

無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の信頼性の向上

47216667 江坂 怜
指導教員 福井 類 准教授

Ceiling is suitable location for robots to transport loads because Automated Guided Vehicle (AGV) and humans do not interfere. In a previous study, a ceiling mobile robot called HanGrawler 2 has been developed. It can travel at a high speed of 1.0 m/s to compete with ground vehicles. However, it sometimes falls at a high speed traveling. So, the purpose of this study is to improve the reliability of starting, accelerating, and traveling at high speed. Optical motion capture is used to observe crawler's behavior of HanGrawler 2. The Observation of crawler's behavior reveals that the crawler moves on an inflated trajectory at the high speed movement. In addition, the experiment results show that the collision is not caused by inflation, but by the push-in timing. To optimize the push-in timing, an encoder was implemented to improve the reliability of high-speed traveling.

Key Words: Ceiling mobile robot, Mechanical hanging mechanism, Crawler, Optical motion capture

1 緒言

生産現場において、搬送経路の多様化及び経路変更の容易化を目的として、Automated Guided Vehicle (AGV) や Autonomous Mobile Robot (AMR) などの無人搬送車が活用されている^{1,2)}。しかし床面を走行経路とする場合、作業員や生産設備との干渉が問題となる。そこで、天井面を走行経路として搬送を行うことで、干渉を回避することができ、多様な搬送経路の実現が期待される。一方有軌道型天井搬送機械は、経路変更の際に軌道そのものの位置・方向を変更する必要があり、経路変更が容易でない。そのため、自動車組立工場のように生産ラインが頻繁に変更される工場には適していない。つまり、経路変更が容易な天井移動ロボットの開発が求められる。

そこで、先行研究では、図1に示す天井移動ロボット HanGrawler 2 を開発した³⁾。本ロボットはぶら下がり機構を用いて天井面のパンチングメタルに機械的にぶら下がり、無限軌道機構を用いてぶら下がり機構を連続的に送り出し、1.0 m/s の高速走行が可能となっている。

しかし、HanGrawler 2 は天井面へのぶら下がりに失敗し走行不可となることが繰り返し起きているため、走行の信頼性を向上することが課題である。走行の信頼性を評価するため、走行を発進・加速・高速走行の3段階に分けて考える。天井移動ロボットの先行研究に MoMo5⁴⁾ があるが、最大 0.15 m/s と低速である。また、HanGrawler 2 は無限軌道を用いており MoMo とはぶら下がり手法が異なるため、発進および加速の条件は未解明である。そこで発進及び加速の実現のための条件を明らかにし、実験により信頼性の評価を行う。また、無限軌道を持つ走行体の地面走行時の挙動解析の先行研究に藤田らが行った固有値解析⁵⁾ があるが、無限軌道式天井移動ロボットの高速走行時のロボット挙動は明らかとなっていない。そこで光学式モーションキャプチャにより、高速走行時の挙動を解明し、高速走行の信頼性の向上を目指す。

2 無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の信頼性の向上に必要なアプローチ

2.1 発進・加速・高速走行の要求機能

無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行を実現するには、(1) 発進時の機体と天井面との位置合わせ、(2) 加速中のぶら下がり機構押込/引抜操作タイミングの適正化、(3) 高速走行中のロボット挙動解明の3つの要求機能がある。次節では、各要求機能の実現アプローチを述べる。

