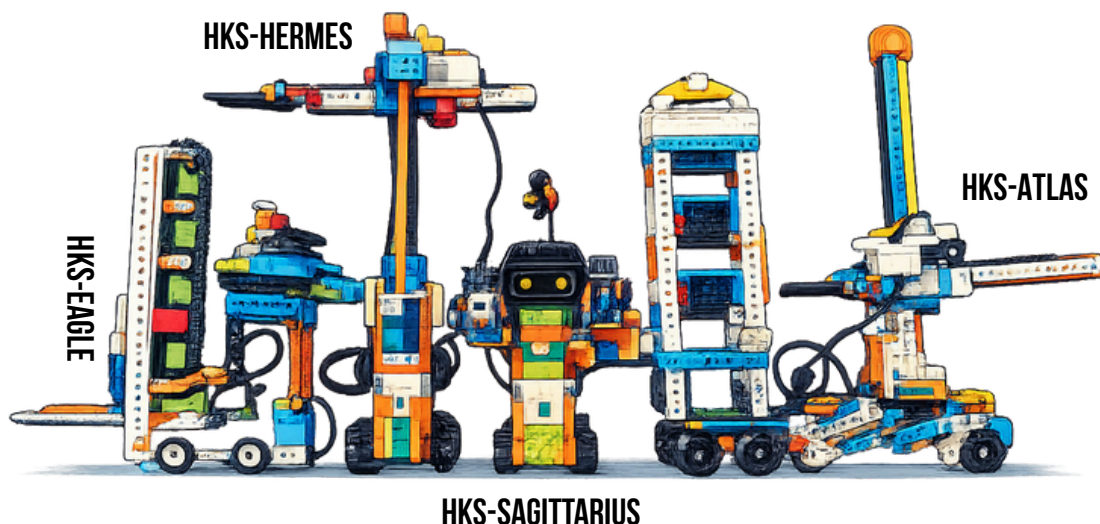


令和8年度 第34回 全国高等学校生徒商業研究発表大会

鳥栖商 スロジプロジェクト

— LEGOを用いた倉庫システムの構築と搬送方式の比較検証 —



都道府県名：佐賀県



学校名：佐賀県立鳥栖商業高等学校



生徒氏名（研究・発表者）

✓ 秋山 月花 ✓ 廣瀬彩月芽
✓ 遠藤 凛華 ✓ 松雪 未来
✓ 川口 由月 ✓ 眞鍋 紗彩
✓ 原 彩寧



生徒氏名（共同研究・メカニク）

✓ 小島 海斗 ✓ 中山 晴翔
✓ 最所 海翔 ✓ 丸山 志龍



指導者氏名

✓ 今村 豊記

Tosu Commercial High School Smart Logistics Project
— Construction of a Warehouse System Using LEGO
and Comparative Evaluation of Transport Methods —

START NOW

© Tosu Commercial High School ICT Club

目次

1 はじめに.....	3
2 研究の背景と現状分析	3
3 研究の概要.....	4
4 研究仮説	5
5 研究の企画と詳細.....	6
(1) 模擬倉庫システム全体の構成	6
(2) 4 機の詳細	6
01 ハコスケ-イーグル HSK-EAGLE	7
02 ハコスケ-サジタリアス HSK-SAGITTARIUS	8
03 ハコスケ-ヘルメス HSK-HERMES	10
04 ハコスケ-アトラス HSK-ATLAS.....	12
(3) ヘルメス VS アトラス	14
6 プロジェクトの評価	17
(1) 仮説の検証	17
(2) 外部評価	19
(3) 研究を通して得た経験と学び	20
(4) 課題.....	21
(5) 今後の展開	21
7 おわりに	22
8 参考資料	23

1 はじめに

私たち鳥栖商業高校情報処理部は、商業科で学ぶ**プログラミング**や**情報処理**の知識と技術を活用し、実社会の課題解決をテーマとした研究活動に取り組んでいます。また、本校がある鳥栖市は九州における物流の要衝です。このことから、「**情報処理×物流**」を研究テーマの柱としています。

昨年度は、**ルート最適化**（巡回セールスマン問題）に関する研究を行い、各方面から高い評価を受けました。そして今年は、その「**効率よく運ぶ**」という考え方を継承・発展させ、**倉庫の中での物流の効率化**に挑戦しました。



2 研究の背景と現状分析

今回の研究テーマを決めたきっかけは、「卒業生講話」でした。**トラスコ中山**に勤務されている卒業生の先輩から、「今度、弊社に**自動倉庫**が導入される」という話を伺い、自動倉庫という存在に強い興味を持ちました。

物流業界では、人手不足や業務の高度化により、倉庫作業の効率化が重要な課題となっています。**DX**（デジタルトランスフォーメーション）の進展に伴い、**自動倉庫システムの導入**も進んでいます。実際に、F-LINE 株式会社福岡第一物流センターでは、株式会社ダイフクのマテリアルハンドリングシステムの導入により、現場作業者を約 **20 人削減**し、約 100 人を必要としていた作業を約 80 人で運営できるようになったことが報告されています。（※参考資料は P.22 に掲載）このような省人化は、人件費の削減や労働力不足への対応にもつながることが期待されており、**自動倉庫は物流業界において重要な技術**となっています。そこで、情報処理を学ぶ私たちは、自動倉庫の仕組みを知りたいと考え、**現状分析として、現在使われている様々な自動倉庫の仕組みや動きを観察**しました。

観察では特に搬送方式に着目しました。多くのシステムでは、荷物を 1 つずつ搬送する方式が主流になっていました。しかし、この方式では、荷物を搬送するたびに元の位置へ戻る必要があります。そこで、「**複数の荷物を同時に搬送**できれば、さらに効率化できるのではないか」と考え、その改善方法について検討を行いました。また、単純に棚へ荷物を保管・搬出するだけでなく、荷物の搬入から在庫管理、搬送までを含めた倉庫システム全体を模擬

的に再現したいと考え、RFID を用いた在庫管理や倉庫内での搬送方式も研究対象としました。

当初は、画面上でのシミュレーションによる研究を考えました。しかし、近年は生成 AI やシミュレーション技術の発展により、仮想空間上での再現は比較的容易になっています。一方、実環境では、摩擦、重量、積載時の安定性、空間制約、RFID の読み取り精度など、実際に動かしてみなければ分からない要素が多く存在します。そのため、よりリアルに近い場面を求め、あえて「**実機による検証**」に挑戦することにしました。ただし、実機による検証を行うためには、実際に動作する構造物が必要です。本校は工業高校ではないため、金属加工や溶接などを用いて装置を一から製作することは容易ではありません。

そこで着目したのが「**LEGO**」です。LEGO は玩具ではあるものの、精密に設計されており、自由度の高い構造物を安全に組み立てることができます。また、部品の組み換えも容易であるため、試作や改良を繰り返しながら研究を進めることが可能です。

さらに、本校には小学生向けプログラミング教室用として導入されていた「**LEGO BOOST**」がありました。LEGO BOOST は、モーターやセンサーを備え、プログラミングによる制御が可能な教育用 LEGO 教材です。

