

博士學位論文

題 目

高等学校教育課程における物理学習に関する
RT教材の開発

担当指導教員名 田中 宏明 印

申請年月日 2018年 1月 30日

申請者専攻名 制御機械工学専攻

学 生 番 号 DM13A001

氏 名 小川 勝史 印

大阪電気通信大学大学院

平成 29 年度 博士論文

高等学校教育課程における物理学習に関する
RT 教材の開発

Development of RT Educational Tool to Support
Learning Physics in High School Curriculum

工学研究科 制御機械工学専攻

DM13A001 小川 勝史

2018 年 1 月 30 日

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	これまでの物理教育とその課題	6
1.2.1	授業の現状と物理概念の理解について	6
1.2.2	実験・実習授業の現状と課題	8
1.2.3	従来の実験・実習授業の実践から	9
1.3	物理教育に関する先行研究の動向と課題	13
1.3.1	ロボット教材の現状と課題	17
1.4	課題を解決するための提案	18
1.4.1	提案内容	18
1.4.2	物理教育の各手法の問題点	20
1.5	論文の構成	23
第 2 章	高校物理学習における物理量の分類と体系化の有効性検証	24
2.1	物理量・公式の学習と体系化の要請	25
2.2	高校教育課程における物理量の分類	25
2.2.1	センサの分類	26
2.2.2	物理量の分類	27
2.3	物理量分類の学習効果についての評価	30
2.3.1	物理量分類についての評価授業概要	30
2.3.2	確認テストとアンケート内容	33
2.3.3	仮説検定によるデータ分析 [68]	34
2.3.4	実験結果	35
2.4	物理量の相関関係の体系化	38
2.4.1	物理量の体系化簡易学習ソフトウェア	39
2.4.2	物理量体系化と簡易学習ソフトウェアの活用	41
2.5	物理量体系化と簡易学習ソフトウェアの学習効果の評価	42

2.5.1	評価授業概要	42
2.5.2	実験結果	43
2.6	まとめ	47
第 3 章	摩擦現象学習支援用 RT 教材による物理量可触化の有効性の検証	48
3.1	RT 教材による物理現象の可視・可触化	49
3.2	摩擦現象学習支援用 RT 教材	49
3.2.1	摩擦現象の学習における物理量と計測センサ	49
3.2.2	摩擦現象学習支援用 RT 教材とそのシステム構成	50
3.3	摩擦現象学習支援用 RT 教材の評価	53
3.3.1	評価授業概要	53
3.3.2	確認テストとアンケート内容	55
3.3.3	実験結果	56
3.4	まとめ	60
第 4 章	高校物理学習支援用 RT 教材の設計と開発	61
4.1	教材ロボットの仕様と設計	62
4.1.1	RT 教材のコンセプト	62
4.1.2	計測センサ群の選定について	63
4.1.3	計測センサと学習する物理現象，物理量の関係	64
4.1.4	計測センサ群の決定	65
4.1.5	教材ロボットの仕様構成	67
4.2	教材ロボットの設計検証	71
4.2.1	検証実験方法	71
4.2.2	直線運動	72
4.2.3	投げ上げ運動	76
4.3	まとめ	82
第 5 章	開発した高校物理学習支援用 RT 教材の評価	83
5.1	RT 教材検証テーマについて	84
5.2	物理学習支援用 RT 教材の評価	85
5.2.1	評価実験概要	85
5.2.2	円運動の学習内容における物理量と計測センサ	85
5.2.3	円運動の授業内容	87
5.2.4	評価方法	89

5.2.5	確認テストに関する分析結果	91
5.2.6	RT 教材のディスプレイ表示に関する学習効果の検証	95
5.2.7	アンケートに関する分析結果	97
5.3	まとめ	101
第 6 章 結論		102
付 録 A		111
A.1	Chapter 2 の詳細データ	112
A.2	Chapter 3 の詳細データ	116
A.3	Chapter 5 の詳細データ	120
A.4	RT 教材 Arduino シールド回路図	128

目 次

1.1	Average scores and rankings up to PISA 2015	3
1.2	The change in index value of science literacy in Japan (PISA 2015) .	3
1.3	Changes in the proportion of students who like science (Benesse 2015)	4
1.4	Percentage of students who like each subject in 2015(Benesse 2015) .	5
1.5	Reasons for making it difficult to carry out experiments answered by science teachers	9
1.6	A traditional experiment of frictional phenomenon	10
1.7	A traditional experiment of Newton's second law of motion	11
1.8	A traditional experiment of circular motion	12
1.9	An experiment of frictional phenomenon using sensor technology . . .	14
1.10	An experiment of Newton's second law of motion using sensor tech- nology	15
1.11	An experiment of circular motion using sensor technology	16
1.12	LEGO MINDSTORMS EV3	17
1.13	TJ3B	18
1.14	BEAUTO ROVER	18
1.15	A radar chart on evaluation of educational methods of high school physics	22
2.1	Image diagram of systematization of physical quantities	26
2.2	Classification diagram of physical quantities	28
2.3	Confirmation test	31
2.4	Teaching material of explanation about suggest classification	32
2.5	Average of confirmation test results conducted before and after class about Group A and B(Average \pm S.D.)	36
2.6	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group A and B(Average \pm S.D.)	38

2.7	Correlation diagram of physical quantities	39
2.8	Screen capture of the learning software for correlation of physical quantities	40
2.9	Snap shot of the learning software for correlation of physical quantities	40
2.10	Screen capture of control panel of the learning software	41
2.11	Snap shot of the class using software to support learning physical quantities	42
2.12	Average of confirmation test results conducted before and after class from Group A to D(Average \pm S.D.)	44
2.13	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group C and D(Average \pm S.D.)	46
3.1	Correlation diagram of physical quantity in frictional phenomenon . .	50
3.2	Appearance of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon	51
3.3	System Configuration of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon	52
3.4	Display example of an RT educational tool	53
3.5	Snap shot of the class of frictional phenomenon using RT educational tool	54
3.6	Confirmation test results conducted before and after class about frictional phenomenon(Average \pm S.D.)	58
3.7	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about frictional phenomenon(Average \pm S.D.)	60
4.1	The concept of an RT educational tool to support learning physics in high school curriculum	63
4.2	The appearance of an RT educational tool for physics in high school curriculum	67
4.3	The sensor system of an RT educational tool for physics in high school curriculum	68
4.4	A touch panel menu screen of RT educational tool for physics	69
4.5	The system Configuration of RT educational tool for physics	70
4.6	A screen that can monitor the values of all sensors	71
4.7	The measurement system for linear motion of uniform acceleration . .	73

4.8	An experiment for linear motion of uniform acceleration	73
4.9	$v-t$ graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration .	75
4.10	$a-t$ graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration .	75
4.11	$l-t$ graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration .	76
4.12	The measurement system for the motion of throwing upward	77
4.13	An experiment for the motion of throwing upward	78
4.14	$l-t$ graph of an experiment for the motion of throwing upward	80
4.15	$a-t$ graph of an experiment for the motion of throwing upward	80
5.1	Correlation diagram of physical quantities for circular motion	86
5.2	Snap shots of experiment	87
5.3	Snap shots of an RT educational tool, and physical formula shown on the display	88
5.4	Snap shots of the acceleration gauge shown on the display	88
5.5	A figure about circular motion in this examination	90
5.6	A result of an examination about circular motion(Average \pm S.D.) . .	94
5.7	A result of an examination about circular motion from Group A to Group D(Average \pm S.D.)	96
5.8	Information of the questionnaire respondent(Average \pm S.D.)	99
5.9	Information of the questionnaire respondent(Average \pm S.D.)	100
A.1	The electric circuit of RT educational tool	128

表 目 次

1.1	Percentage of students who like each subject in 2015(Benesse 2015)	5
1.2	Percentage of students who can get correct physical concept about movement of weight	8
1.3	Comparison of educational methods of high school physics	22
2.1	List of sensors used to measure each physical quantities in high school curriculum	27
2.2	List of physical quantities in high school curriculum	29
2.3	Average of confirmation test results conducted before and after class about Group A and B	36
2.4	Hypothesis test result of confirmation test for Group A and B	36
2.5	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group A and B ($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.753$)	37
2.6	Average of confirmation test results conducted before and after class about Group C and D	44
2.7	Hypothesis test result of confirmation test for each group	45
2.8	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group C and D ($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.753$)	46
3.1	Specification table of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon	51
3.2	Confirmation test results conducted before and after class about frictional phenomenon	57
3.3	Hypothesis test result of confirmation test about frictional phenomenon	58
3.4	Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about frictional phenomenon ($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.740$)	59

4.1	Number of sensors for measuring physical quantities in high school curriculum	66
4.2	The specification of RT educational tool for physics in high school curriculum	68
4.3	Data of time and length at start and top	81
5.1	A result of an examination about circular motion	94
5.2	A significant test about a result of the examination	95
5.3	A result of an examination about circular motion without display . .	96
5.4	A significant test about a result of the examination without display .	97
5.5	Information of the questionnaire respondent	98
5.6	Information of the questionnaire respondent	99
A.1	Confirmation test results details conducted before and after class about Group A and B in Chapter 2	112
A.2	Questionnaire results details conducted after class about Group A and B in Chapter 2	113
A.3	Confirmation test results details conducted before and after class about Group C and D in Chapter 2	114
A.4	Questionnaire results details conducted after class about Group C and D in Chapter 2	115
A.5	Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group A in Chapter 3	116
A.6	Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group B in Chapter 3	117
A.7	Questionnaire of friction phenomena results details conducted after class about Group A in Chapter 3	118
A.8	Questionnaire of friction phenomena results details conducted after class about Group B in Chapter 3	119
A.9	Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group A in Chapter 5	120
A.10	Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group B in Chapter 5	121
A.11	Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group C in Chapter 5	122

A.12 Confirmation test of friction phenomena results details conducted be- fore and after class about Group D in Chapter 5	123
A.13 the questionnaire results about Group A in Chapter 5	124
A.14 the questionnaire results about Group B in Chapter 5	125
A.15 the questionnaire results about Group C in Chapter 5	126
A.16 the questionnaire results about Group D in Chapter 5	127

第1章 序論

1.1 研究背景

「理科嫌い」や「理工系離れ」が叫ばれて久しい[1][2]。その中でも現在、高校生の理科に対する意欲・関心が低くなっていることが問題であるとして多方面で大きく取り上げられている[3][4]。この問題は、学力問題とともにわが国の科学技術政策を進めていく重要な柱の一つとなっている。

