc(s)}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_{vp8} = \frac{-1}{l_5 \cos(\theta_{p5} - \theta_{p4})} \left\{ \frac{\sin(\theta_{p5} - \theta_{p1})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} - \frac{(l_2 + l_4) \sin(\theta_{p3} - \theta_{p1}) \cos(\theta_{p5} - \theta_{p2})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} \right\}, \\ K_{vp10} = \frac{1}{l_6 \cos(\theta_{p5} - \theta_{p4})} \left\{ \frac{\cos(\theta_{p4} - \theta_{p1})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} + \frac{(l_2 + l_4) \sin(\theta_{p3} - \theta_{p1}) \sin(\theta_{p4} - \theta_{p2})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} \right\}, \\ K_{vp11} = \frac{1}{l_5 \cos(\theta_{p7} - \theta_{p6})} \left\{ \frac{\sin(\theta_{p7} - \theta_{p1})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} + \frac{(l_2 + l_4) \sin(\theta_{p3} - \theta_{p1}) \cos(\theta_{p7} - \theta_{p2})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} \right\}, \\ K_{vp13} = \frac{-1}{l_6 \cos(\theta_{p7} - \theta_{p6})} \left\{ \frac{\cos(\theta_{p6} - \theta_{p1})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} - \frac{(l_2 + l_4) \sin(\theta_{p3} - \theta_{p1}) \sin(\theta_{p6} - \theta_{p2})}{l_2 \cos(\theta_{p3} - \theta_{p2})} \right\}. \end{cases} \quad (6)$$

5. チェインド・フォームへの変換

まず、式(3)に示す5つのベクトル場 $\mathbf{G}_i, i = 1, 2, \dots, 5$ を以下のように変換する。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1 = \frac{1-dc(s)}{\cos \theta_{p1}} \mathbf{G}_1, \\ \mathbf{F}_i = \mathbf{G}_i, i = 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (7)$$

つぎに、式(3)に5つの制御入力 $u_i, i = 1, 2, \dots, 5$ を以下のように変換する。

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \frac{\cos \theta_{p1}}{1-dc(s)} u_1, \\ \tilde{U}_i = u_i, i = 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、(8)より、式(3)に示す運動学的方程式は以下のように書き換えられる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}_1 \tilde{U}_1 + \mathbf{F}_2 \tilde{U}_2 + \mathbf{F}_3 \tilde{U}_3 + \mathbf{F}_4 \tilde{U}_4 + \mathbf{F}_5 \tilde{U}_5. \quad (9)$$

式 (9) に示すベクトル場 $F_i, i = 1, 2, \dots, 5$ を用いて本協調搬送システムにおける状態変数を以下のように変換する。

$$\begin{cases} Z_{11} = H_1 = s, & Z_{41} = L_{F_1}^2 H_4, \\ Z_{21} = L_{F_1}^2 H_2, & Z_{42} = L_{F_1} H_4, \\ Z_{22} = L_{F_1} H_2, & Z_{43} = H_4 = \theta_{p4}, \\ Z_{23} = H_2 = d, & Z_{51} = L_{F_1}^2 H_5, \\ Z_{31} = L_{F_1}^2 H_3, & Z_{52} = L_{F_1} H_5, \\ Z_{32} = L_{F_1} H_3, & Z_{53} = H_5 = \theta_{p6}. \\ Z_{33} = H_3 = \theta_{p2}, \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) の各状態変数の時間微分は、以下に示す 4 チェイン・シングルジェネレータ・チェイン・フォームとなる。

$$\begin{cases} \dot{Z}_{11} = W_1, \\ \dot{Z}_{i1} = W_i, \\ \dot{Z}_{i2} = Z_{i1} W_1, \\ \dot{Z}_{i3} = Z_{i2} W_1, i = 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (11)$$

制御入力 $W_i, i = 1, 2, \dots, 5$ は以下のように与えられる。

$$\begin{cases} W_1 = \tilde{U}_1, \\ W_i = \sum_{j=1}^5 L_{F_j} L_{F_1}^2 H_i \tilde{U}_j, i = 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (12)$$

式 (8), (12) より、制御入力 $u_i, i = 1, 2, \dots, 5$ は、制御入力 $W_i, i = 1, 2, \dots, 5$ から一意に決定される。