LEGO BOOST を活用することで、模擬的ではあるものの、実機に近い形で倉庫システムを再現できるのではないかと考えました。



3 研究の概要

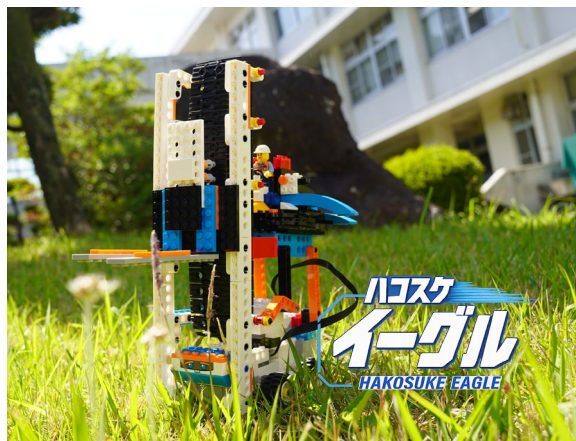
私たちは、LEGO を用いて模擬的な倉庫環境を構築し、倉庫内における自動搬送システムの効率化について研究を行いました。特に、搬送方式の違いによる効率の差について比較・検証を行いました。

なお、物流の効率化や自動化、情報技術の活用を総合的に研究していることから、研究全体を「**鳥栖商スマロジプロジェクト**」と名付けました。「スマロジ」とは、「スマートロジスティクス (Smart Logistics)」を略した造語であり、情報技術や自動制御を活用して物流を効率化するという意味を込めています。

そして、それらの機能を役割ごとに分担するため、LEGO で複数の機体を開発しました。
これらの機体群を「ハコスケ」シリーズと名付け、次の4機で構成しています。

ハコスケ-イーグル

フォークリフト型搬送機



ハコスケ-サジタリアス

RFID リーダーを用いた在庫管理機



ハコスケ-ヘルメス

AS/RS 型単体搬送機



ハコスケ-アトラス

AS/RS 型複数搬送機



※AS/RS (AUTOMATED STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM)

自動倉庫において荷物の搬送・保管・取り出しを自動で行うシステム

4 研究仮説

仮説①

LEGO を用いることで、模擬的な自動倉庫とそれに関わる搬送・制御システムを構築することが可能である。

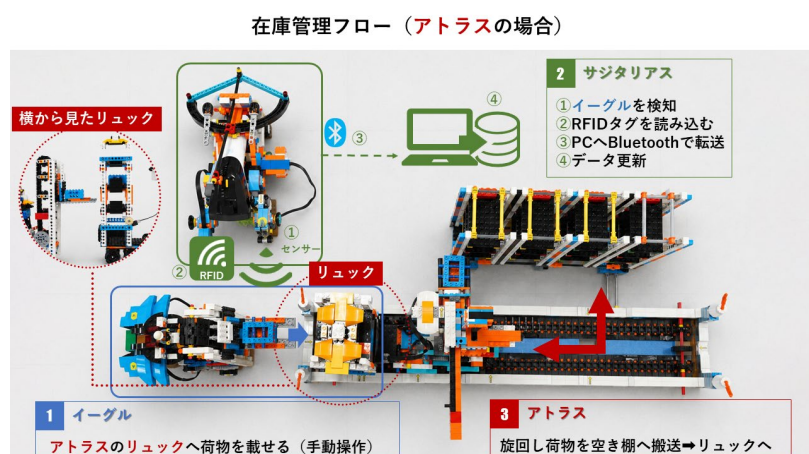
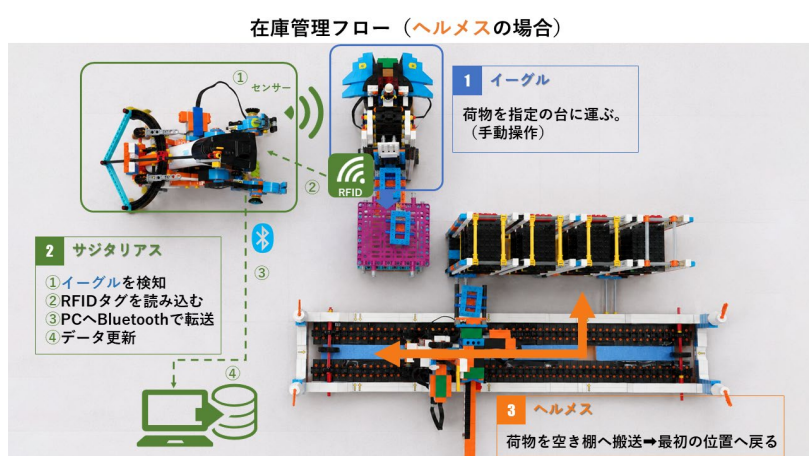
仮説②

一度に多くの荷物を搬送できる複数搬送型は、単体搬送型よりも効率面で有利である。

5 研究の企画と詳細

(1) 模擬倉庫システム全体の構成

「実際に動作すること」を重視し、理論だけではなく**実機による検証**を行うため、LEGOを用いて模擬的な自動倉庫システムを構築しました。仮想の倉庫内で役割の異なる4機体を連携させることで、搬送から在庫管理、棚入れまでを行います。まず、「イーグル」が荷物の搬送を担当します。次に、「サジタリアス」がRFIDを用いて荷物情報を読み取り、在庫管理を行います。その後、「ヘルメス」または「アトラス」が荷物を棚へ搬送・格納します。



なお、今回の研究では「棚入れ」に焦点を当てて検証を行いました。「ピッキング」は、基本的に棚入れとは逆の動作で可能ですが、今回は内容を整理する目的から省略しています。

(2) 4 機の詳細

研究の主役である4機の役割や機能を紹介します。なお、開発にはLEGO BOOSTのテンプレートを参考にした部分もありますが、本研究で利用した4機は、研究目的に合わせて**構造・機構・制御プログラム**を独自に設計・開発したオリジナル機体です。

01 ハコスケ-イーグル HSK-EAGLE

ハコスケイーグルは、手動のコントローラーで動く荷物を搬送用の**フォークリフト型機体**です。

研究初期段階では、まず LEGO そのものの構造や制御方法を理解する必要がありました。そのため、最初に比較的シンプルな構造であるイーグルの開発を行いました。イーグルの製作を通して、**LEGO BOOST の基本的なプログラミング方法やモーター制御**について学習しました。



特に苦労したのが「**ギア比**」の調整です。荷物を持ち上げる仕組みを製作した際、速度を重視したギア構成では十分な力が得られず、荷物を持ち上げることができませんでした。一方で、パワーを重視したギア構成では持ち上げることはできるものの、動作速度が低下しました。そのため、実際にギア構成を何度も変更しながら「速度」と「パワー」のバランスを検証しました。この過程を通して、単純なプログラミングだけではなく、機械構造そのものが搬送性能に大きく影響することを学びました。



また、機体の設計においては、全体のバランスの重要性も学びました。例えば、フォーク部分は改良を重ねる中で当初の約2倍の高さとなりましたが、その結果、重心が前方に偏り、全体のバランスを崩す場面もありました。そのため、後方に一見無駄にも見える構造を追加し、前後の**バランスを取る工夫**を行いました。ちなみに、このようなバランス調整を商業生らしく「借方・貸方」と呼んでいます。

さらに、モーター出力や移動距離などの**各種パラメータ**を実機で検証しながら調整しました。例えば、モーター出力80%という数値も、実際の速度や搬送能力は機体の構造や荷重によって変化するため、実機を動かしながら最適な値を決定しました。