2003年度から高等学校において完全実施された「ゆとり」の中で「特色ある教育」を展開することを基本とした学習指導要領においては、授業時間数の縮減がなされ、高度になりがちな内容などを上級学校に移行統合して教育内容の厳選、削減がなされた[5]。そのなかで、算数・数学、理科などは、授業時数のおおむね8割程度の時数で標準的に指導しうる内容に削減という内容が示された。全国の高校一年生を対象に行われた国立教育政策研究所による経済協力開発機構(OECD)の国際的な調査「生徒の学習到達度調査(Programme for International Student Assessment)」(以下、PISA調査と記す)の2003年[6]、2006年[7]の結果では、日本の平均得点や順位が大きく下がり、我が国の教育のあり方が議論されるきっかけとなった。

これを受けて2013年度から完全実施されている現行の高等学校学習指導要領理科編[8]によると、21世紀は、新しい知識、情報、技術が、社会のあらゆる領域で活動の基盤となる「知識基盤社会」の時代であると言われている。確かな学力、豊かな心、健やかな体の調和を重視する「生きる力」をはぐくむことがますます重要になり、他方、OECDのPISA調査など各種の調査からは、以下のような課題を示している。

1. 思考力、判断力、表現力等を問う読解力や記述式問題、知識、技能を活用する問題に課題
2. 読解力で成績分布の分散が拡大しており、その背景には家庭での学習時間などの学習意欲、学習習慣、生活習慣に課題
3. 自分への自信の欠如や自らの将来への不安、体力の低下といった課題

この課題を踏まえて、「生きる力」という理念を共有し、「基礎的，基本的な知識，技能の習得」と「思考力，判断力，表現力等の育成」を実現するために理数系の授業時間数を増やし，学習内容が拡充された．教育現場では，「学習意欲の向上や学習習慣の確立」を目標としての指導の充実が実施されている．

次に理科教科の目標を示す．

理科教科目標

自然の事物，現象に対する関心や探究心を高め，目的意識をもって観察，実験などを行い，科学的に探究する能力と態度を育てるとともに自然の事物，現象についての理解を深め，科学的な自然観を育成する．

また，本研究では物理についての学習支援用 RT 教材の開発を目指すので，ここで物理科目の目標について示す．

物理科目目標

物理的な事物・現象に対する探究心を高め，目的意識をもって観察，実験などを行い，物理学的に探究する能力と態度を育てるとともに，物理学の基本的な概念や原理・法則の理解を深め，科学的な自然観を育成する．

この目標を達成するためには，主体的に解決しようとする意欲を高め観察・実験などに取り組むことが重要である．このことにより物理学の基本的な概念や原理・法則の理解を深めることができ，より一層物理に対する興味や関心を高めることができる．そして，物理学の基本となる概念や原理・法則は抽象化された形で与えられているが，重要なことは，それらを単に記憶することではなく，それらを活用する能力を身に付けることであると考ええる．

OECD の PISA 調査の 2015 年の結果 [9] を Fig. 1.1 に示す．科学リテラシー，数学的リテラシー，読解力の各分野の結果で高い上位グループに属していた．しかし，科学に対する態度についての調査では，肯定的な回答をした割合が OECD 平均と比較して大きく下回っているというものであった (Fig. 1.2)．意欲・関心を育む活動は，カリキュラムや授業時間数を変更し目標を掲げるだけでなく，学生を刺激するような効果的な教育手法が必要だと考える．

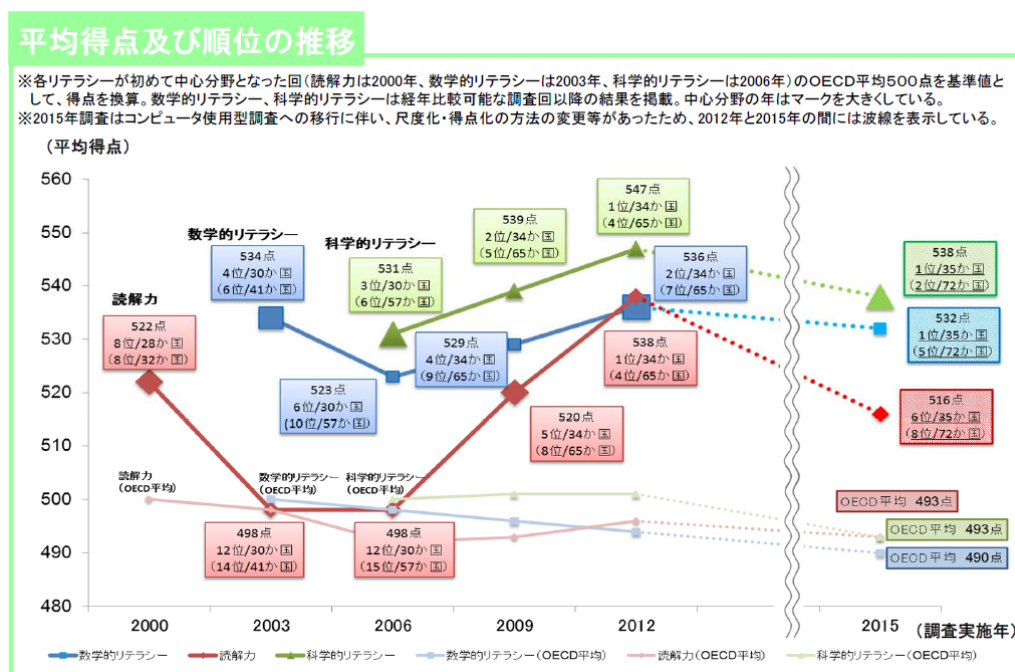


Fig. 1.1 Average scores and rankings up to PISA 2015

● 我が国における指標値の変化



Fig. 1.2 The change in index value of science literacy in Japan (PISA 2015)

ベネッセ教育総合研究所が行っている学習基本調査 [3] の理科に関する結果から、高校生の理科学習への意識を分析してそこにある課題を考察する。この調査概要は、子どもの学習に関して、意識・意欲、進路意識など、広くその実態をとらえ、経年での変化をみることを目的としたものである。1990年に第1回調査をスタートし、2015年に第5回の調査を実施、25年の変化をみることができる。調査方法は、学校通しによる自記式質問紙調査で、対象は、全国の小学5年生・中学2年生と高校2年生で行われたものである。

「あなたは、次の教科や学習（理科）の時間の勉強がどのくらい好きですか.」という問いに対する回答で、「好き」（「とても好き」・「まあ好き」）の全体に対する割合の推移を Fig. 1.3 に示す。高校生では1990年の34.7%から毎回微増し続けて、2015年には45.1%という結果であり、25年間でおよそ10%増加という結果であった。

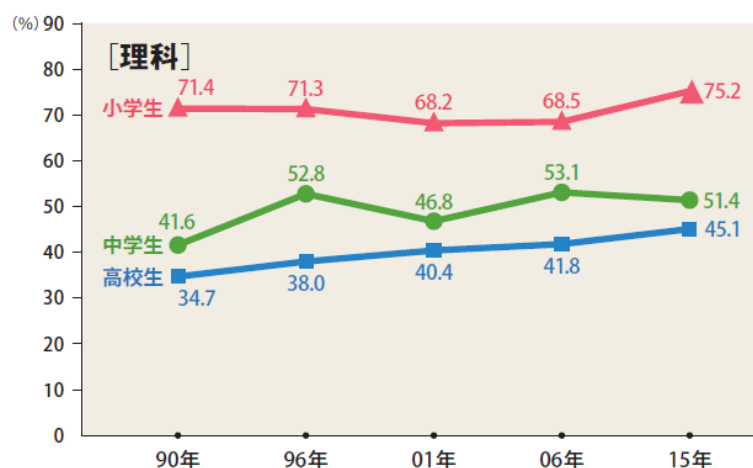


Fig. 1.3 Changes in the proportion of students who like science (Benesse 2015)

また、この結果から小学生のデータと高校生のデータを比較すると、「好きだ」と回答した生徒は、小学生では約70%いるのに対して高校生では約40%であり、30%程度減少していることがわかる。このことから小学生では概ね理科は「好きな教科」であるものが、高校生になるころには「好きではない」と感じる生徒が高い割合でいて、同様の報告もされている [10]。

他教科と比較した結果を Table 1.1 と Fig. 1.4 に示す。国語では小学生と高校生で差は無く、社会では3.5%の減少であり、算数・数学でも14%の減少であるが、理科は30.1%の減少である。また、小学生の各教科の値で見た場合には、理科が好きな割合がどの教科よりも高い。日本の子供は理科が嫌いなのではなく、中学・高校で理

科嫌いに陥ってしまっている．同様の研究結果が報告があり [11][12][13][14][15]，ここに問題解消の糸口があると考ええる．

Table. 1.1 Percentage of students who like each subject in 2015(Benesse 2015)

	[%]			
	国語	算数・数学	社会	理科
小学生	58.5	68.4	55.6	75.2
中学生	50.8	54.5	57.8	51.4
高校生	58.5	54.4	52.1	45.1

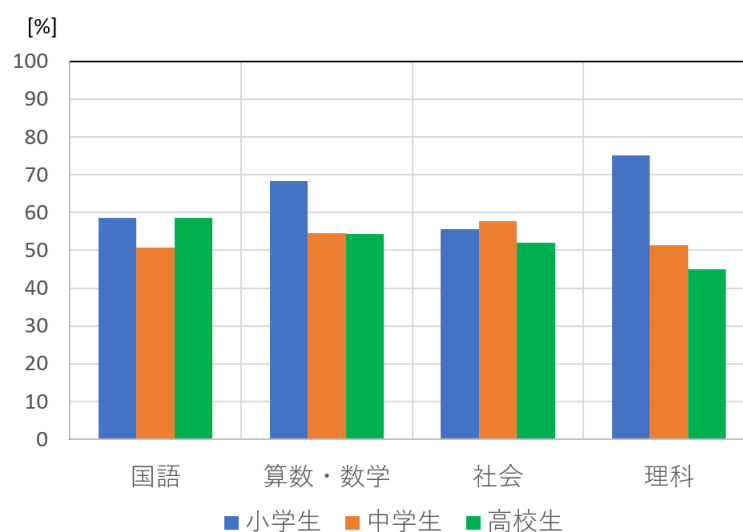


Fig. 1.4 Percentage of students who like each subject in 2015(Benesse 2015)

栗山，平山 [16] は，理科に対する意識調査を科目別にその要因について実施した．物理について注目すると，好きな理由として「思考活動，考察や新たな発見」，「評価の満足，テストの結果」が示され，嫌いな理由として，「非有用性，役に立たない」，「実験の困難性，準備が面倒」，「けっきょく教科書の暗記」が示された．Rennie, Fecher, Dierking, & Falk[17] は，活動そのものへの興味・関心の高い状況の中で，科学的学習が深まると述べている．また，当然のようであるが学力テストでの高得