2.2 発進時の機体と天井面との位置合わせ

本ロボットは、無限軌道に取り付けられているぶら下がり機構を、押込/引抜機構を用いて天井面へと拘束/解放してい

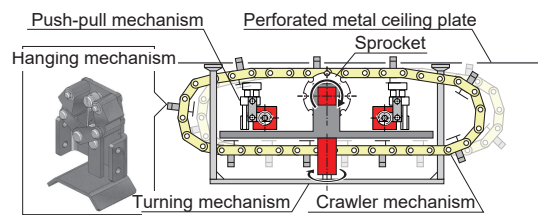


Fig.1 Conceptual sketch of HanGrawler 2³⁾

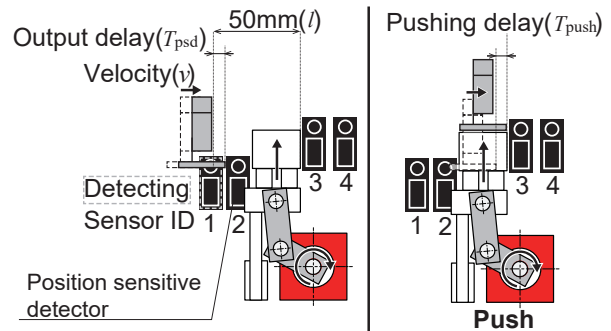


Fig.2 Conceptual sketch of delays occurring in pushing operation

る。また、押込/引抜機構の前後には、図2のように Position Sensitive Detector (PSD) センサが設置されている。押込時には PSD1、引抜時には PSD4 の値を用いて、ぶら下がり機構の通過を検出し、押込/引抜操作を行っている。発進後押込に成功するためには、発進時にぶら下がり機構が PSD1 の検出位置よりも移動方向に対して手前である必要がある。そこで、PSD センサを用いて自己位置を推定し、発進前に初期位置調整を自動で行う、自動初期位置調整機能を実装する。

2.3 加速中のぶら下がり機構押込/引抜操作タイミングの適正化

本ロボットの押込/引抜タイミング制御では、図2のように PSD1 通過時の速度 v 及び PSD1 から押込/引抜機構までの距離 l から、PSD センサ出力の遅れ T_{psd} と押込/引抜操作の遅れ T_{push} を考慮して遅れ $T_d(v)$ を算出する。式(1)は走行が等速運動であると仮定してタイミング計算を行っている。しかし高速走行時には、加速段階で押込/引抜操作が行われるため、加速度に応じた新たなタイミング制御を実装する。

$$T_d(v) = l/v - T_{psd} - T_{push} \quad (1)$$

2.4 高速走行中のロボット挙動解明

本ロボットは高速走行時、ぶら下がり機構が天井面に衝突し、走行不可となることが確認されている。また、その衝突は低速走行時には見られないため、無限軌道式移動ロボットの高速走行時特有の現象であるといえる。そこで、無限軌道

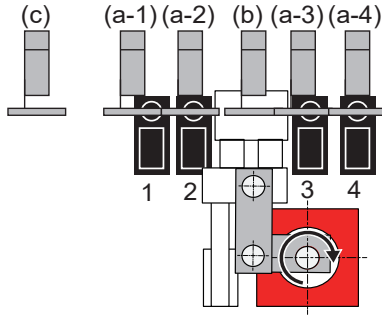


Fig.3 Conceptual sketch of initial position pattern

Table 1 Success rate of the experiment to verify the effectiveness of automatic adjustment

Velocity	Position	Automatic adjustment	
		On	Off
0.3m/s	(c) Before PSD1 detecting	3/3	3/3
	(a-1) PSD1 detecting	3/3	0/3
	(a-2) PSD2 detecting	3/3	0/3
	(b) Between PSD2 and PSD3	3/3	0/3
	(a-3) PSD3 detecting	3/3	0/3
	(a-4) PSD4 detecting	3/3	0/3

式移動ロボットの高速走行時に起きている現象である。(1)遠心力による履帯挙動の膨らみ、(2)ぶら下がり機構の挿入位置のずれをモーションキャプチャ及びカメラを用いて計測し、高速走行中のロボット挙動の解明を行う。

3 発進・加速実現のための実装及び性能評価実験

3.1 発進の実現のための自動初期位置調整機能の実装

自動初期位置調整機能では、PSD1 よりも履帯回転方向に対して 45 mm 手前位置を発進位置と定義する。発進時、各種センサが反応した場合には発進位置までの自動後退を行い、どのセンサも反応しない場合には前進動作を行い、センサが反応次第発進位置までの自動後退を行うよう実装した。

3.2 自動初期位置調整機能の有効性検証実験

本実験では前節に示した自動初期位置調整機能により、図 3 に示す各初期位置でも発進が可能であることを検証する。本実験の実験設定は以下のとおりである。

- ・移動速度：0.3 m/s
- ・発進位置：図 3 に示す 6 つの位置
- ・試行回数：各位置にて 3 回ずつ

本実験の実験結果を表 1 に示す。自動初期位置調整機能を搭載しない場合、(c) の位置からの発進のみ成功している。続いて、自動初期位置調整機能を搭載した場合、(a)～(c) のどの位置から発進を開始しても発進に成功した。したがって本実験により、自動初期位置調整機能の有効性を示した。