これらの経験は、後に開発するヘルメスやアトラスのような複雑な機体を構築するための**基礎的な技術習得**につながりました。

02 ハコスケ-サジタリアス



市販の
RFID リーダー

ハコスケ-サジタリアスは、市販の **RFID リーダー** を搭載した**在庫管理機体**です。

イーグルが所定の位置を通過したことを感知すると、市販の RFID リーダーのスイッチを押し、RFID タグを読み取る仕組みとなっています。



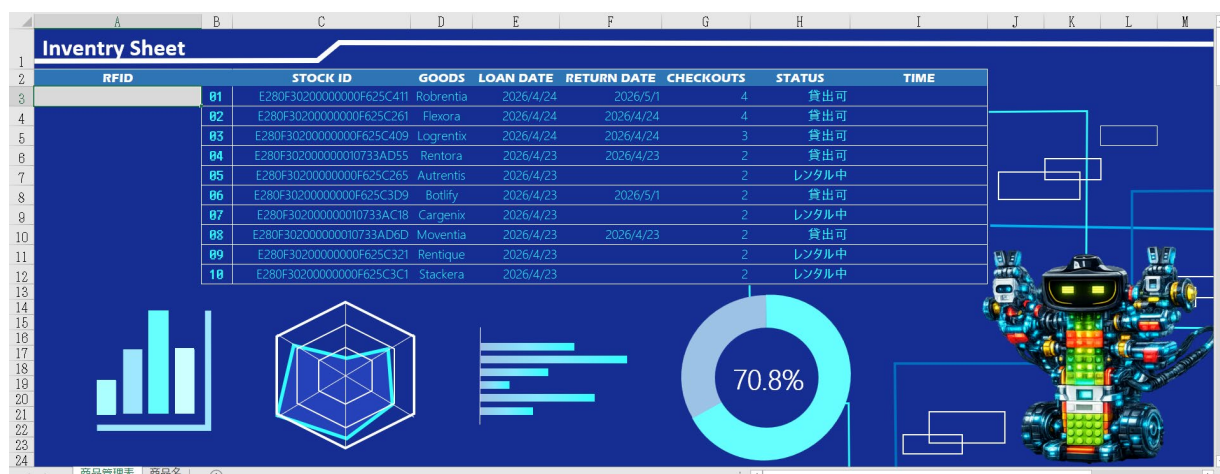
センサーでイーグル感知



RFID リーダーの
スイッチ ON!

構造自体は「スイッチを押すだけ」という単純なのですが、実際には**絶妙な力加減**が必要でした。押し込む力が弱すぎると反応せず、強すぎると機体や装置に負荷がかかります。そのため、LEGO ブロックの角度や、それを制御するプログラムの調整に苦労しました。特に、モーターをどの程度のパワーで、どの時間だけ動かすかを細かく検証しながら調整を行いました。

荷物に貼られた RFID タグを RFID リーダーが読み取ると、その情報は **Bluetooth** 経由で PC へ送信されます。PC 上では **Microsoft Excel** を活用し、**タグ情報に対応した商品名の表示**や、**在庫の有無の変更を自動で行う仕組み**を構築しました。



商品管理は使い慣れた **Microsoft Excel** で行います

なお、今回、倉庫内の商品を「レンタル用品」と想定して管理しています。RFID タグが読み取られると、商品名や貸出状況が自動的に更新されるようになっています。この仕組みには、商業科目の「ソフトウェア活用」や「プログラミング」で学習した **Excel 関数** と **Excel マクロ (VBA)** を活用しました。



サジタリアスを開発する前に、RFID リーダーの性能を確認するため、2月に開催された**校内マラソン大会**で**実証実験**を行いました。その内容とエピソードを紹介します。

各選手に RFID タグを貼付し、ゴール地点でタグを読み取ることで通過時刻を自動記録しました。さらに、Excel 関数とマクロを用いてタイムやクラス順位を自動集計する仕組みを構築し、全選手のゴール直後には成績表を完成させることができました。

準備中には失敗もありました。市販の RFID タグを 100 枚購入していましたが、必要枚数は「8 クラス × (女子 8 人 + 男子 5 人) = 104 枚」であることが判明し、4 枚不足していました。そこで、部員から集めた無印良品やユニクロ、GU の**商品タグ**を代用しました。これらのタグも問題なく読み取ることができ、購入したタグと同様に 96 ビット (24 桁の 16 進数) の ID を取得できました。

この実証実験により、RFID リーダーの実用性を確認するとともに、その後のサジタリアスの開発につながる貴重な経験を得ることができました。

ミスから始まった出来事でしたが、結果的には「**情報処理**」の教科書にも出てくる RFID の実用性や互換性を実感する機会となりました。

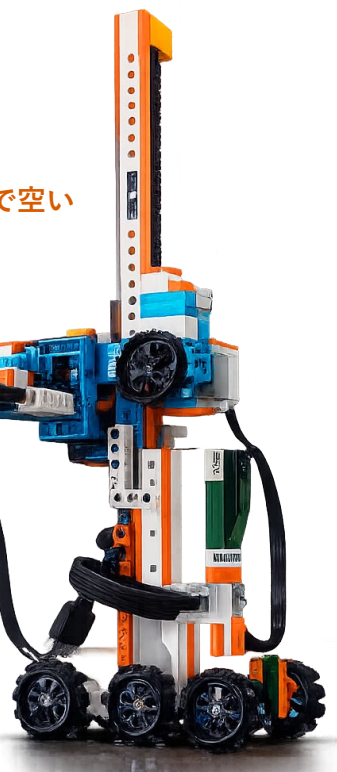


03 ハコスケ-ヘルメス

ハコスケ-ヘルメスは、イーグルによって搬送された荷物を、**自動で空いている棚へ格納する単体搬送型機体**です。

最初に倉庫内で使用する**棚**と**荷物**の製作を行いました。

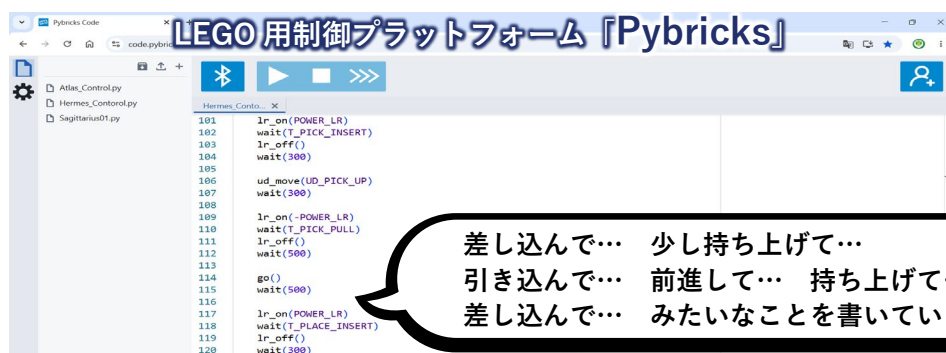
省スペース化を考えると、棚と荷物の間隔はできる限り狭くすることが理想ですが、実機ではわずかなズレでも動作不良につながるため、あえて少し余裕を持たせた設計としました。



次に、ヘルメス本体の構築を行いました。ヘルメスは、「**前後**」「**上下**」「**左右**」の**3方向**つまり3次元的に動作します。限られたモーター数とギアを活用し、これらの動作を実現する機構を構築しました。「前後」「上下」は同時に動くことで「**斜めの動き**」となり時短につながります。



制御プログラムは**Python**で記述しています。LEGO用制御プラットフォーム「Pybricks」内でLEGOをBluetoothで接続し、エディタにPythonでコードを書いて制御できます。単純に棚へ荷物を運ぶだけではなく、荷物を持ち上げる際に少し上昇させる、棚へ差し込む際に高さを微調整するなど、細かな動作についてもコードへ落とし込みました。