点が物理を好きになる理由である。また、物理実験が学生にとって身近ではなく難しく感じて、なおかつ準備や実験自体が煩雑になると、その目的とは反対に、物理嫌いになる要因となる。物理が将来においてどのように役に立つのか実感できないことも嫌いになる重要な要因である。

大宮、奥村 [18] は、高等学校現場での物理離れ・物理嫌いの原因を物理履修者にアンケートを実施することによって調査し、その理由には「計算」、「公式」、「記号」などに対する理解が大きく関係しているという結果を示した。つまり、概念の一般化の際に現れる「公式」や「記号」を「暗記するだけ」では物理を嫌いになるのである。

物理学学習に対する意欲・関心を高め学力向上を図るために、目標を掲げるだけでなく実現可能な教育手法の提案が必要であると思われる。しかし、それを十分満たすほどの具体的な提案はなされておらず、教員各個人の創意工夫に委ねられている。このような物理教材や教育手法を開発・提案するために、これまでに行われてきた物理教育の現状を分析することにより、その課題を明らかにする。

1.2 これまでの物理教育とその課題

1.2.1 授業の現状と物理概念の理解について

物理教育では、科学知識を伝えるタイプの教育が主流をしめ、生徒自らが考え学ぶというような授業はあまり行われない傾向がある [19]。講義形式の授業がほとんどであり、概念理解中心である [20][21]。この概念理解中心の授業と物理嫌い・物理離れがどのように関係するのかを考えるため、まず学生の持つ物理概念について述べる。

村山 [22] は認知心理学の研究より、学習者は理科授業を学ぶ以前に、身近な事物や現象についての日常的な観察や思考、課題解決において、われわれが使用している常識的な心的モデルと定義された素朴概念を自分なりに構成していると指摘している。中村・荒木 [23] は、素朴概念とは、科学的概念を系統的に学習する理科の授業以前に獲得された非科学的な概念、さらに授業において誤って学習が行われた結果として獲得される非科学的な概念であり、各個人なりの一貫性を持っているものとしている。Clement[24] は「運動は力を含意する」(Motion Implies a Force ; 以下 MIF と略す) という素朴概念が存在することを明らかにした。高校物理の学習内容である「物体の投げ上げ問題」にみられた素朴概念が、講義の前後でどの程度改善されるかについて調べたが、受講後の正答率は受講前の正答率 12 % よりは高

いものの 28 % にすぎず, MIF のような素朴概念は従来の理科教育では変えがたいことを示した. 素朴概念は学習者が理科授業を受ける以前から存在し, 学習阻害の原因になっていると考えられる.

鈴木は学習後も残る非常に強固な誤った概念は, 原因と結果を結びつける思考の枠組みに過度に縛られるために起こるとしている [25]. 例えば, 「歩きながら片手に持ったボール, コンベアで運ばれた金属球が落ちるとき, どのように落ちるか」という問いで, 「鉛直に落ちる」という誤概念による回答がある. これは「重力」という原因が鉛直方向の運動をもたらすが, 水平方向の運動の「原因」と思いこまれている「歩く人の手」や「コンベア」から断ち切れた瞬間, 鉛直方向の運動しか持ち得ないと判断してしまう, というものである. このように素朴概念が学習する物理法則と食い違う, 誤概念を持っている学生は, 理論についての解説が中心である座学のための物理の授業を通して, それを覆すことは難しいものである. これは川村が大学生を対象に行った研究でも確認されている [26].

中村・荒木 [23] は, 「ものの動きとはたらき・おもりの運動」に関して, 素朴概念の特徴をそれらの学習をする前の小学 2 年生と小学 5 年生について明らかにし, 学習した後どのような知識となって定着しているかを中学 3 年生, 高校 3 年生, 大学生について検討し, その関係を明らかにしている. その結果を Table 1.2 に示す. 小学生と中学生は「おもりの運動」を学習していようといまいと, 科学的概念獲得者は極めて少ない. 高校生以上で約半数であったとしている. この調査によると, 素朴概念は非常に強固であり, 科学的概念獲得を阻んでいる要因となっている. よって学生に正しい物理概念を理解させるためには, 彼らが持っている素朴概念に注目し, 学生自身の持っている素朴概念では説明ができなく, それに代わる理論を考えだす必要性を実験・実習授業を通して訴えることがその方法であるとしている. また, この研究結果は中学生で素朴概念を修正できなかった場合でも, 高校生で十分取り戻せることを示している.

学生が物理学習で物理現象に則した正しい概念を持つことが出来るようになるためには体験, 実感が重要である [27][28]. 高校物理学習において, 田中は円運動における MIF 素朴概念に関する調査 [29] を実施し, それを解消するための円運動教材の開発を行い [30], それを使った授業を実践し [31], その学習効果を報告している. 加藤は力の誤概念の解消を促す教材として加速度センサと発電機を併用した実験機材を作製し, 高い学習効果を報告している [32]. また, 山崎は振り子つき運動教材の開発を行い, 中学校での MIF 素朴概念をなくす教材の開発でその学習効果を報告している [33]. このように実験教材を用いた授業実践により物理の正しい概念を学生が得ることは, 広い年代でその効果が報告されており, 体験, 実感の重要性がわか

Table. 1.2 Percentage of students who can get correct physical concept about movement of weight

	小学2年生	小学5年生	中学3年生	高校3年生	大学生
調査対象 [人]	38	70	59	38	45
人数 [人]	2	7	9	20	19
正答率 [%]	5.3	10	15.3	52.6	42.2

る [34]. では, 高校教育現場における物理実験の現状はどのようなになっているのか. 次項では, 高校物理における実験の現状を分析してその課題を明らかにする.

1.2.2 実験・実習授業の現状と課題

上述の高等学校学習指導要領理科編 [8] の物理科目の目標として「目的意識をもって観察, 実験などを行い」とある. 山崎が大学新入生を対象に行った調査 [35][36] では, 高等学校在学時の物理の授業において学生実験を行った平均回数は, 全体で 6.08 回であったとしている. 特に力学分野では, 平均 2.38 回であった. また, 2 割の学生は高校在学時に学生実験を 1 回も経験しなかったことを明らかにした.

物理における実験・実習授業の必要性・有用性に関する研究結果は多数報告されている [37][38][39]. 学習指導要領にも観察, 実験の実施について明記されているが, なぜ実験が行われないのであろうか. 国立教育政策研究所教育課程研究センターと (独) 科学技術振興機構理科教育支援センターが実施した, 現場の理科教員の実態, 現状をつかむための調査である「平成 20 年度高等学校理科教員実態調査」[40] によると, 主に 4 つの実験を実施しない理由があり, 結果を Fig. 1.5 に示す. 要因は「時間」と「設備・予算」が不足していることである. また, 時間がないのは「実務的な忙しさ」と「大学入試対応」ということが重要な要因である. 発想は, 「物理実験 ≠ 試験対策」であり, 「大学入試と直接関係しない」というものである.

高額な費用・過度な労力を必要とせず, 時間をかけずに手軽に実験・実習が可能で, 実験を実施することにより学力向上が見込めるような学習教材・教育手法があれば, 多くの問題を解消するための方向性が示せるのではないか. 次項では従来の授業で行われてきた, 教科書に記載されているいくつかの観察・探究の実験・実習事例とその内容を示す.

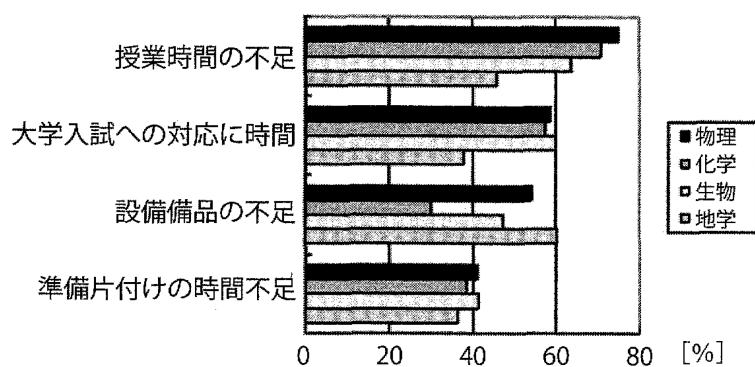


Fig. 1.5 Reasons for making it difficult to carry out experiments answered by science teachers

1.2.3 従来の実験・実習授業の実践から

これまで実践されてきた物理の実験・実習授業について具体例をいくつか示し、それらの内容を分析してその学習効果と課題について明らかにするとともに、実験が高校教育の現場で積極的に実施されていない要因を考える。以下に教科書 [41][42] に掲載されている物理実験の内容について示す。

【例 1. 摩擦現象】

[目的] : おもりの質量 m を変え、最大摩擦力 F が垂直抗力 N に比例しているか確認する。

[実験手順]

1. Fig. 1.6 のように、木片に糸をつけ、ばねはかりに糸を結ぶ。
2. ばねはかりを水平に引いていき、木片が動きだすときの力 F を測る。
3. 木片に面から加わる垂直抗力 N (おもりの重さ) と最大摩擦力 F との関係をグラフにする。

[現状と課題]

- 手でひもを引く力 F を計測しながら，運動の様子を観察できるので，実感を伴った考察が可能であるが，ばねはかりによる力 F の計測が目視で行うため，運動が安定しないと正しい計測が困難である．

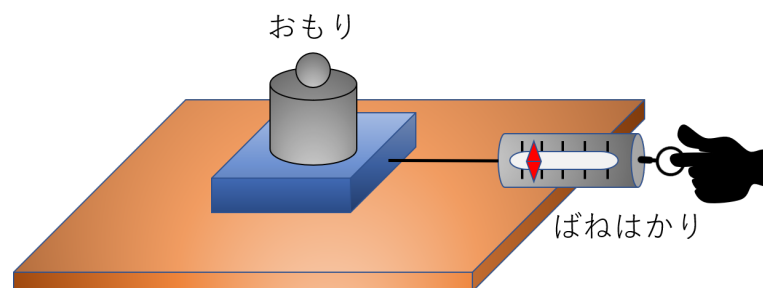


Fig. 1.6 A traditional experiment of frictional phenomenon

【例 2. 運動の第 2 法則】

[目的] : 物体に生じる加速度 a と加えた力 F , 物体の質量 m との関係を探る.