3.3 加速の実現のための押込/引抜タイミングの算出

加速中でもタイミング制御を適切に行うためには、加速度を考慮する必要がある。そこで PSD センサ 1 と 2 を使用し、それぞれがぶら下がり機構の通過を検出した時、HanGrawler 2 の速度 v_1 、 v_2 を求める。そして走行開始からそれぞれが検出するまでの経過時間 t_1 、 t_2 を用いて加速度を計算する。加速中は等加速度運動と仮定して、式 (2) より T_d を求める。本論文では、この加速度を考慮した押込/引抜操作の制御を加速中のタイミング制御と呼ぶ。

$$T_d = \frac{-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2\alpha t_2}}{\alpha} - T_{\text{psd}} - T_{\text{push}} \quad (2)$$

Table 2 Success rate of the experiment to verify the effectiveness of new timing control

Velocity	Success	Timing Control during acceleration	
		On	Off
0.3m/s	Acceleration success	5/5	5/5
	Running success	5/5	5/5
0.6m/s	Acceleration success	5/5	1/5
	Running success	4/5	0/5
1.0m/s	Acceleration success	4/5	0/5
	Running success	2/5	0/5

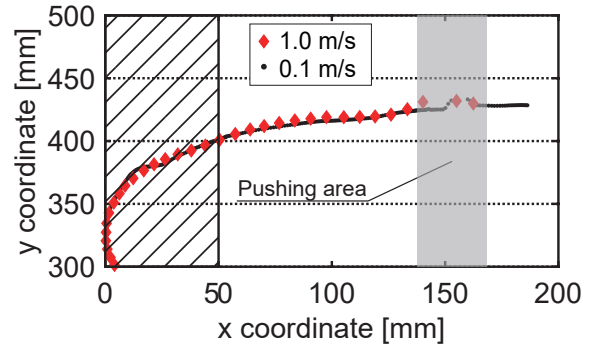


Fig.4 Trajectory of a marker on a shoe relative to the body

3.4 加速中の押込/引抜タイミング調整の有効性検証実験

本実験では加速中のタイミング制御の有効性を検証する。本実験の実験設定は以下のとおりである。

- ・移動速度：0.3, 0.6, 1.0 m/s
- ・実験条件：加速中のタイミング制御の有無
- ・試行回数：各速度、各条件にて 5 回ずつ

本実験の加速成功回数・走行成功回数を表 2 に示す。1.0 m/s の高速走行時、従来のタイミング制御では加速に一度も成功せず、加速中のタイミング制御により加速に成功している。したがって、本実験により加速度を考慮した加速中のタイミング制御の有効性を示した。

4 失敗しない高速走行実現のための挙動計測

4.1 挙動計測の要求機能の整理と計測手法の選定

本研究の計測における要求機能は、(i) 位置・姿勢を高精度で計測可能、(ii) 狭い空間を高速に移動する機械構造の位置・姿勢を計測可能である。物体の 3 次元の位置を計測する代表的な方法である、慣性センサ、カメラ、モーションキャプチャによる計測を比較し、最も高精度に計測可能なモーションキャプチャ (OptiTrack 製 V120 Trio) を選定した。

4.2 遠心力による履帯膨らみ挙動計測実験

本実験で検証したい仮説は、高速走行中に履帯の軌跡が遠心力で膨らみ、それによってぶら下がり機構と天井との間の猶予がなくなり、ぶら下がり機構が天井孔の淵と衝突しているというものである。そこでぶら下がり機構の挿入に成功している区間の履帯の挙動をモーションキャプチャを用いて計測し、異なる速度による履帯の挙動の違いを分析する。本実験の実験設定は以下のとおりである。

- ・移動速度：0.1, 1.0 m/s
- ・試行回数：各速度にて 10 回ずつ
- ・履帯の計測：モーションキャプチャ

本実験の実験結果の一例を図 4 に示す。図 4 は横軸に x 座標、縦軸に y 座標を取ったグラフであり、0.1 m/s と 1.0 m/s それぞれの速度でのマーカーの設置された履帯の機体に対する相対的な軌跡を示している。押込操作が行われる押込機構