当初は、棚の位置が均一であることから、簡単な数式によって座標を求められると考えていました。しかし、実際の機体では、棚の微小な歪みや歯車のかみ合わせの位置、さらには電池残量による出力差などの影響により、**理論通りには動作しません**でした。そのため、最終的には**各棚の座標を一つずつ実測しながら調整**を行いました。

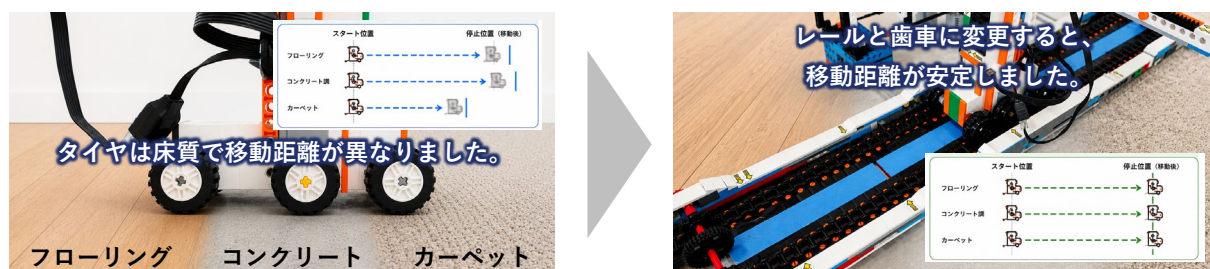


```
22 # 在庫 (0=空き, 1=使用中)
23 inventory = {
24     "A1": 1, "A2": 1, "A3": 0,
25     "B1": 1, "B2": 1, "B3": 1,
26     "C1": 1, "C2": 1, "C3": 1,
27     "D1": 1, "D2": 1, "D3": 1,
28 }
29
30 SHELF = {
31     "A1": (360, -360, 300, 850, -100, -1050),
32     "A2": (350, -350, 300, 300, -100, -1050),
33     "A3": (350, -350, 100, 0, -100, -1050),
34
35     "B1": (585, -585, 300, 850, -100, -1050),
36     "B2": (595, -595, 300, 300, -100, -1050),
37     "B3": (595, -595, 80, 0, -100, -1050),
38
39     "C1": (830, -830, 300, 850, -100, -1050),
40     "C2": (830, -830, 300, 300, -100, -1050),
```

棚の空き情報
「0=空き」「1=使用中」

各棚の座標

特に苦労したのが、タイヤを利用した前後移動です。床の材質や摩擦の違いによって毎回進む距離が変化し、同じプログラムでも停止位置にズレが発生しました。そこで、タイヤによる移動方式を見直し、新たに**レール**を敷き、歯車で移動する構造へ変更しました。その結果、動作が比較的安定し、一定距離を移動できるようになりました。

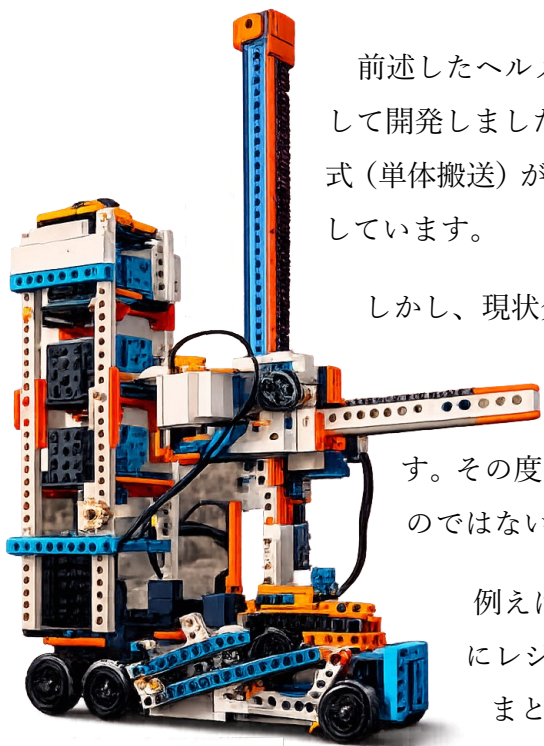


なお、棚の座標管理や荷物の有無の判定には、「**プログラミング**」の授業で学習した**配列**の知識を活用しました。各棚の状態を「0=空き」「1=使用中」として管理し、最初の基準地から見て、空いている棚のうち最も近い場所を選択するようにしました。授業で学んだ内容が、実際のシステム開発に応用できることを実感しながら研究を進めることができました。

将来的には、レンタル頻度の高い商品を手前の棚へ、頻度の低い商品を奥の棚へ配置するなど、使用頻度を考慮した棚配置にも発展させたいと考えています。しかし今回は、問題を簡略化するため、使用頻度による配置最適化は行わず、「空いている棚のうち最も近い場所に入れる」という条件で検証を行いました。

ヘルメスは、一度に運べる荷物が1つのみ（単体搬送）という制約がありますが、その分、構造がシンプルで誤動作が少なく、消費電力も抑えられるという特徴があります。

04 ハコスケ-アトラス

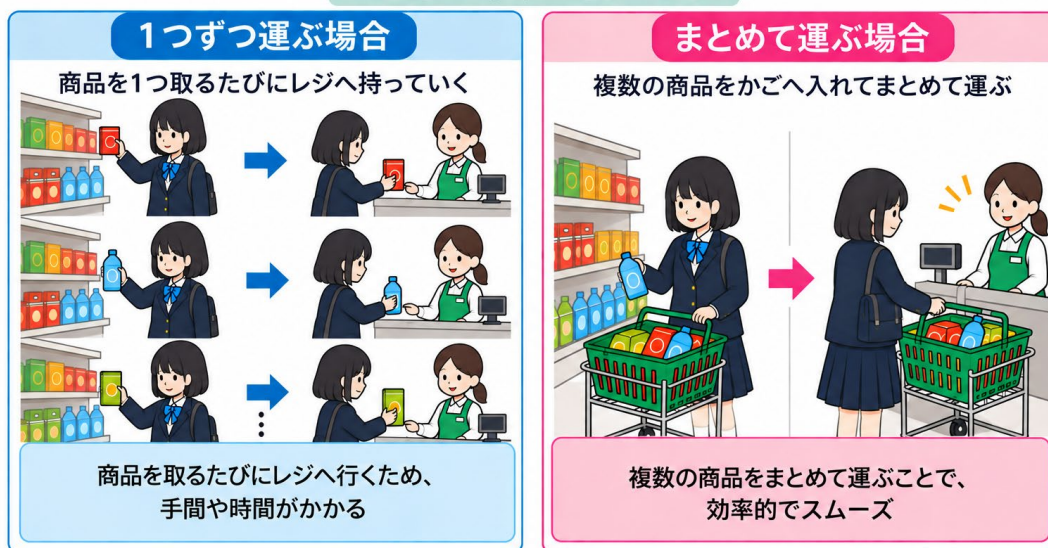


前述したヘルメスは、既存の AS/RS（自動倉庫システム）を参考に開発しました。実際の自動倉庫では、荷物を 1 つずつ搬送する方式（単体搬送）が多く採用されているため、ヘルメスはその構造を模倣しています。

しかし、現状分析段階で本物の自動倉庫を観察したとき、疑問が生じました。**ヘルメスのような単体搬送では、荷物を 1 つ搬送するごとに、元の位置へ戻る必要があります。**その度に時間がかかってしまい**タイムパフォーマンスが悪い**のではないかと感じました。