[実験手順]

1. Fig. 1.7 のように, 台車にもものさしを取り付け, その上にばねはかりを固定し, ゴムひもを引く.
2. 記録テープをタイマに通し, その先端を台車の後ろにセロハンテープで付け, タイマのスイッチを入れてから, はかりの針が一定の値 F を指したままとなるように台車を引き運動を記録する.
3. ばねはかりの値 F , 質量 m を変えて, それぞれ運動の記録をとる.
4. 速度 v - 時間 t , 加速度 a - 力 F , 加速度 a - 質量の逆数 $\frac{1}{m}$ の関係をグラフにまとめる.

[現状と課題]

- 手でひもを引く力 F を計測しながら, 運動の様子を観察できるので, 実感を伴った考察が可能であるが, 台車を引く力が安定せず, 運動の様子を正しく記録・観察するのが困難である.
- 準備・片付けが煩雑であったり, 再現性を高めるために練習が必要など, 実験実施に時間を要する.

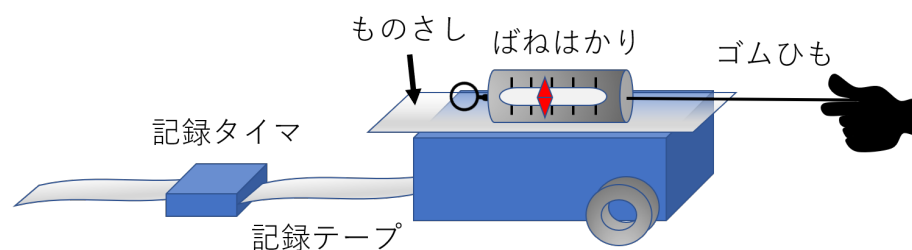


Fig. 1.7 A traditional experiment of Newton's second law of motion

【例 3. 等速円運動の向心力】

[目的] : 等速円運動をしている物体にはたらく向心力 F が, 物体の質量 m , 回転の半径 r , 周期 T とどのような関係になっているか調べる.

[実験手順]

1. Fig. 1.8 のように, ゴム栓を付けた糸を中空円筒に通して, 他方におもりをつるし, ゴム栓を水平面内で等速円運動させる. 半径 r が一定となるように糸の目印に注意する.
2. ゴム栓を回転させてその時間 t を計り, 周期 T を求める.
3. 回転半径 r , おもりの質量 m を変えて実験を行う.
4. 向心力 F の大きさが半径 r に比例し. 周期 T の 2 乗に反比例することを確認する.

[現状と課題]

- 手でひもを引く向心力 F を感じながら運動の様子を観察でき, 実感を伴った考察が可能だが, 半径 r を一定にするのが困難で運動の様子が安定しない.
- 多数のパラメータを扱う実験だが, 実測できるのが周期 T のみで, 他の値は実験者が感覚で調整し, 不安定な要素が多い.

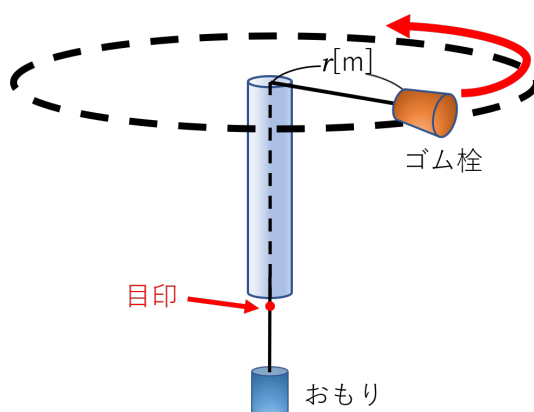


Fig. 1.8 A traditional experiment of circular motion

摩擦現象、運動の第2法則、円運動の教科書記載の実験の一部を示したが、スマートフォンやコンピュータなどの現代の技術に慣れ親しんだ学生にとって、興味・関心を刺激する内容とはいい難く、また、物理量の計測で動的な実験を行っているにもかかわらず目視による目盛り計測などがあり、計測値が不安定であること、他のパラメータの調整でも実験者の感覚にゆだねる部分が多く、安定的な実験結果が得ることが困難な場合がある。これは、物理嫌いの理由としてあがっていた「実験の困難性」とも一致する。また、類似する実験でも計測環境を整えるため、テーマに適した実験器具を条件に合わせて準備する必要があり、準備や片付けに要する時間と負担は大きい。実験助手の人員は不十分で、授業時間数と大学入試対策の兼ね合いで、学生への十分な回数の実験が困難なのは教育現場としてはやむを得ない現状がある。

1.3 物理教育に関する先行研究の動向と課題

現行の学習指導要領 [8] ではコンピュータ等の IT 機器を探究活動等で用いることが推奨されている。また、センサやコンピュータのような IT 機器が身近な存在となり、それらを用いた実験・実習授業に関する研究報告も多数存在する [44]。筒井は、PC 計測システムを活用することを試みて演示実験と探究型の学生実験で適していることを明らかにした [45]。また、竹中・山口・稲垣の理科実験でのコンピュータ利用に関する報告 [46] や山崎のセンサを用いたアクティブラーニングに関する報告 [47]、沖野・山岡・松本は力センサを搭載した力学台車の衝突運動の計測結果をデジタルデータロガーを用いて即時グラフ化表示した実験 [48] のように、いずれも高い学習効果が報告されている。海外では科学教育として注目されているものに STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) 教育があり、教育技術や教材開発で多くの報告がある [49][50][51][52][53][54]。

これらの特長は、センサ機器等を用いた測定結果の即時表示機能、従来の授業では実現できない動力学での衝突などでリアルタイムな実験ができることなどがある。速度 v 、加速度 a 、力 F などの物理量を相互に関連付けながら概念をとらえることができ、学生が短時間で何度もやり直して、グラフの意味を議論ができる。

前項で示した実践されてきた物理の実験・実習授業についての具体例に対して、それらの内容をセンサなどの技術を用いた先進的な教材・指導法の報告・紹介事例を示す。それらの内容について、実験・実習授業の改善点について分析して、先進技術の理科教育への応用に関する可能性について考える。

【例 4. センサ技術を用いた摩擦現象の実験】 [55]

[目的] : 滑走体の質量 m と摩擦係数 μ を変え（滑走面の加工状態を変更），最大摩擦力 F が垂直抗力 N に比例しているか確認する．

[実験手順]

1. Fig. 1.9 のように，滑走体に取り付けた歪ゲージをホイートストン・ブリッジの一部とした回路で力 F の検出計測をする．滑走体に加える力 F や速度 v を一定とするため，プーリで糸を巻き取る駆動部と電気制御部を構成している．
2. 質量 m ，摩擦係数 μ を変え，それぞれの摩擦力 F を計測する．
3. 滑走体に面から加わる垂直抗力 N と最大摩擦力 F との関係をグラフにする．

[現状と課題]

- ひもを引く力 F を一定として運動の様子を観察できるので，安定的な計測が可能である．しかし，手で力 F を加えないので実感を伴わないことが考えられ，その学習効果は視覚的な部分となる．
- 実験機材の準備や環境の構築に技術力と時間を要するため一般的に普及するのは困難だと感じる．

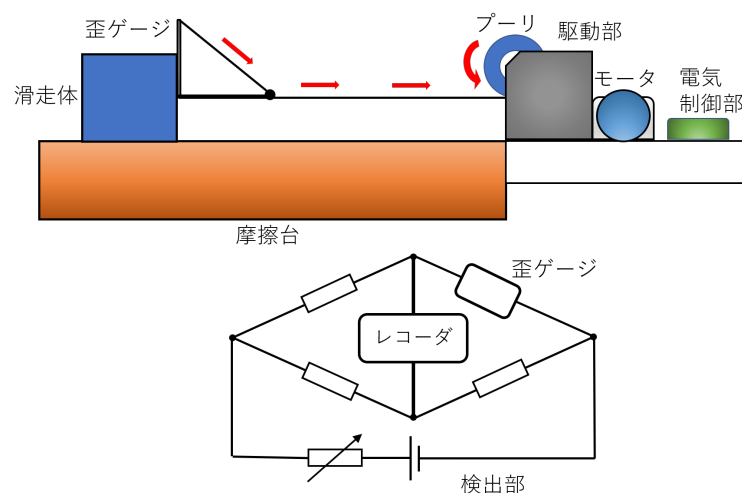


Fig. 1.9 An experiment of frictional phenomenon using sensor technology

【例 5. センサ技術を用いた運動の第 2 法則の実験】 [56]

[目的] : 物体に生じる加速度 v と加えた力 F , 物体の質量 m との関係を探る.

[実験手順]

1. Fig. 1.10 のように, 定力装置を使って力学台車を一定の力 F で引く.
2. 台車の位置の時間変化を距離センサで距離 l を計測し P C で記録する.
3. 台車を引く力 F , 台車の質量 m を変えて, それぞれ運動の記録をとる.
4. データを表計算ソフトで解析する.

[現状と課題]

- ひもを引く力 F を一定として運動の様子を観察できるので, 安定的な計測が可能である.
- 実験機材の準備や環境の構築に技術力と時間を要するため一般的に普及するのは困難だと感じる. また, センサとコンピュータを接続するデータロガーが非常に高額なため, これも普及の妨げの一因となると考える.

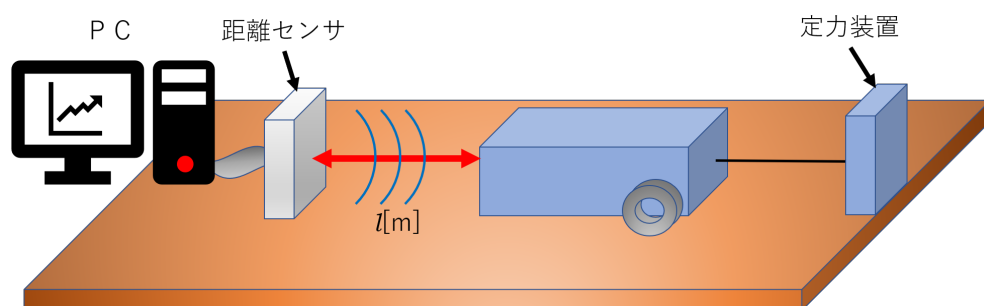


Fig. 1.10 An experiment of Newton's second law of motion using sensor technology

【例 6. センサ技術を用いた等速円運動の向心力の実験】 [42]

[目的] : 簡易加速度計を製作し, 等速円運動の周期 T と半径 r と加速度 a の間の関係式を検証する.