6. 制御系の設計

6.1 制御の目的

本制御方法では、荷台重心を目標経路上において目標速度 $f_{w_1}(t)$ で移動させながら、荷台重心の目標経路に対する相対位置 d をゼロに収束させ、同時に、荷台の目標経路の接線の向きに対する相対姿勢 θ_{p2} をゼロに収束させることを目的としている。物理的には、荷台重心を目標経路に沿って移動させながら、その姿勢を目標経路の接線方向に常に揃えることを意味している。

6.2 荷台重心の目標経路上の位置と移動方向の符号の積に関する微分

荷台重心の目標経路上の位置 $s (= Z_{11})$ とその移動方向の符号 $\text{sign}(W_1)$ の積である変数 $\text{sign}(W_1) Z_{11}$ に関する微分を以下のように定義する。

$$Z_{ij}^{(1)} = \text{sign}(W_1) \frac{\partial Z_{ij}}{\partial Z_{11}}, i = 2, 3, 4, 5, j = 1, 2, 3. \quad (13)$$

また、 $W_i, i = 2, 3, 4, 5$ を以下のように定義する。

$$W_i = W_1 \tilde{W}_i, i = 2, 3, 4, 5. \quad (14)$$

式 (13), (14) より、式 (11) は以下のように書き換えられる。

$$\begin{cases} Z_{11}^{(1)} = \text{sign}(W_1), \\ Z_{i1}^{(1)} = \text{sign}(W_1) \tilde{W}_i, \\ Z_{i2}^{(1)} = \text{sign}(W_1) Z_{i1}, \\ Z_{i3}^{(1)} = \text{sign}(W_1) Z_{i2}, i = 2, 3, 4, 5. \end{cases} \quad (15)$$

6.3 制御入力 $W_i, i = 1, 2, \dots, 5$ の設計

6.1 節に述べた制御目的を実現するために、式 (14), (15) に基づいて、制御入力 $W_i, i = 1, 2, \dots, 5$ を以下のように設計する。

$$W_1 = f_{w_1}(t), \quad (16)$$

$$W_2 = K_{21}|W_1|(-Z_{21}) + K_{22}W_1(-Z_{22}) + K_{23}|W_1|(-Z_{23}), \quad (17)$$

$$W_3 = K_{31}|W_1|(-Z_{31}) + K_{32}W_1(-Z_{32}) + K_{33}|W_1|(-Z_{33}), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} W_4 = & \alpha_{41}W_1 + \alpha_{42}u_2 + \alpha_{43}u_3 \\ & + \alpha_{44} \frac{\cos^2 \phi_3}{K_{vp10} \cos \theta_{p1} (1 - dc(s))} \\ & \left[-\dot{K}_{vp10} \tan \phi_3 \cos \theta_{p1} (1 - dc(s)) \right. \\ & - K_{vp10} \tan \phi_3 \left(-c(s) \sin \theta_{p1} \right. \\ & \left. \left. - \frac{dc'(s) \cos \theta_{p1}}{1 - dc(s)} \right) \cos \theta_{p1} u_1 \right. \\ & \left. + K_{vp10} \tan \phi_3 (1 - dc(s)) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ -\left(\frac{\tan \phi_1}{l_1} - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1 - dc(s)} \right) \sin \theta_{p1} u_1 \right\} \\ & + \cos^2 \theta_{p1} W_1 \left\{ Z_{41} - K_{41} (|W_1| G_{110}/G_{11} \right. \\ & \left. - |W_1| Z_{42}) \right. \\ & \left. - K_{42} (|W_1| G_{110}/G_{11} + K_{41} (\theta_{p5} - Z_{43}) W_1 \right. \\ & \left. - |W_1| Z_{42}) + c'(s) \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_5 = & \alpha_{51}W_1 + \alpha_{52}u_2 + \alpha_{53}u_3 \\ & + \alpha_{54} \frac{\cos^2 \phi_4}{K_{vp13} \cos \theta_{p1} (1 - dc(s))} \\ & \left[-\dot{K}_{vp13} \tan \phi_4 \cos \theta_{p1} (1 - dc(s)) \right. \\ & - K_{vp13} \tan \phi_4 \left(-c(s) \sin \theta_{p1} \right. \\ & \left. \left. - \frac{dc'(s) \cos \theta_{p1}}{1 - dc(s)} \right) \cos \theta_{p1} u_1 \right. \\ & \left. + K_{vp13} \tan \phi_4 (1 - dc(s)) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ -\left(\frac{\tan \phi_1}{l_1} - \frac{c(s) \cos \theta_{p1}}{1 - dc(s)} \right) \sin \theta_{p1} u_1 \right\} \\ & + \cos^2 \theta_{p1} W_1 \left\{ Z_{51} - K_{51} (|W_1| G_{113}/G_{11} \right. \\ & \left. - |W_1| Z_{52}) \right. \\ & \left. - K_{52} (|W_1| G_{113}/G_{11} + K_{51} (\theta_{p7} - Z_{53}) W_1 \right. \\ & \left. - |W_1| Z_{52}) + c'(s) \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \alpha_{41} = L_{F_1}^3 H_4, & \alpha_{42} = L_{F_2} L_{F_1}^2 H_4, \\ \alpha_{43} = L_{F_3} L_{F_1}^2 H_4, & \alpha_{44} = L_{F_4} L_{F_1}^2 H_4, \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \alpha_{51} = L_{F_1}^3 H_5, & \alpha_{52} = L_{F_2} L_{F_1}^2 H_5, \\ \alpha_{53} = L_{F_3} L_{F_1}^2 H_5, & \alpha_{54} = L_{F_4} L_{F_1}^2 H_5. \end{cases} \quad (22)$$