例えば、日常生活における買い物では、商品を 1 つ取るたびにレジへ持っていくことはなく、複数の商品をかごへ入れてまとめて運びます。

日常の買い物の例



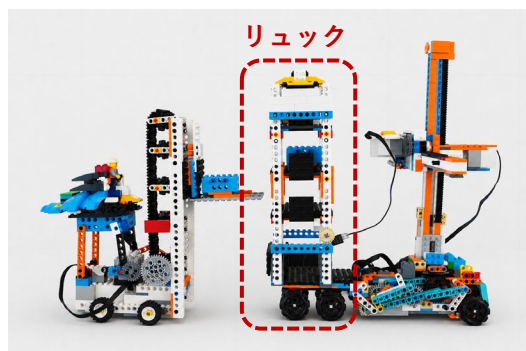
このように、日常生活では「まとめて運ぶ」方式の方が効率的である。

同様に、自動倉庫においても、**複数の荷物を保持した状態で棚入れを行う**ことができれば、より高速に作業ができるのではないかとこの着想に至りました。

この発想をもとに開発したのが、**複数搬送型機体**「ハコスケ-アトラス」です。

アトラスは、本体後部に私たちが「リュック」と名付けた荷物置き場を備えています。このリュック部分も本体と一体となって移動し、荷物を複数保持することが可能です。そのため、毎回荷物を取りに戻る必要がなく、手元にある荷物を順番に棚へ格納できます。基本的な構造はヘルメスと似ていますが、

- 荷物を保持する「リュック」機構を持つこと
- リュックから棚方向へ荷物を移動させるための「90度旋回軸」を持つこと



の2点が大きく異なります。

ただ、LEGO BOOST には使用可能なモーターが4つしかないという制約があります。そのため、限られたモーター数の中で、「前後」「上下」「左右」に加え、「旋回」の動作まで実現しなければなりません。



そこで、ギアの組み合わせや動力伝達の工夫を繰り返しながら、4つのモーターのみで複数の動作を実現できる構造を構築しました。ヘルメス以上に複雑な構造となったため、組み立てや制御の難易度は大きくあがりました。

また、アトラスでは複数の荷物を同時に保持するため、どの順番で棚入れを行うかという「ルート」の考え方も必要となりました。

ここで、私たちには参考となる**先輩方の先行研究**がありました。昨年度、本校情報処理部では、**巡回セールスマン問題** (TSP) をテーマとして、コンビニ 10 店舗を効率よく巡回する**ルート最適化**の研究を行いました。

先輩方の研究では、店舗数が多い場合には「遺伝的アルゴリズム」、比較的少ない場合には「貪欲法」を利用することで十分な結果が得られるという結論が示されていました。今回は、棚数や荷物数が比較的少ないことから、計算が単純で処理速度にも優れる「**貪欲法**」を採用し、現在の位置から最も近い棚を優先して選択することで搬送効率の向上を図りました。

```

54 target = None
55 best_score = None
56
57 for name in SHELF:
58     if inventory[name] == 0:
59         score = distance_score(name)
60         if best_score is None or score < best_score:
61             best_score = score
62             target = name
63

```

←「貪欲法」は
「プログラミング」で
学習する範囲で書けます

昨年度とは研究テーマ自体は異なっていますが、**ルート最適化の考え方を倉庫搬送へ応用することで、継続性のある研究**につながっていると思います。

なお、「遺伝的アルゴリズム」とは、生物の進化の仕組みを参考にしながら、より良い解を探索していくアルゴリズムです。一方、「貪欲法」とは、その時点で最も条件の良い選択肢を順番に選択していくアルゴリズムです。

(3) ヘルメス VS アトラス

仮説②の実証に向けて**単体搬送機**である**ヘルメス**、**複数搬送機**である**アトラス**の比較・検証を行いました。

① 移動距離による比較（理論モデル）

ヘルメスと**アトラス**の構造上の違いについて、理論上の移動距離に着目して考察しました。

イーグルが荷物を置く基準地を座標 $O(0, 0)$ とし、棚の位置を $P(x, y)$ として表します。棚までの距離は、次の直線距離で求めます。

$$d = \sqrt{(x - 0)^2 + (y - 0)^2} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

ヘルメスは1回に1個しか搬送できないため、荷物を棚入れするごとに基準地と棚を往復する必要があります。そのため、3か所の棚を P_1, P_2, P_3 とすると、**ヘルメス**の総移動距離は、

$$H = 2 \times \{d(O, P_1) + d(O, P_2) + d(O, P_3)\} \quad \text{となります。}$$

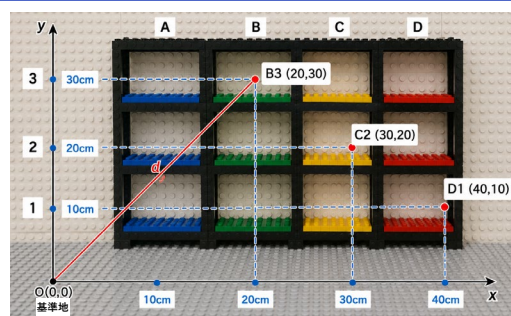
一方、**アトラス**は3個をまとめて搬送できるため複数の棚を連続して回ることができます。棚を $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ の順に回り、最後に基準地へ戻る場合、**アトラス**の総移動距離は、

$$A = d(O, P_1) + d(P_1, P_2) + d(P_2, P_3) + d(P_3, O) \quad \text{となります。}$$

② 具体値による比較

次に、具体的な数値を用いて比較を行います。

今回作成した棚は、右図のように荷物がある基準地から最初の棚までを縦・横約 10cm、横方向に 4 列、縦方向に 3 段をそれぞれ約 10cm 間隔で配置しています。ここでは計算上 10cm とします。



例として、B3・C2・D1 の 3 か所に荷物を搬送する場合を考えます。基準地を $O(0, 0)$ とした場合、各棚の座標は次のように表せます。

$$B3 = (20, 30)$$

$$C2 = (30, 20)$$

$$D1 = (40, 10)$$

ヘルメス は 1 個ずつ搬送し、毎回基準地へ戻るため $\boxed{O \rightarrow B3 \rightarrow O}$ $\boxed{O \rightarrow C2 \rightarrow O}$ $\boxed{O \rightarrow D1 \rightarrow O}$ の経路となります。

一方、**アトラス** は 3 個をまとめて搬送できるため $\boxed{O \rightarrow B3 \rightarrow C2 \rightarrow D1 \rightarrow O}$ の経路となります。

このときの総移動距離は、

$$\text{ヘルメス} : H = 2 \times \{d(O, D1) + d(O, C2) + d(O, B3)\}$$

$$= 2 \times (36.1 + 36.1 + 41.2) \approx 226.8\text{cm}$$

$$\text{アトラス} : A = d(O, B3) + d(B3, C2) + d(C2, D1) + d(D1, O)$$

$$= 36.1 + 14.1 + 14.1 + 41.2 \approx 105.5\text{cm} \text{ となります。}$$

この結果から、**アトラス** は **ヘルメス** と比較して約半分の移動距離で搬送できることが分かります。

12 個の棚から 3 個の棚を選ぶ全 220 通り (${}_{12}C_3$) について同様に計算すると、**ヘルメス** の平均移動距離は約 200.4cm、**アトラス** は約 96.5cm となります。**アトラス** は平均して約 50% 移動距離を削減できることが分かり、理論上は複数搬送型である **アトラス** の方が有利になると予想できます。