[実験手順]

1. Fig. 1.11 のように, 中心から l_1 , l_2 の位置に加速度センサを設置する.
2. モータの回転数 n を一定に回転させる.
3. 加速度センサが一回転する時間 t (周期 T) を計る.
4. 加速度 a をセンサの値を読み取り計測する.
5. 周期 T ごとに, 加速度 a - 半径 r のグラフを作成する.

[現状と課題]

- 半径 r に応じた加速度 a の値を計測できるので, 実験の再現性は高いと感じる.
- 手でひもを引く向心力 F を感じるができないので, 向心力 F に関する実感を伴った考察が難しいことが考えられる.
- 実験機材の準備や環境の構築に技術力と時間を要するため一般的に普及するのは困難だと感じる.

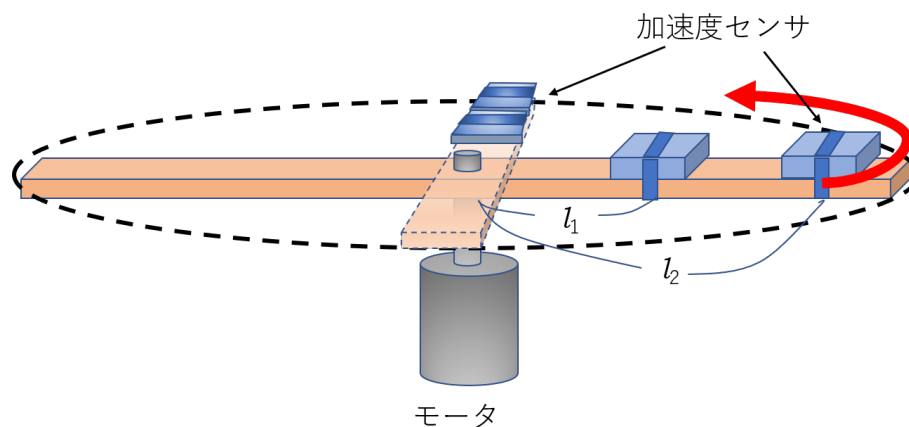


Fig. 1.11 An experiment of circular motion using sensor technology

センサやモータなどの技術を用いた実験は、希望する箇所にセンサを配置することで所望の物理量に関する計測データの取得が可能になるので、詳細な実験が可能となる。よって理論とデータの相関関係が一致しやすく、学生の理解が深まりやすいと感じる。その反面、計測システムの構築にセンサ・電子回路やプログラミングの技術が必要としたり、また高額な計測教材システムの購入が必要になったりと、教材研究・準備などに対する時間、設備購入費が不足している教育現場では普及が困難な教材となっていると考える。しかし、これらを用いた実験・実習授業に学習効果があることは多くの報告が明らかにしていることから、普及の障壁となっている部分を解消することで、物理学習に関する意欲・関心が高まり、理解の深まる学生が増えると期待できる。

1.3.1 ロボット教材の現状と課題

現在、多数のロボット教材が存在するが、それぞれ用途が異なり、高校教育課程に即しており、効果的に学習ができる適切な物理教材としてのロボット教材はないというのが現状である [57]。全てのロボット教材というわけではないが、例としていくつかを以下に示す。

ロボット教材として有名なものは、LEGO 社の「LEGO MINDSTORMS EV3」があげられる [58]。外観を Fig. 1.12 に示す。高校でのアクティブラーニング、ロボットコンテストへの使用実績は多数あるが、高校用物理教材ではない。定価は、62,250 円であり、その他各教材が 10,000 円程度と買い揃えると高価である。



Fig. 1.12 LEGO MINDSTORMS EV3

また、ダイセン電子工業社の「TJ3B」があげられる [59]。外観を Fig. 1.13 に示す。

これは、自律型ロボット製作キットで、プログラム学習やシステム設計学習には適している。ロボットコンテストでの使用実績も多数あり、理科教育用ではなく中学校技術家庭の「計測と制御」の使用例もある。また、同様のものでVSTONE社の「BEAUTO ROVER」[60]も、このタイプのロボットキットである。外観をFig. 1.14に示す。価格は、6,000円～10,000円程度の価格帯である。このように現状存在するロボット教材は「ものづくり教材」としての意味合いが強い。

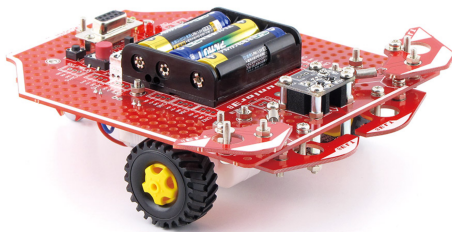


Fig. 1.13 TJ3B



Fig. 1.14 BEAUTO ROVER

1.4 課題を解決するための提案

1.4.1 提案内容

上述のような結果から、高校教育現場で物理教育が抱える問題点としては、正しい物理概念である科学的概念を学生がもつこと、学生の意欲・関心を高めながら学力の向上を図ることである。そして、これを実現するためには安価で効率的な実験・実習授業が可能となる物理教育支援教材と教育手法の提案が必要である。そのために、学生の物理学習への課題について考える。

学生の素朴概念と物理の理解に関して言及したが、彼らが物理を難しく感じる理由についてさらに具体的に考察する。その理由として2つが考えられる。1つ目は、各物理量のもつ性質と、それらの相関関係についての理解が足りないこと、2つ目は、物理の理論式と実際の現象のつながりがイメージできていないことである。

前者が、発生する原因は、物理現象を表す様々な物理公式が、学生にとっては単に物理記号が並べられている「計算式」として認識されているためである。その結果、学生は、物理量を異なる公式の中で無秩序に現れる単なる記号として認識し、物理公式の中で各物理量を持つ意味とそれらの相関関係が理解し難くなる[43]。この問題に対しては、学習支援の観点から様々な物理量を同一の性質に基づいて分類し、

さらに物理公式の中でそれらの関係性が明らかになるように体系化することが有効な解決手段である。

後者は、学生の持つ誤った物理概念が主な原因である。学生がある物理現象について日常生活の中で形成した誤った概念を持っている場合、その物理現象を表す理論式と現実の物理現象をつなげることが困難になる。講義形式での理論式による物理現象の説明では、誤った物理概念は正すことが困難なため、学生は理論式と物理現象間のズレに悩まされ、物理は難しいと思うようになる。一度形成されてしまった誤った物理概念を正すには、各物理現象を実際に体験する実験・実習教育が有効であることは上述のとおりである。高校教育課程でこれらの実験・実習教育が高い教育効果を得るためには、各実験実習に学生が強く興味を持ち能動的に参加することが重要である。高校物理で学習する物理現象に対して十分な回数の実験実習を実施することである。しかし、レポート作成を中心とする退屈な実験、理解しにくい教材や実習内容で、学生が興味を持って自主的に実習に取り組む環境ではない場合が多い。

最近では、学生への実験に対する参加度を高くするために、RT(Robot Technology)を物理実験実習に積極的に取り入れる教育が多く行われている [45][32][61]。RTを用いた実験は、学生らの興味を引きやすく、実験に自主的かつ積極的に参加するため、高い教育効果が得られることが報告されている [62][63]。しかし、これまで提案されている RT 教材は、実験できる物理現象が一つに限定されている場合が多く、準備や片付けも非常に煩雑である。また、価格も比較的高いため、高校教育課程で学ぶすべての物理現象に導入することは困難である。

以上を踏まえて、本研究では、高校物理の力学分野に焦点を置き、学習するすべての物理量を「計測可能、計測又は計算で算出可能、計算で算出可能」の基準で分類し、特定の物理公式の中でそれらの相関関係が分かりやすく表せることができる新しい体系化手法を提案する。また、その分類に基づき、RT教材を用いた実験・実習の学習効果を高める手法として、物理現象の可視・可触化を提案し、具体的な物理現象においてその有効性を示す。

さらに、提案する新しい分類手法に基づき、すべての物理現象の再現実験が最小個数のセンサ構成で実施できる、導入コストの低減を意識した RT 教材ロボットを開発する。本研究で提案した手法により、学生は散在した物理量を「算出手法」を基準に整理することができ、特定の物理理論式の中でのそれらの物理的関係性を理解しやすくなると期待できる。

1.4.2 物理教育の各手法の問題点

前項で学生の物理を学ぶにあたり現状の教育手法での問題点に対して、改善案としてRT教材について提案した。ここで、従来の実験・実習授業、先進的な技術などを用いたセンサ実験・実習授業、および現状盛んにおこなわれている中心の教育手法である講義、また、学生の関心を集めるものづくり教材において、それぞれの教育手法で教育効果のある面と、また別の面において改善可能な点を有していることについて考える。そこで改めて、現状の物理教育において学生が効率よく学習をするのを阻害している要因を列挙する。それぞれの教育手法が各要因に対して問題となっているのかどうかをTable. 1.3に示す。問題が無い場合を「○」、問題が若干ある場合を「△」、大きな問題がある場合を「×」で示してある。要因に関しては3つの項目に分けて考える。1つ目は「効果性」で学生の学習効果に関する要因、2つ目は「実行性」で教員が授業で実施することに関する要因、3つ目は「先進性」で将来的な有用性に関する要因を考えた。また、それぞれの項目において示した評価に対して「○：2点、△：1点、×：0点」という方法で点数化して各教育手法についてFig. 1.15のグラフで示した。

1. 効果性

- 学力アップ : 記号、公式、現象の理解と知識の定着を図ることができ、評価の満足・テストでの得点が得られるかという要素。
- 意欲的に取り組み : 学生が自ら学びたいと興味・関心を学生が示すかという要素。
- 科学的概念獲得 : 学生の理解を促すために非科学的な素朴概念から科学的概念に切り替えることができるかという要素。
- 大学入試対策 : 大学入試対策となるか、試験問題が解けるようになるかという要素。

2. 実行性

- 授業準備が容易 : 効果的な授業を行う際の指導案・教材作成が容易であるかという要素。
- 準備片付の簡便さ : 授業前、授業後の準備・片付けの煩雑さが無いかという要素。

- 費用が安い : 備品として購入可能な価格であるかという要素.
- 実験が容易 : 授業内の時間的な余裕がないので, 再現性を求めて実験中に練習や過度な説明を必要としないかという要素.

3. 先進性

- 将来への有用性 : 学生が学習に取り組む際のモチベーションとして重要な要素.
- 技術的容易さ : 導入にあたり, 学生や教員にとっても特別な技術を必要としないかという要素.
- 先端技術を使用 : 学生に有用性や興味・関心を抱かせるために必要な好奇心を刺激する要素.
- 情報機器の使用 : 情報機器の使用が推奨されており, 現状では使用頻度も低くなっており, それを解消するかという要素.