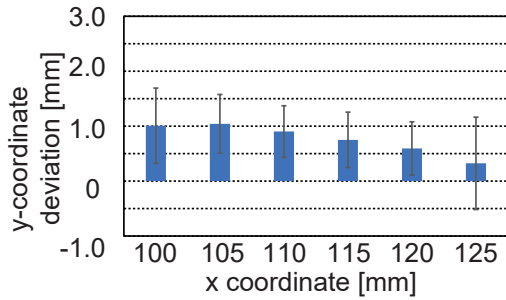


Fig.5 Average value of y deviation

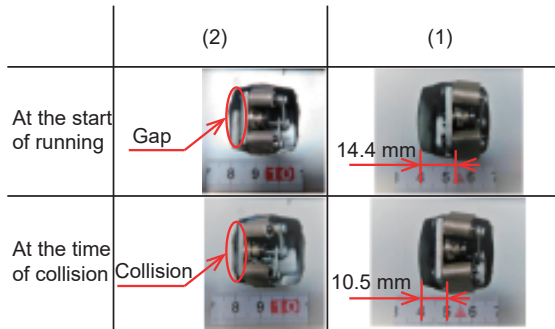


Fig.6 Relation between the position of the hanging mechanism and the collision

付近 ($x = 140 \sim 170$ mm) の位置は灰色で表している。灰色の区間にて y 座標の値が急激に大きくなっていることから、押込操作が正しく行われていると考えられる。

続いて高速走行時に、仮説通り履帯が膨らんでいるかどうかの分析を行う。履帯挙動の膨らみ量を定量的に評価するため、押込操作による軌跡変化がない $x = 100 \sim 125$ mm の位置での移動速度の違いによる y 座標の偏差を x 座標の値 5 mm ごとに算出し、計測 10 回分の平均値を図 5 に示す。式 (3) に、偏差の平均値の計算式を示す。

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{10} (y_{i,v=1.0} - y_{i,v=0.1}) \quad (3)$$

図 5 より、偏差の平均値は全ての位置で正の値を示しており、最大 1.0 mm ($x=105$) の偏差があることがわかった。つまり高速走行では低速走行に比べ履帯が膨らんでいるといえる。また、押込機構手前の $x=125$ mm の位置では、その偏差の平均値が 0.3 mm であることがわかった。 $x=125$ mm の位置において、天井面とぶら下がり機構との距離を計測したところ 2.8 mm であることから、高速走行中仮説通り履帯の挙動は膨らんでいるものの、2.8 mm の猶予に比べ膨らみ量は 0.3 mm であり微小である。したがって、履帯挙動の膨らみは衝突に直接関係していないことがわかった。

4.3 高速走行中のぶら下がり機構挿入位置計測と衝突への影響分析実験

本実験で検証したい仮説は、挿入済みのぶら下がり機構の天井孔に対する相対位置が発進時に比べてずれることで、ぶら下がり機構挿入時に天井孔に衝突するというものである。図 6 の下の行のように、1 つ前に挿入された (1) のぶら下がり機構の天井孔との相対位置が 10.5 mm 以下となると、次に挿入される (2) のぶら下がり機構が衝突することがわかっている。本実験では、衝突の有無で 2 種類の走行を行い、仮説の検証を行う。実験設定は以下のとおりである。

- ・移動速度：1.0 m/s
- ・試行回数：衝突の有無で 5 回ずつ
- ・履帯の計測：モーションキャプチャ
- ・ぶら下がり機構の計測：GoPro

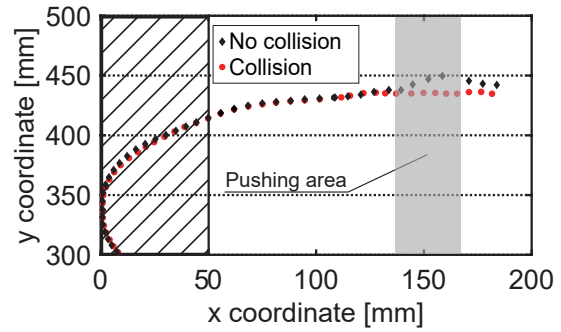


Fig.7 Trajectory of a marker on a shoe relative to the body with and without collision