③ 定量評価

次に**実機による比較**です。

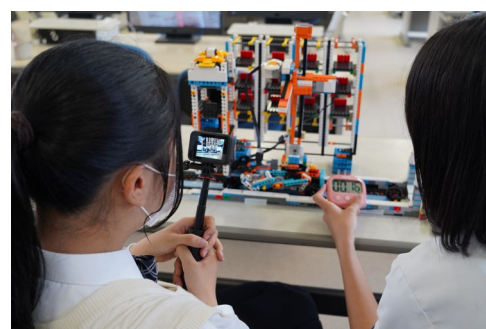
数値として比較可能な項目について評価を行いました。

評価項目	ヘルメス	アトラス
1回で搬送できる荷物数	1個	3個
棚入れ完了平均時間（荷物3個）	20.0 秒×3 回=60.0 秒	66.8 秒
必要スペース	19,091cm ³	38,372cm ³
誤動作回数（10 回中）	約 1 回	約 4 回
必要パーツ数（ギア数）	261(3)	746(7)
プログラム行数	122 行	170 行
構築時間	約 45 日	約 75 日

最も期待した棚入れ完了平均時間に有意な差は見られず、むしろ**アトラス**の方が時間がかかりました。

アトラスは往復する回数を減らすことができるため搬送効率の向上が期待されましたが、その分構造が複雑になるという課題があります。例えば、**ヘルメス**が3次元同時に動く「斜めの動き」ができたのに対し、**アトラス**はスペースや、構造上の複雑さから「斜めの

動き」を断念しています。また、**アトラス**は機体が重くスピードを上げるのが難しかった点、90度の旋回に時間がかかっている点、などが原因であると考えています。



④ 定性的評価

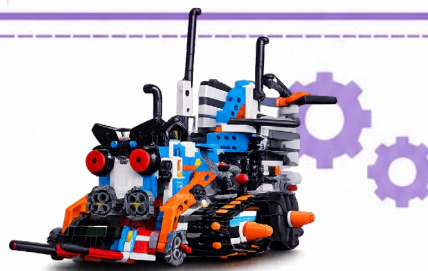
数値化が難しい項目は、実際の開発・運用の中で感じた特徴や傾向から評価を行いました。

評価項目	ヘルメス	アトラス
保守性	高	低
制御難易度	易	難

アトラスは構築そのものにも多くの時間を要しましたが、**故障が多く**、部品の交換やメンテナンスに多くの時間がかかりました。また、**プログラムエラーも多発**しました。

一方、**ヘルメス**は構造がシンプルで安定性が高く、非常に扱いやすい機体でした。部内では、「ヘルメスは優等生、アトラスは問題児」という言葉が出るほど、その違いを実感する結果となりました。

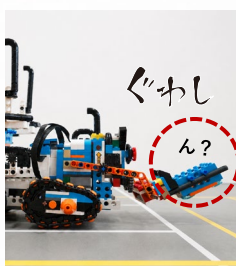
この結果は、現実の物流業界においても、**多くの企業がヘルメスと同じ単体搬送型を主流として採用している**理由を考えるうえで、参考になるものでした。



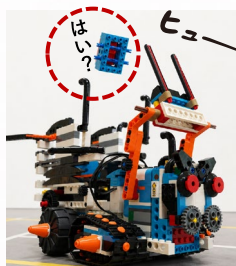
アトラスの開発前に製作し、「ベヒモス」と名付けた試行機を紹介します。

ベヒモスは、「とにかく大量の荷物を運ぶ」ことを最優先に考えて開発した機体です。

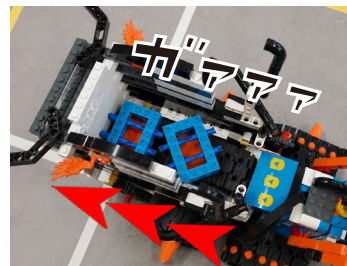
LEGO BOOST のテンプレートを参考にして、荷物をすくい上げ、そのまま後部の荷台へ放り込む構造としました。また、荷台部分にはコンベアー機構を追加で搭載し、積載された荷物が自動的に後方へ送られる仕組みを考えました。



①すくう



②放り込む



③コンベアー
で奥に詰める

この機体は非常にインパクトが強く、周りからの反応も非常に良いものでした。見た目だけでなく「大量搬送」というアイデア自体には高い評価を得ることができました。しかし、実際の動作は非常に乱暴であり、荷物を丁寧に扱うことができていません。そのため、現実的には適していないと判断し、研究機としての採用を早めに見送りました。

ただ、この機体を「失敗」とは捉えていません。既存の発想にとらわれず、極端なアイデアを実際に形にして検証したこと自体には大きな価値があります。ベヒモスのような斬新な発想や大胆な試作の積み重ねが、新たなイノベーションにつながると考えています。

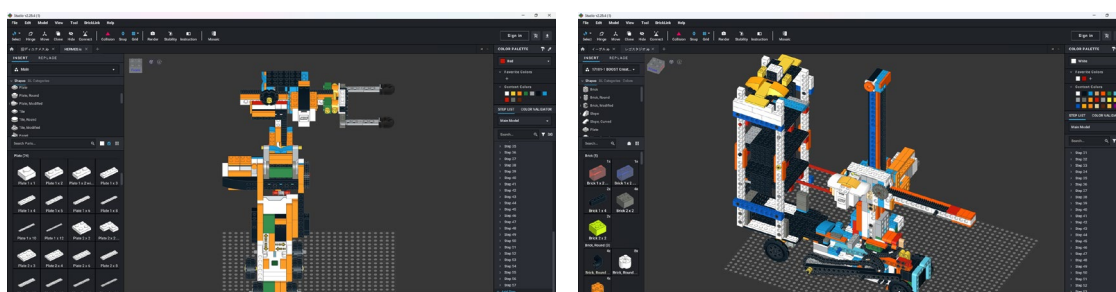
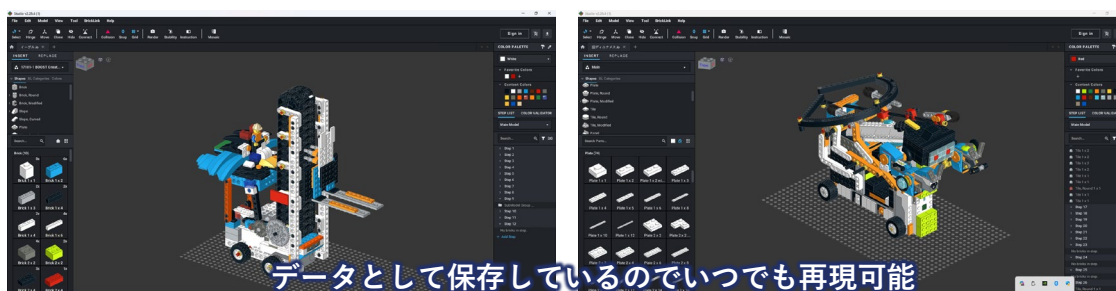
6 プロジェクトの評価

(1) 仮説の検証

仮説①の「LEGO を用いることで、模擬的な自動倉庫とそれに関わる搬送・制御システムを構築することが可能である。」を検証します。

研究の結果、RFID による在庫管理、棚入れ機構、自動搬送機構などを実際に構築し、動作させることができました。また、実機ならではの摩擦や重量、位置ズレなどの課題も確認できたことから、PC内のシミュレーションだけでは得られない検証を行うことができました。

さらに、「**BrickLink Studio2.0**」というソフトウェアを用いて機体構造をデータとして設計・管理しました。設計データを保存・共有することで同様の機体を再構築しやすく、**再現性をもった研究**につながっていると考えています。