これまで行われている講義形式の授業は実行性が高く教員としては日常的に行いやすいのであるが, 効果性・先進性という面で多くの改善の可能性を有している. 特に意欲・関心を高める部分では新たな提案が望まれるのである. また, 従来型の実験授業では物理現象を長年行われてきた方法で観察・計測するため, 実験自体の持つ困難性と多くの時間を要するという問題があり実行性が低く, 学生が興味・関心が高くなり難いということも改善の可能性を有している. 先行研究の報告もあるセンサ実験授業では, 効果性・先進性は高く学生の反応も良い. しかし, 現状では導入にあたり非常に高額なシステムや電子・情報技術が必要であり, そのため実行性が低くなっている. 沖野 [48] の報告で使用されている株式会社ナリカ製のセンサ・データロガーシステムは1セットあたり50万円という価格であり, 現状で備品購入が難しいという問題点があがっている教育現場への浸透は障壁が高いと考える. ものづくり教材は効果性・先進性は高いが物理学習用途ではない. 本研究で提案するRT教材は, 計測センサとアクチュエータを搭載した先進性と, そのシステム化された内容は実行性も高く, 学習効果の高い機能も有しており効果性もあり, これらの問題点を解消する可能性をもつ教材であると考え.

Table. 1.3 Comparison of educational methods of high school physics

	効果性				実行性				先進性			
	学力 の アップ	意欲的 に取り 組む	科学的 概念の 獲得	大学 入試 対策	授業 が 容易	準備と 片付け が簡単	費用 が 安い	実験 が 容易	将来 への 有用性	技術的 な 容易さ	先端 技術 を使用	情報 機器 の使用
提案 RT 教材	○	○	○	△	△	○	△	○	○	△	○	○
センサ実験	△	○	○	△	×	×	×	○	○	×	○	○
従来実験	△	△	○	△	×	×	△	△	△	○	×	△
講義	○	×	×	○	○	○	○	×	△	×	△	×
ものづくり教材	×	○	△	×	×	×	△	×	○	×	○	○

○ : 2点, △ : 1点, × : 0点

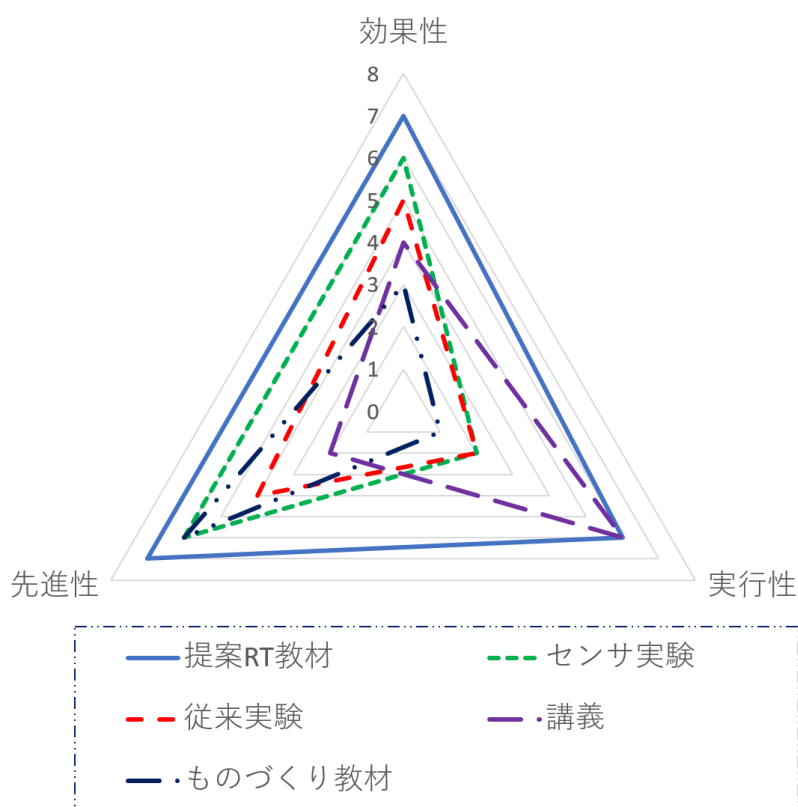


Fig. 1.15 A radar chart on evaluation of educational methods of high school physics

1.5 論文の構成

第1章 序論では，本論文の背景と目的および構成について述べる．

第2章 高校物理力学分野で学習する物理量について，センサで計測可能か否かと，物理量の組み合わせという観点で分類と体系化を行い，その学習効果を検証した結果を述べる．

第3章 物理量と物理現象の可視・可触化を目指して，摩擦学習支援用 RT 教材を開発し，その学習効果を検証した結果を述べる．

第4章 物理量の分類と体系化，及び物理量と物理現象の可触化をコンセプトに高校物理で学習する物理量が計測可能なセンサシステムを搭載した教材ロボットを設計開発し，その設計検証を行った結果について述べる．

第5章 開発した高校物理学習支援用 RT 教材を用いて円運動に関する授業を行い，学習効果を検証した結果を述べる．

第6章 結論では，本論文の第2章から5章までの総括を行い，今後の課題について述べる．

本研究において実施する実験授業に関しては，異なる条件で授業を行った際には，その授業の後，すべてのグループの生徒に対して再度 RT 教材を使用した解説を行っており，それぞれのグループ間での学ぶ機会の公平性を担保している．そして，不明な点があれば質問に答える旨の説明をして，すべてのグループの生徒に不利益が無いように配慮している．また，生徒本人と保護者に対してこの授業に関する趣旨説明を行い同意を得ている．

第2章 高校物理学習における物理量の分類と体系化の有効性検証

前章で述べたように物理が理解し難い学生が難しく感じる理由として、各物理量のもつ性質とそれらの相関関係についての理解が足りないことである。本章では、高校教育課程の物理学習における物理量の体系化を提案する。教科書等では、学生が物理量を効率的に理解できるように、それらを適切に分類又は体系化して提示しているとは言いがたい。そこで学生の理解に適した分類の基準として、RTを用いた物理量の感覚化という視点に注目し、物理の力学分野で学習する物理量を「センサで計測可能なもの」と「センサで計測できないもの」に分類する方法を提案した。

同分類を基に、学習効果をさらに高めることを目的として物理量の体系化を行い、学生への伝達手段としての学習支援ソフトウェアを開発した。このソフトウェアは、学生が学びたい物理量についてPC上でのボタン操作を行うと、その物理量の相関関係図を視覚的に提示するものである。

提案する物理量の分類と体系図、及び学習支援ツールが、学生の物理学習における学力向上への有効性を検証するため、学生を異なる条件で4つのグループに分け、前後の理解度テストと講義内容に関するアンケート調査を行った。

2.1 物理量・公式の学習と体系化の要請

物理嫌いの学生は、物理量や理論式と実際の物理現象の繋がりがイメージできず、またそれらをうまく整理できていないことが考えられる。教科書等では、学習する物理量に関する物理的な意味と、他の物理量を用いてその物理量を算出できるように公式が記述されている。各物理量についての理解を定着させる場合、学生の物理量への理解が曖昧であるならば、公式は暗記する以外に学習する方法がない。教科書では学習する物理量の分類やその適切な体系化がなされておらず、これが物理量の意味やそれらの相関関係を理解し辛くする原因であると考えられる。したがって、学習する物理量全体を学生への効率的な理解を目標に適切に分類及び体系化し、それらが俯瞰的にみえるようにすることは、物理量を効率よく、確実に理解するのに役に立つと言える。

根本 [64] は「物理教育で用いる量概念の捉えやすさについて」で、遠山ら [65][66] による研究「量の体系」における主張に従い物理量の分類を行い、その活用について述べている。それによれば、従来の物理教育では数値化された数値の大きさだけが問題にされてきたため、加法性の成立しない量で混乱が生じており、簡単に計測できる量であってもその数値的な扱いについては複雑な公式を覚え込む必要がある。

本研究ではこの分類及び体系化の視点に加えて学生の物理現象を実感することの重要性を考え、分類の基準として RT (Robot Technology) を用いた物理量の感覚化という視点に注目した。本章では、この視点にて物理量の分類を行い、更に相関関係を含めて体系化を行った。この体系化に関するイメージ図を Fig. 2.1 に示す。物理現象及び、物理量の相関関係が理解できていない学生にとっては同図の左のように物理量がバラバラの状態だと考える。そこで提案する分類と体系化を用いて学習を行うことによって、右図のように整理されて理解は深まるのではないかと考える。

提案手法では、各物理量を適切に分類し、これらを性質が近いもの同士で集めて細分化している。これにより、散在していた物理量が一定の基準で分類され、学生は各分類に属する物理量の性質が理解しやすくなる。また、分類された物理量間の関係をまとめて体系化し、相関関係図として提示することで、各物理量の意味と関係性を視覚的に把握できる。

2.2 高校教育課程における物理量の分類

本研究で目標とする RT 教材では、高校教育課程における物理量をリアルタイムで測定・数値化し、常に定量的にモニタリング出来る物理量の「見える化」を行う。

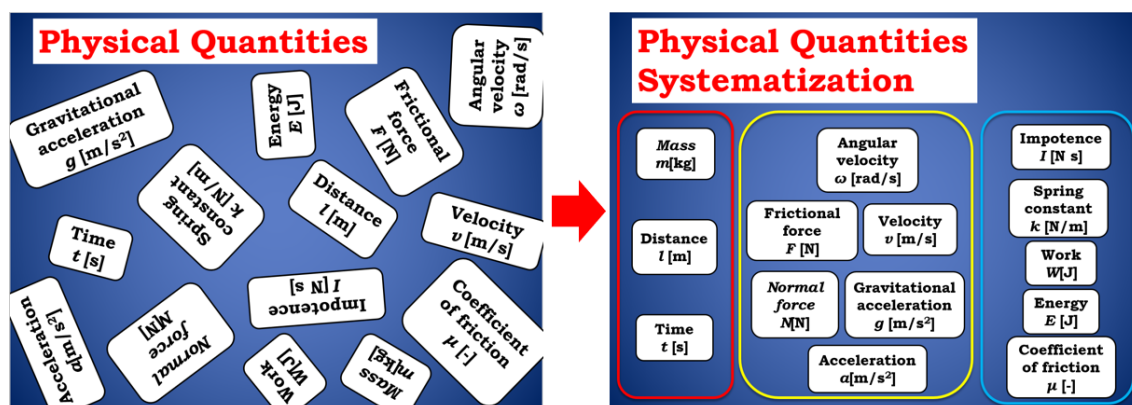


Fig. 2.1 Image diagram of systematization of physical quantities

その開発過程において，高校教育課程で学習する全ての物理量を同等に取り扱うのではなく，各物理量の計測又は，物理公式による算出を基に分類することを試みた。

物理学習の中で特に学生が理解し辛いのは，公式によって物理的意味が定義される物理量についてである．これらに対しては，物理現象としての実感が乏しく，難しく感じている学生が多いように見受けられる．このような実感と想像しにくい物理量の学習において，本章で提案する物理量の分類を用いることで，物理量への理解がスムーズに行われると期待される。