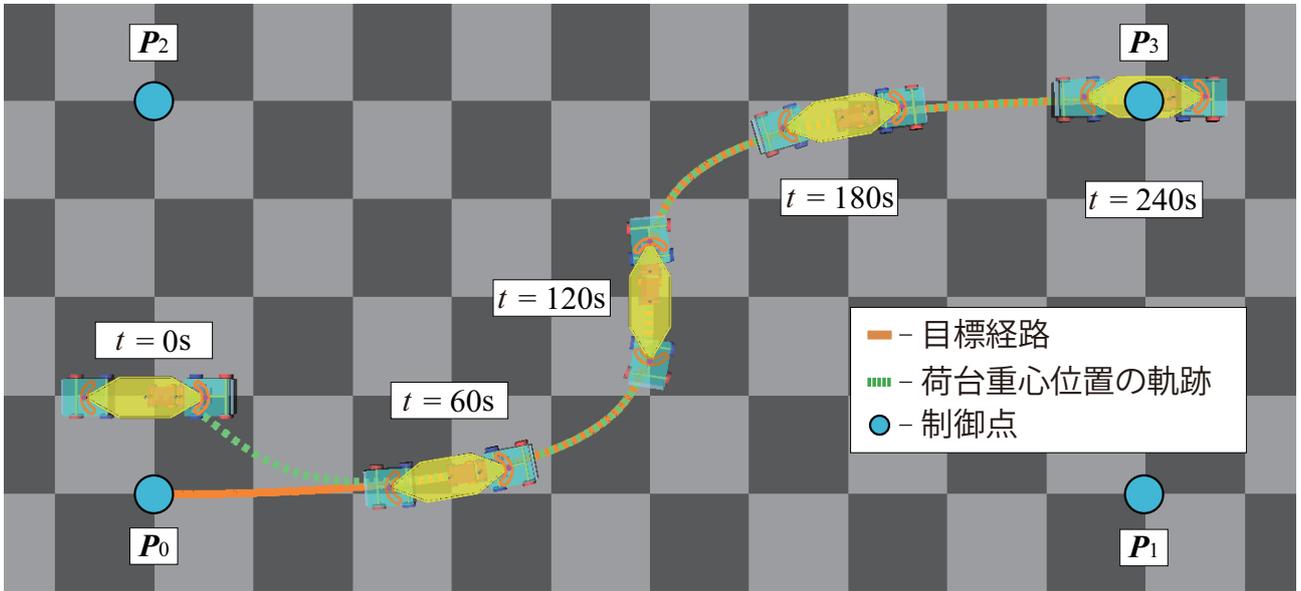


図3 シミュレーション結果

7. シミュレーション

本協調半システムの大きさを決めるパラメータを以下のように設定した.