以上のことから、「LEGO を用いることで、模擬的な自動倉庫とそれに関わる搬送・制御システムを構築することが可能である」こと、かつ、「再現性をもった研究活動である」ことを確認できました。

仮説②では、「一度に多くの荷物を搬送できる複数搬送型は、単体搬送型よりも効率面で有利になる。」と考えました。

検証の結果、複数搬送型であるアトラスは、複雑な構造による誤動作やコスト増加、必要スペースの拡大、保守性の低下などの課題が確認されました。一方、単体搬送型であるヘルメスは、一度に搬送できる荷物数は少ないものの、構造がシンプルで、安定性や保守性に優れていました。

このことから、複数搬送型が常に有利であるとは言えず、効率だけでなく、安定性・コスト・保守性なども含めて総合的に方式を選択する必要があることが分かりました。現実の物流業界では単体搬送型が多く採用されています。今回の比較により、その理由について自分たちで導くことができたかと捉えています。

なお、アトラスについては、今回の研究では技術不足により十分に性能を引き出し切れなかった部分もありました。今後、**機体構造や制御技術の改善を進めることで、複数搬送型がより有利になる可能性もある**と考え、仮説②の実証を続けていきます。

(2) 外部評価

研究内容の客観性を高めるため、外部機関へ評価を依頼しました。

<トラスコ中山 様>

トラスコ中山株式会社様を訪問し、本物の自動倉庫システムを見学するとともに、私たちが作った機体でデモンストレーションを行い、評価・助言をいただきました。

まず、私たちの研究について、「非常によくできており、自動倉庫を真剣に観察しながら研究できている」という評価をいただきました。高校生の研究でありながら、**実際の物流現場に近い視点で研究を進めている点**を高く評価していただきました。

その中で、現在実際に導入されている本物の自動倉庫は、私たちの「ヘルメス」に近い構造であると言っていただきました。また、ヘルメスも起動に時間がかかりますが、本物の自動倉庫も指示を送ってすぐに動き出すわけではなく、動作開始までに数分かかる場合があるという説明を受け、共通点があることも教えていただきました。



一方で、荷物の固定方法や位置ズレについても助言をいただきました。特に、私たちの機体では搬送中に荷物が動いてしまう場面があり、ヘルメス・アトラスの両機体とも精度向上の必要性を感じていました。実際の自動倉庫では、**位置ズレ防止の構造や、多数のセンサーを用いたセンシング技術**が活用されていることを教えていただきました。

<シャープ サポートアンドサービス 様>

システム制御の観点から、シャープサポートアンドサービス株式会社様へ評価を依頼しました。AGV（自動搬送機）の制御に携わる技術者の方から「出来栄は素晴らしい」との評価をいただきました。その一方で、**より多くのセンサーを活用**することで、その情報をもとに自律的に動作するシステムへ発展させる可能性について助言していただきました。

また、企業では、安全性・機能性・費用対効果が重視されることから、「どう実現するか（How）」だけでなく、「**そもそもなぜその機能が必要なのか（Why）**」という視点が重要であるというご意見もいただきました。自動化が必ずしも最適とは限らず、**人とロボットの役割分担**も含めて考える必要があるというリアルな企業の視点を学ぶことができました。

<東京大学 レゴ部 様>

LEGO の構築技術の観点から、東京大学レゴ部様へ評価を依頼しました。まず、各ロボットの製作・制御について**ハイレベル**であるとの評価をいただきました。また、「**私が高校生ならぜひ参加したいところです**」とお言葉もいただき、研究の内容だけでなく、情報処理部の活動そのものについても高い評価をいただきました。特に、ヘルメスについては、安定した稼働が実現できている点に驚いたとの評価をいただき、制御構造について一定の評価を得ることができました。また、作品づくりの視点として、以下の 3 点について助言をいただきました。

- ① **強度**：動く作品では特に強度が重要であり、負荷のかかる部分を中心に設計することが大切である。（おそらく私たちの機体を見て、さらなる補強や耐久性の向上が今後の課題であることを示していただいています。）
- ② **統一感**：作品全体の色や使用するパーツに統一感をもたせることで、見る人に与える印象が大きく変わる。また、使用パーツの種類を減らすことで、費用減にもつながる。
- ③ **メリハリ**：最も見せたい部分を大きく、あるいは細かく作り込み、それ以外の部分を簡素にすることで、作品全体の印象や伝わりやすさが向上する。

さらに、同部制作作品の写真を送っていただき、大規模な作品でありながら細部まで精密に作り込まれていることや、展示会などに持ち運ぶために強度だけでなく**分割できるように考慮された設計**など、多くのことを教えていただきました。なお、私たちの機体は、今のところ運ぶのがとても大変です。



(3) 研究を通して得た経験と学び

今回の研究を通して、自動倉庫はプログラミングだけではなく、物流、機械構造、在庫管理、数値最適化など、多くの分野が関係していることを学ぶことができました。特に印象的だったのは、「**理論通りにはいかない**」という点です。シミュレーションだけでは分からない「**実機ならではの難しさ**」を学ぶことができました。

また、昨年度に先輩方が取り組んだ**ルート最適化の研究**を、自動倉庫の搬送ルートへ応用することで**研究の継続性**をもたせることができました。**単年度で完結する研究ではなく、先行研究を発展**させながら、新たなテーマへつなげることができた点は、大きな成果の一つであると考えています。

(4) 課題

今回の研究で一定の成果を収めることができましたが、今後さらに発展させるための課題も明らかになりました。これらは単なる問題点ではなく、次の研究につながる前向きな課題であり、新たな挑戦のテーマでもあります。

課題①：物流システム全体の拡張

現在は棚入れを中心とした研究であるため、今後はピッキングや搬出まで含めた一連の物流動作についても研究を進める必要があります。

課題②：倉庫の規模拡大

今回は比較的小規模な倉庫を想定しましたが、今後は棚数や荷物数を増やし、より大規模な倉庫環境での検証も行いたいと考えています。

課題③：棚配置アルゴリズムの高度化

現在は「空いている最も近い棚へ入れる」という単純なルールを採用していますが、今後は利用頻度を考慮した、より実際の物流現場に近いアルゴリズムの導入を検討しています。

課題④：自動化の必要性の検討

外部評価の中で、「どのように実現するか（How）」だけでなく、「そもそもなぜ必要なのか（Why）」という視点の重要性について助言をいただきました。今後は、人とロボットの役割分担や費用対効果も含めた視点が必要です。

(5) 今後の展開

展開①：アトラスによる荷物配置の最適化

アトラスのリュックを見ていて情報処理部員だからこそ気付いたことがあります。荷物の置き場があるということは「ソートアルゴリズム」で学んだ「値の入れ替え」が可能です。



リュックで「荷物の入れ替え」ができるので、荷物全体を並べ替えることができます。具体的には、日中の出庫データを記録し、**使用頻度の高い荷物を手前、使用頻度の低い荷物を奥へ配置**するよう、夜間にアトラスが自動で荷物を並べ替える仕組みです。アトラスはリュックを備えており、一時的に複数の荷物を保持できるため、荷物の入れ替えを効率よく行うこ

とが期待できます。現在のソートアルゴリズムは、コンピュータのメモリ上でデータを並べ替えることを前提としており、データの移動にかかる時間や距離はほとんど考慮されていません。一方、自動倉庫では荷物を実際に移動させる必要があるため、移動距離や交換回数、作業時間が効率に大きく影響します。