2.2.1 センサの分類

物理量の分類においては，学習したい物理量と，それを計測できるセンサの分類が重要な課題となる．高校教育課程の物理で学習する物理量を直接測定，または算出する際に必要となる物理量の値を計測するために使用可能なセンサ類を Table 2.1 に示す．本研究で提案するシステムで使用するセンサは RT 分野で頻繁に使用されており，市場にて安価で比較的容易に入手可能なものである．同表から，高等学校教育課程における物理の力学分野で学習する物理量を「見える化」するために計測する際に必要なセンサは，タイマ，力センサ，距離センサ，角度センサ，加速度センサ，角速度センサであることが分かる。

Table. 2.1 List of sensors used to measure each physical quantities in high school curriculum

Physical Quantity Name	Symbol	Sensor
Time	t	timer
Mass	m	force sensor pressure sensor
Length	l	PSD distance sensor ultrasonic distance sensor
Acceleration	a	acceleration sensor
Angle	θ	gyro sensor rotary encoder
Angular Velocity	ω	gyro sensor
Force	F	force sensor pressure sensor
Torque	M	force sensor

2.2.2 物理量の分類

提案する分類手法を Fig. 2.2 に示す. まず, 物理量を「センサで計測可能なもの」と, 「センサで計測できないもの」の二つに, 大きく分類する. 前者を「計測可能物理量」, 後者を「組立物理量」と定義する.

「計測可能物理量」は, 学生が直接体感できることを意味しており, その量は定量的に数値化できるため視認することが可能である. さらに, これを「基本物理量」と「複合物理量」の2種類に細分する. 前者は, 物理量の基本となるもので, これらを組み合わせて他の物理量が記述できる. 後者は, センサでの直接計測も可能であるが, 一方で複数の物理量を用いて組み合わせることで算出することも可能な物理量である. 次に, センサでは直接計測出来ず, 他の物理量を組み合わせた理論式からのみ算出するのが「組立物理量」である. 「組立物理量」の中でエネルギーに関連するものを「エネルギー物理量」, 各物理現象における比例定数等を「係数物理量」としてさらに細分化している.

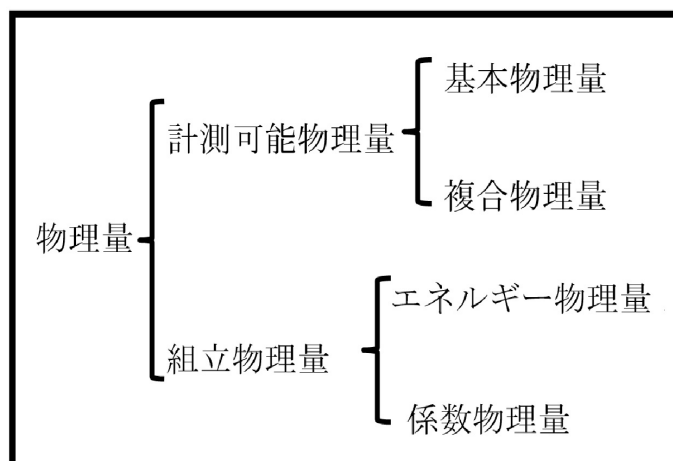


Fig. 2.2 Classification diagram of physical quantities

Table 2.2 に高等学校教育課程の力学分野で扱う物理量の一覧 [41][42] を示す。ここで、表の左端に記述したローマ数字は、それぞれ物理量の分類を表している。「I」は「基本物理量」を表し、「II」は「複合物理量」を表している。そして、この「I」と「II」をあわせた分類は「計測可能物理量」を表している。また、「III」は「係数物理量」を表し、「IV」は「エネルギー物理量」を表している。そして、この「III」と「IV」をあわせた分類は「組立物理量」を表している。

ここで、SI 単位における分類と、本章で提案する分類との関係について述べる。SI 単位では、SI 基本単位、そのべき乗の積からなる SI 組立単位、固有の名称と記号で構成する SI 組立単位に分類される [67]。SI 単位系では、7つの基本単位とそれらに対応する7つの基本物理量を定義しており、すべての物理量は基本物理量を組み合わせた組立量として記述できる。基本物理量の中で、長さ $l[\text{m}]$ 、質量 $m[\text{kg}]$ 、時間 $t[\text{s}]$ が高校物理力学分野で扱う基本物理量である。これらが本章で定義する基本物理量と同等のものである。また、基本物理量以外の物理量、つまり複合物理量とエネルギー物理量、係数物理量は、SI 単位系における組立量である。ここで、SI 単位における組立単位は、物理現象を考慮した分類とはいえないので、提案する物理量の体系化に合わせて SI 単位系の組立単位を細分化して、物理的な意味と合わせての学習を促すことを考えた。

Table. 2.2 List of physical quantities in high school curriculum

Physical Quantity			Unit		SI unit
	Name	Symbol	Name	Symbol	classification
I	Time	t	second	s	SI base units
	Mass	m	kilogram	kg	
	Length	l	meter	m	
II	Velocity	v	metre	m/s	SI coherent unit
	Acceleration	a	per second		
			metre	m/s ²	
	Angle	θ	per second ²		
	Angular Velocity	ω	radian	rad	
			radian	rad/s	
	Period	T	per second		
			second	s	
	Frequency	f	hertz	Hz	
	Force	F	newton	N	
	Centrifugal Force	F	newton	N	
	Elastic Force	F	newton	N	
Frictional Force	F	newton	N		
Normal Force	N	newton	N		
Torque	M	newton metre	Nm		
III	Frictional Coefficient	μ	-	-	
	Spring Constant	k	newton per metre	N/m	
	Restitution Coefficient	e	-	-	
IV	Kinetic Energy	E_k	joule	J	
	Potential Energy	E_p	joule	J	
	Elastic Energy	E_e	joule	J	
	Work	W	joule	J	
	Power	P	joule per second	J/s	
	Momentum	p	kilogram metre	kg m/s	
			per second		
Impulse	I	newton second	Ns		

2.3 物理量分類の学習効果についての評価

2.3.1 物理量分類についての評価授業概要

本章で提案した物理量の分類手法の有効性を確認するために評価授業を実施した。評価授業に参加した学生は、高校3年生32名で、16名ずつの2グループ(A, B)に分けた。グループ分けは「物理」の成績の平均点が各グループ間で 49.5 ± 1 点となるようにした。評価授業の手順を以下に示す。

【評価授業手順】

1. 学生全員に対して、事前の学力を調査するために物理量に関する Fig. 2.3 のような確認テストを実施した。このテストの詳細内容は後述する。(20 分間)
2. Aグループに対して、本章で提案する物理量の分類については触れず、確認テストの設問について出題順に1問ずつ答え合せを行った。その際に設問で問われる物理量について物理現象と共に解説を行った。(25 分間)
3. Bグループに対して、提案する物理量の分類を基に作成した Fig. 2.4 のようなプリントを用いて、各物理量の相関関係、組み合わせについて授業を実施した。その授業の中で、センサ計測と物理現象、それに関連させた物理量分類を共に解説を行い、確認テストの答え合わせも同時に実施した。(25 分間)
4. 学生全員に対し、事前に実施した確認テストとは出題順を変更した確認テストと理解度アンケートを実施した。(20 分間)

組 番 氏名

前

問. 高校で学習する物理量を算出するのに必要な物理量(記号可)を()に記入せよ

物理量	
1 動摩擦係数 μ' [-]	は()と()で求められる。
2 質量 m [kg]	は()で求められる。
3 弾性力 F [N]	は()と()で求められる。
4 静止摩擦係数 μ [-]	は()と()で求められる。
5 モーメント M [N m]	は()と()で求められる。
6 角度 θ [rad]	は()と()で求められる。
7 位置エネルギー E_p [J]	は()と()と()で求められる。
8 力 F [N]	は()と()で求められる。
9 ばね定数 k [N/m]	は()と()で求められる。
10 距離 l [m]	は()で求められる。
11 速度 v [m/s]	は()と()で求められる。
12 向心力／遠心力 F [N]	は()と()と()で求められる。
13 加速度 a [m/s ²]	は()と()で求められる。
14 運動エネルギー E_k [J]	は()と()で求められる。
15 時間 t [s]	は()で求められる。
16 仕事 W [J]	は()と()で求められる。
17 反発係数 e [-]	は()と()で求められる。
18 摩擦力 F [N]	は()と()で求められる。
19 角速度 ω [rad/s]	は()と()で求められる。
20 弾性エネルギー E_e [J]	は()と()で求められる。
21 垂直抗力 N [N]	は()と()で求められる。

Fig. 2.3 Confirmation test

組 番 氏名

物理量の算出に関する問題演習

物理量		
基本物理量	1 時間 t [s]	は()で求められる。
	2 質量 m [kg]	は()で求められる。
	3 距離 l [m]	は()で求められる。
複合物理量	4 速度 v [m/s]	は()と()で求められる。
	5 加速度 a [m/s ²]	は()と()で求められる。
	6 角度 θ [rad]	は()と()で求められる。
	7 角速度 ω [rad/s]	は()と()で求められる。
	8 力 F [N]	は()と()で求められる。
	9 摩擦力 F [N]	は()と()で求められる。
	10 垂直抗力 N [N]	は()と()で求められる。
	11 弾性力 F [N]	は()と()で求められる。
	12 向心力／遠心力 F [N]	は()と()と()で求められる。
	13 モーメント M [N m]	は()と()で求められる。
係数物理量	14 静止摩擦係数 μ [-]	は()と()で求められる。
	15 動摩擦係数 μ' [-]	は()と()で求められる。
	16 ばね定数 k [N/m]	は()と()で求められる。
	17 反発係数 e [-]	は()と()で求められる。
エネルギー物理量	18 運動エネルギー E_k [J]	は()と()で求められる。
	19 位置エネルギー E_p [J]	は()と()と()で求められる。
	20 弾性エネルギー E_e [J]	は()と()で求められる。
	21 仕事 W [J]	は()と()で求められる。