$$\begin{cases} l_1 = 0.2\text{m}, l_2 = 0.3\text{m}, l_3 = 0.2\text{m}, \\ l_4 = 0.3\text{m}, l_5 = 0.15\text{m}, l_6 = 0.3\text{m}. \end{cases} \quad (23)$$

ここで, $l_i, i = 1, 2, \dots, 6$ は, 第1仮想車両の車軸間距離, 第1仮想車両と第2仮想車両の後輪間中点間の距離, 第2仮想車両の車軸間距離, 第2仮想車両の後輪間中点と荷台の頂点間の距離, 仮想リンクの長さ, 第1, 2車両の車軸間距離を, それぞれ, 表している. 荷台重心の目標経路上の移動速度 $f_{w_1}(t)$ を以下のように設定した.

$$W_1 = f_{w_1}(t) = a_0 = 0.05\text{m/s}, \quad (24)$$

式 (17), (18), (19), (20) に示す制御入力 $W_i, i = 2, 3, 4, 5$ のパラメータを以下のように設計した.

$$\begin{cases} K_{21} = 3.0, & K_{22} = 3.0, & K_{23} = 3.0, \\ K_{31} = 20.0, & K_{32} = 20.0, & K_{33} = 20.0, \\ K_{41} = 500.0, & K_{42} = 0.3, \\ K_{51} = 500.0, & K_{52} = 0.3. \end{cases} \quad (25)$$

図3に, 4つの制御点から構成される3次のベジェ曲線により計画した目標経路に対する追従動作のシミュレーション結果を示す. 始点が P_0 , 終点が P_3 である. 図3から, 第1, 2車両の車体重心に連結点を有する本協調搬送システムにおいて, 初期状態では, 荷台重心位置が目標経路に対して, また, 荷台姿勢が目標経路の接線の向きに対して, それぞれ, 偏差を有しているが, これらが速やかにゼロに収束し, 経路追従動作が実現されていることが理解できる. 本シミュレーション結果から, 本制御方法の有効性が確認されたとと言える.

8. 結論

本論文では, 車体重心に連結点を有する2台の車両型移動ロボットから構成される協調搬送システムにお

いて, 荷台重心を目標経路に沿って移動させながら, 荷台姿勢を目標経路の接線の向きに応じて変化させる経路追従フィードバック制御法を, 新たに提案した. 本制御方法では, 仮想的な機械要素の導入により, 荷台の連結点が車両型移動ロボットの後輪車軸中点に配置されていないオフフック型の構造を解消し, 運動学的方程式を正準系であるチェインド・フォームへ変換した上で, 仮想的な機械要素の冗長な自由度を拘束することで, 実体の運動学的モデルに則した制御入力を設計している. 本制御方法の有効性はシミュレーションを通して確認されている.

参考文献

- [1] O. Sordalen : "Conversion of the kinematics of a car with n trailers into a chained form," 1993 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA '93), pp.382-387, 1993.
- [2] P. Rouchon, M. Fliess, J. LeA vine and P. Martin : "Flatness, motion planning and trailer systems," Proceedings of the 1993 IEEE Conference on Decision and Control (CDC '93), pp.2700-2705, 1993.
- [3] D.A. Lizarrage, P. Morin and C. Samson : "Chained form approximation of a driftless system. Application to the exponential stabilization of the general N-trailer system," International Journal of Control, vol. 74, no. 16, pp.1612-1629, 2001.
- [4] H. Yamaguchi, M. Mori and A. Kawakami : "A path following feedback control method using parametric curves for a cooperative transportation system with two car-like mobile robots," Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV2010), vol. 43, no. 16, pp.163-168, 2010.
- [5] H. Yamaguchi, A. Nishijima and A. Kawakami : "Control of two manipulation points of a cooperative transportation system with two car-like vehicles following parametric curve paths," Journal of Robotics and Autonomous Systems, vol. 63, no.1, pp.165-178, 2015.
- [6] 若林諒 : "孤の字の摺動機構を備えた車両型移動ロボットによる協調搬送システムの制御 - 最適制御系の設計と非摺動機構型との比較 -", 青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻博士前期課程知能情報コース修士論文, 2023.