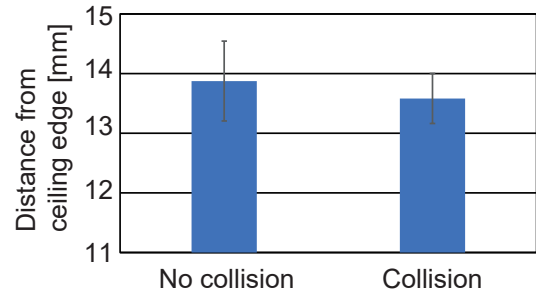


Fig.8 Displacement from the start of running

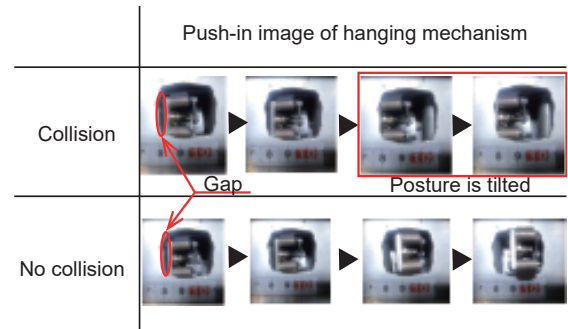


Fig.9 Steps to insertion of the hanging mechanism

本実験の実験結果の一例を図 7 に示す。図 7 より、衝突なしの場合の軌跡では、灰色の押込区間で軌跡が急上昇しているため、押込が行われていると読み取れる。しかし、衝突ありの場合の軌跡では急上昇がみられないため、押込が正常に作動していないことが読み取れる。押込時にぶら下がり機構が天井面に衝突すると、履帯が y 軸方向に押込まれないため、軌跡の急上昇が発生しなかったと考えられる。

本実験では、3 回目の押込時に衝突していたため、図 8 にその一つ手前である 2 回目の押込時に挿入したぶら下がり機構の、挿入時の天井孔に対する相対位置の計測 5 回分の平均値を示す。図 8 より、衝突時の挿入位置の平均値は衝突していないときに比べ進行方向へずれていることがわかった。しかし、図 6 に示す衝突時の天井孔に対する相対位置である 10.5 mm と比べると、衝突時の相対位置には 3 mm 以上猶予がある。したがって、ぶら下がり機構の挿入時の位置ずれが衝突の原因であるという仮説は正しくないことがわかった。

4.4 挙動計測実験のまとめ

GoPro を用いてぶら下がり機構の挿入を天井面の上面から撮影した映像の一例を図 9 に示す。図 9 の上の行は衝突して挿入に失敗した際の映像を、下の行は衝突せず挿入に成功した際の映像を示している。この図より、衝突時は穴の淵に向かってぶら下がり機構の姿勢が傾いて挿入されていることがわかる。挿入時、ぶら下がり機構の姿勢が傾く原因としては、押込機構の押込タイミングが早いこと、機体が pitch 方向に揺動していることが考えられる。

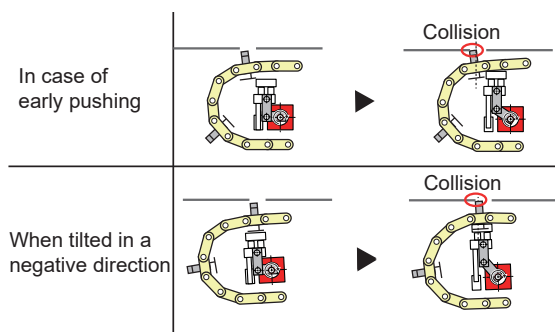


Fig.10 Conceptual sketch of collision during insertion of hanging mechanism

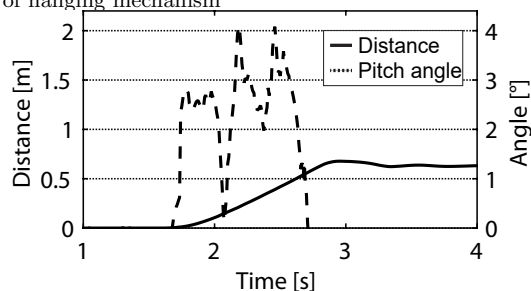


Fig.11 Pitch angle of HanGrawler during traveling

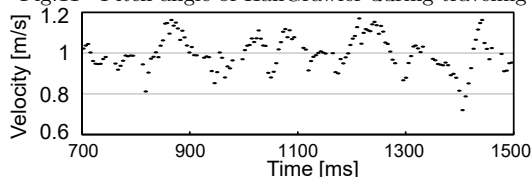


Fig.12 Measured speed using encoder

図 10 に、挿入時の衝突の模式図を示す。図 10 の上の行は押込タイミングが早い場合の挙動を、下の行は機体が反時計回り（負の向き）に傾いている場合の挙動を示している。この図より、押込タイミングが早い場合及び機体が負の向きに傾いている場合には、図 9 の衝突時の結果のように天井面に対しぶら下がり機構の姿勢が傾いたまま挿入され、衝突することがわかる。ここで、前節での実験で得られた走行中の機体の揺動の一例を図 11 に示す。図 11 より、走行中機体は正の向きに傾き続けているため、図 10 に示す負の向きに傾いている場合の衝突は起きえず、衝突の原因は押込タイミングが早いことであることがわかった。