今後は、バブルソートやインサクションソート、セレクションソートなどのソートアルゴリズムを、自動倉庫に適した形へ応用・改良し、コンピュータ内で行う並べ替えと、実際の荷物の移動を伴う並べ替えでは、最適なアルゴリズムがどのように異なるのかを研究していきたいと考えています。また、移動距離や搬送時間を考慮した新たな並べ替え手法についても検討を進め、より実用的な物流システムの実現を目指します。

展開②：新たな搬送システム「ハコスケ^{かぐら}神蔵」

新型機の開発を同時に進めています。今回使った LEGO BOOST は、モーター数やセンサー数に制約がありました。今後は、より拡張性が高く、多くのモーターやセンサーを活用できる「LEGO SPIKE」や「LEGO MindStorm EV3」を用い、自律性のある機体として、棚そのものを自動で搬送する Shelf-to-Person 方式を参考にした自律移動型棚搬送システム「ハコスケ神蔵（かぐら）」を開発中です。



最終的には、今回の研究活動を通して得られた知識や経験を活かし、物流業界における効率化やDX化について、さらに研究を深めていきたいと考えています。

7 おわりに

私たちの研究は、商業高校の研究としては異質に見える部分もあるかもしれません。物流や情報処理だけでなく、機械構造や制御など、工業的な内容も含まれているため、そのように感じる方もいらっしゃると思います。

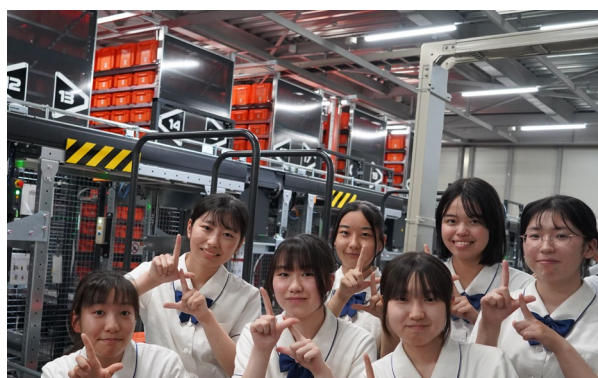
しかし、多くの方から、「これは『教科横断的』な研究であり、むしろ現在の探究活動の流れに合っている」という言葉をいただきました。

研究の軸となっているのは、あくまで商業科目で学んできた「物流」と「情報処理」です。しかし、その分野だけにとらわれていては、新しい発想や改善案は生まれにくいと考えています。

そこで私たちは、プログラミング、機械構造、数理最適化など、さまざまな分野の知識を組み合わせながら研究を進めてきました。研究を進める中では、英語や数学、物理的な考え方も必要となりました。例えば、インターネットで購入した RFID リーダーの説明書はほぼ英語で書かれており、翻訳を行いながら設定や動作確認を進めました。また、ギア比やシミュレーションでは、力の伝達、座標計算など、物理や数学の考え方も必要となりました。このように、**教科ごとの学びが実社会ではつながっている**ことを実感しました。

とは言え、研究の目的は「ロボットを製作すること」ではなく「**物流を効率化すること**」にあります。物流が効率化されれば、商品をより早くお客様へ届けことができ、**サービスの向上や、市場の拡大**にもつながります。商業科で学んだ物流や在庫管理、業務改善の考え方を基盤とし、搬送方式の比較や最適化、費用対効果の検証を行いました。**商業科で学び、ビジネスの視点をもつ私たちだからこそ、取り組む意義のある研究**であると考えています。

今後も、鳥栖という物流拠点で学ぶ商業高校の生徒として、物流や情報処理の分野で、地域や社会に貢献できる人材を目指していきます。



参考資料

■参考書籍等

- ▶令和7年度全国高等学校生徒商業研究発表大会 佐賀県立鳥栖商業高等学校報告書「鳥栖商数理最適化プロジェクト」
- ▶商業科教科書「ソフトウェア活用」(東法出版)
- ▶商業科教科書「プログラミング」(東法出版)
- ▶商業科教科書「最新情報処理 新訂版 Advanced Computing」(実教出版)
- ▶NETUM 1D&2D Scanner & UHF RFID Reader マニュアル

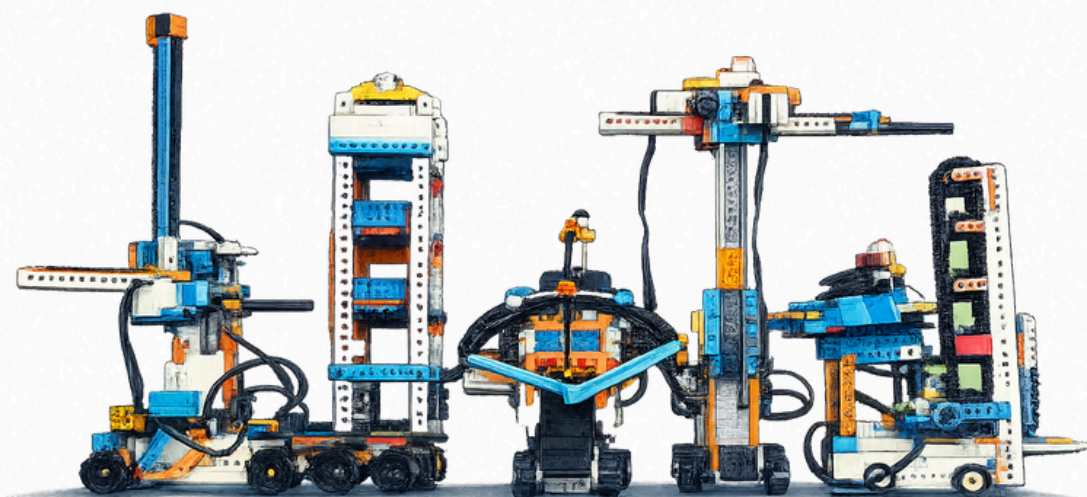
■参考 Web サイト・技術資料

- ▶株式会社ダイフク「F-LINE 株式会社 福岡第一物流センター 導入事例」
<https://www.daifuku.com/jp/solution/casestudy/case007/>
- ▶デジタル書籍「The LEGO BOOST 17101 Building instructions, Vol.3: Forklift」
- ▶LEGO BOOST アプリ内：バーニー・M.T.R.4・オートビルダー各設計図
- ▶LEGO Education SPIKE 公式サイト
<https://education.lego.com/ja-jp/products/lego-education-spike-prime-set/45678/>
- ▶YouTube：「Automated LEGO warehouse, AS-RS system, Mindstorms EV3」
<https://www.youtube.com/watch?v=GT0A2tOVyHg>
「How to Build a Scissor Lift Using LEGO Spike Prime」
<https://www.youtube.com/watch?v=quch8CF4oig>
- ▶LEGO Studio 2.0 関連サイト <https://www.bricklink.com/v3/studio/download.page>
- ▶Pybricks 公式ドキュメント <https://pybricks.com/>
- ▶東京大学レゴ部 X (旧 Twitter) https://x.com/t_u_lego
- ▶CHARAT <https://charat.me/>
- ▶フキダシデザイン <https://fukidesign.com/>
- ▶矢印デザイン <https://yajidesign.com/>

■効果音

- ▶発表内で使用する効果音は、身近な道具を用いて自分たちで収録したものです♪





最後までお読みいただきありがとうございました

㊦ Tosu Commercial High School ICT Club

本報告書に記載されている企業・団体および商品・サービスの名称は、それぞれの権利者に帰属します。
また、商品名、サービス名等は、各社・各団体の商標または登録商標である場合があります。