5 押込操作タイミング適正化による高速走行の実現

5.1 押込操作タイミング適正化手法

押込/引抜タイミングは式 (1) で制御されており、式中の変数は速度のみである。そこで正確な速度計測のため、光学式ロータリエンコーダを駆動軸に取り付けた。図 12 は、1.0 m/s の等速運動をしている区間の計測データであり、等速運動中に士約 20 % 速度が変動していることがわかった。このような変動に対し $T_d(v)$ の計算を繰り返し行い、操作直前まで $T_d(v)$ を更新することで、操作タイミングの適正化を目指す。この制御を $T_d(v)$ 再計算によるタイミング制御と呼ぶ。

5.2 押込/引抜操作タイミング適正化評価実験

本実験では、 $T_d(v)$ 再計算によるタイミング制御の有効性を検証する。本実験の実験設定は以下のとおりである。

- ・移動速度：0.6, 0.9 m/s
- ・試行回数：10 回ずつ
- ・機体速度の計測：モーションキャプチャ

本実験の実験結果を表 3 に示す。また、0.6 m/s の走行データの一部を図 13、表 4 に示す。表 4 は、走行中のある押込操作時の繰り返し計算された $T_d(v)$ 及び、そこから求ま

Table 3 Success rate of the experiment to verify the effectiveness of control using encoder

Velocity [m/s]	Success rate
0.6	9/10
0.9	10/10

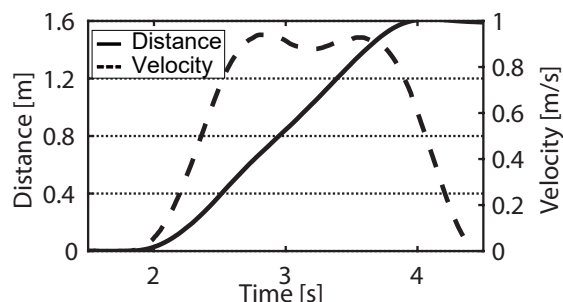


Fig.13 Measured data (0.9 m/s)

Table 4 Repeatedly calculated delay time (T_d)

	Current time [ms]	V1 [m/s]	Distance remaining [mm]	Td [ms]	Pushing time [ms]
1st	901.2	0.6	50	33.3	934.5
2nd	901.5	0.6	35	33.2	934.7
3rd	910.0	0.59	30	25.9	936.0
4th	918.6	0.57	26	20.6	939.2
5th	927.0	0.56	22	14.3	941.3
6th	935.5	0.52	18	9.4	944.9
7th	944.0	0.48	14	3.9	947.9

る押込操作指令時間の変化を示している。表 4 に示すように $T_d(v)$ を更新し押込指令時間を変化させることで速度変動に対応し、高速走行を失敗せずに行うことができた。本実験により、 $T_d(v)$ 再計算によるタイミング制御の有効性を示し、高速走行の信頼性を向上した。

6 結論

本研究では、無限軌道式天井移動ロボット“HanGrawler 2”の発進・加速・高速走行の信頼性の向上を目指した。

発進前に、PSD センサの反応の有無で自己位置を推定し、自動で発進位置まで移動する自動初期位置調整機能を実装し、実験でその有効性を示した。また、加速時も適切に押込/引抜操作を行えるよう、加速度を考慮した新たなタイミング制御を実装し、実験でその有効性を示した。

モーションキャプチャ及びカメラによる計測により、無限軌道式天井移動ロボットの高速走行時、履帯の軌跡の膨らみ、ぶら下がり機構の挿入時の位置ずれが起きていることがわかった。またぶら下がり機構と天井孔の淵との衝突は、押込タイミングが早いことによるぶら下がり機構の姿勢の傾きが原因であり、 $T_d(v)$ 再計算によるタイミング制御により高速走行の信頼性を向上した。

本研究の将来課題は、高速走行中の履帯挙動のモデル化、回転速度の変動の原因解明である。

文献

- 1) G. Ullrich: “Automated Guided Vehicle Systems: A primer with practical applications,” Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (2015).
- 2) T. Tran, et al: “An autonomous Mobile Robot System based on Serverless Computing and Edge Computing,” in Proc. IEEE APNOMS, pp.334-337, (2020).
- 3) R. Fukui, Y. Yamada, et al.: “HanGrawler 2: Super-high-speed and Large-payload Ceiling Mobile Robot Using Crawler,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2021).
- 4) 里岡樹ら「再構成可能な知能化空間に突起とレールを用いた Mobile Module の動作改善」, 第 20 回 SICE SI
- 5) 藤田勝久ら「履帯構造を有する移動体の走行時における履帯振動の解析」, 日本機械学会年次大会講演論文集, pp.519-520, (2000).