Fig. 2.4 Teaching material of explanation about suggest classification

2.3.2 確認テストとアンケート内容

評価授業で用いた確認テスト及びアンケートの内容について説明する．まず，確認テスト (Fig. 2.3) について，以下のように運動量 p に関する問題を例として示して説明する．

【例題】運動量 p [kg m/s] は () と () から求められる．

問題は，特定の物理量の算出に関係する他の物理量を問題文中で括弧抜きにして出題し，100 点満点で採点した．学生は，括弧内に質量 m ，速度 v と解答すれば正解となる．テストは Table 2.2 に示す物理量の中から 21 個を選出しランダムな順序で 2 パターン作成した．また，質量 m ，時間 t ，距離 l の算出方法に関しては，直接計測を正解としており，A，B グループ共に事後に行う授業の解説の中で説明を行った．

アンケートは，授業の学習効果についての所感を「大変役に立った (5 点)」，「役に立った (4 点)」，「普通 (3 点)」，「役に立たなかった (2 点)」，「全然役に立たなかった (1 点)」の 5 段階評価での回答とした．また，これだけでは答え難い質問は自由記述にして学生の考えを可能な限り読み取れるようにした．以下にアンケート内容を示す．なお，問 1 から問 3 までは全てのグループに対して行い，問 4 から問 6 まではグループ B に対して行った．アンケートの内容を以下に示す．

【アンケート内容】

- Q 1．今回の授業を通して各物理量の相関関係を理解，イメージ出来るようになりましたか．
- Q 2．なぜそのように思いましたか？理由をお書き下さい．(自由記述)
- Q 3．このような授業はどのように感じましたか？(自由記述)
- Q 4．センサで計測できるかどうかによる分類は，各物理量の関係性の理解に役立ちましたか？
- Q 5．エネルギー型と係数型で分類したのは，それらの物理量の関係性の理解に役立ちましたか？
- Q 6．基本物理量と複合物理量に分類した所は，それらの物理量の関係性の理解に役立ちましたか？

2.3.3 仮説検定によるデータ分析 [68]

授業前後の確認テストの得点とアンケートの各設問に対する5段階評価の回答値を基にそれぞれ標本平均値，標本標準偏差を求めた．ここで， n 個のデータを x_1, x_2, \dots, x_n ，標本平均値を \bar{x} ，標本標準偏差を s とすると，各設問での値は

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

のように表される．この結果にもとづいて条件の異なる2つのグループに対して仮説検定を行い母集団について設定した仮説についての有意性を判定する．これらの結果は，異なる標本（サンプルグループ）から導かれ，それぞれ独立した対応のないデータであり，それらの母平均 μ の有意性についての判定はt検定を行う．

これらのデータにおいて母標準偏差 σ が不明であり仮説検定する際に，最初にF分布を活用して2つの標本分散 s^2 をもとに検定統計量 T を算出し，母分散 σ^2 が異なるかどうかを判定する．その際の検定統計量 T は

$$T = \frac{s_A^2}{s_B^2} \quad (2.3)$$

のように表される．F検定の結果において，等分散 ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$) の場合，2つのグループの標本数の和が100未満で小標本であるので，2つの母平均の差のt検定を実施する．検定統計量 T は次のように表される．

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}}} \quad (2.4)$$

また，小標本で非等分散 ($\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$) の場合2つの母平均の差のウェルチのt検定を実施する．その際の検定統計量 T は

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.5)$$

のように表される．ただし，自由度 f は，

$$f = \frac{1}{\frac{C^2}{n_1-1} + \frac{(1-C)^2}{n_2-1}} \quad (2.6)$$

で表され、ここで、

$$C = \frac{\frac{s_1^2}{n_1}}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (2.7)$$

と表される。

また、アンケートの5段階評価で得た回答に関して評価を行う際には母平均 μ と比較値 μ_0 との差の t 検定を行う。その際の検定統計量 T は次のように表される。

$$T = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (2.8)$$

確認テスト結果の仮説検定計算は次の手順で行う。まず、帰無仮説 (H_0) の設定を行う。ここでは、比較する母平均が等しいという仮説を立てる。次に対立仮説 (H_1) として、いずれか一方が大きな値をとるという仮説を立てる。そして、F 検定の結果に応じた式を用いて検定統計量 T を計算する。有意水準を 5 % で右片側検定とし、自由度の算出結果から棄却域 R を決める。 $T \geq R$ なら帰無仮説 H_0 を棄却し、 $T < R$ なら H_0 を棄却しない。その結果を基に有意の差を判定する。アンケート結果については、帰無仮説は母平均が比較値 ($\mu_0 = 3$) と等しいとし、対立仮説は母平均が比較値より大きな値をとるという仮説を立て、同様に有意の差を判定する。

2.3.4 実験結果

各グループの学生の物理成績と実施した確認テストの結果 (Table A.1) をもとに各グループの平均値を Table 2.3 に、母平均 μ に関する有意の差についての判定結果を Table 2.4 に示す。Table 2.3 より、A グループの平均点に比べ、B グループの平均点が高い結果であった。この結果に対して Table 2.4 より、 μ_A と μ_B では μ_B に有意の差が確認できた。この結果から物理量の相関関係に関する内容に限るが、本章で提案する物理量の分類は学習効果があり、学力の向上がみられることが確認できた。

Table. 2.3 Average of confirmation test results conducted before and after class about Group A and B

Group	confirmation test average point		before and after difference		
	before	after	average	variance	standard
			\bar{x}	s^2	s
A	5.75	30.00	24.38	147.71	12.15
B	3.31	46.13	42.88	220.65	14.85

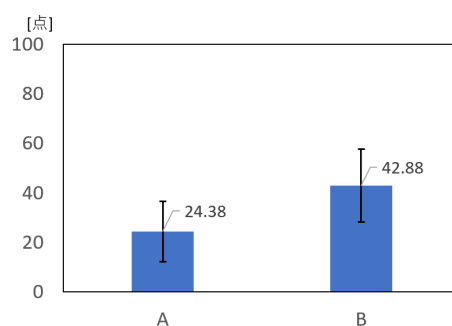
Fig. 2.5 Average of confirmation test results conducted before and after class about Group A and B(Average \pm S.D.)

Table. 2.4 Hypothesis test result of confirmation test for Group A and B

		A and B
F test	test statistic T	1.494
	critical region R	2.403
	population variance	homo scedastic
t test	test statistic T	2.293
	critical region R	1.697
	null hypothesis H_0	rejection
	result	$\mu_A < \mu_B$

次に授業後に実施した5段階評価アンケートの各設問の結果で得られた回答値の詳細結果 (Table A.2) から, 母平均 μ と「普通 (3 点)」を比較値 $\mu_0 (= 3)$ として, その差の t 検定の判定結果を Table 2.5 に示す. グループ A では, 授業を通して物理量の理解が進んだかという問いに関して, 母平均 $\mu < 3$ となり「役に立たなかった」と判定された. グループ B では, 授業を通して物理量の理解が進んだかという問い, 物理量の各分類手法の学習効果への問いに関して, 各設問ともに $\mu = 3$ となり「普通」と判定された.

テスト結果を合わせて考えると, グループ A に比べてグループ B は学力向上への効果は認められたが, 理解に対して役立つのかという学生の感想は, 普通という結果であった. 自由記述の回答では「分類したことであまりよくまとめてくれていて普段の物理より分かりやすかった」, 「基本の時間, 距離, 質量が分かれば大抵出来る事が分かった」という意見があった. その反面で, 「物理があまり得意ではなく理解し辛かった」, 「難しかった」という意見もあった. 分類の効果で物理量に関する新たな気づきがあった学生と, 難しいという先入観を覆すことが出来なかった学生が入り交じった状態という結果であった. これは, 分類の学習効果を示す結果であるのと同時に学生への伝達手段の改善の余地があるということを示唆する結果であると考え.

Table. 2.5 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group A and B

($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.753$)

		Q1	Q4	Q5	Q6
A	average \bar{x}	2.56			
	variance s^2	0.53			
	standard deviation s	0.73			
	test statistic T	-2.411			
	result	$\mu < 3$			
B	average \bar{x}	3.13	3.06	3.19	3.31
	variance s^2	1.18	1.53	1.36	1.56
	standard deviation s	1.09	1.24	1.17	1.25
	test statistic T	0.477	0.194	0.650	0.992
	result	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu = 3$

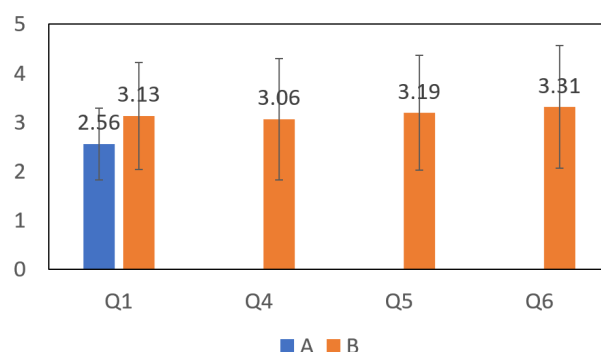


Fig. 2.6 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group A and B (Average ± S.D.)

2.4 物理量の相関関係の体系化

学生が各物理量とそれらの相関関係を正しく理解し、学習内容を定着させるためには、物理量の分類だけでなく、それをいかに効果的に学生へ伝達するかも重要な問題であることが分かった。そこで、本章では分類の提案に留まらず、提案手法に基づいて各物理量の相関関係が視覚的に確認出来るように物理量の体系化を行うことを考えた。前項で述べたように、基本物理量は他の物理量を算出する際に使われ、複合物理量や組立物理量は、基本物理量や他の物理量の組み合わせで算出される。即ち、各物理量はクモの巣のように互いに複雑な関係を持つ。この相関関係を分かりやすく体系化して学生へ提示することが可能であれば、物理量間の相関関係の全体像把握や、物理量そのものの性質の理解にも有効であると考えられる。各物理量を前項での分類法を基に各物理量間の関係を矢印でつなげた相関図を Fig. 2.7 に示す。

Fig. 2.7 の相関図では、「計測可能物理量」と「組立物理量」をそれぞれ左と右に配置し、「基本物理量」、「複合物理量」、「エネルギー物理量」と「係数物理量」を左から配置した。このように体系化することで、物理量の関係性が大きな流れとして「左」から「右」へ流れるように見せることが可能である。すなわち、「基本物理量」は多くのその他の物理量に係っていること、「複合物理量」は「基本物理量」とその他の「複合物理量」の組み合わせで成り立っていること、「エネルギー物理量」は「基本物理量」と「複合物理量」から算出できることが視覚的に把握できる。

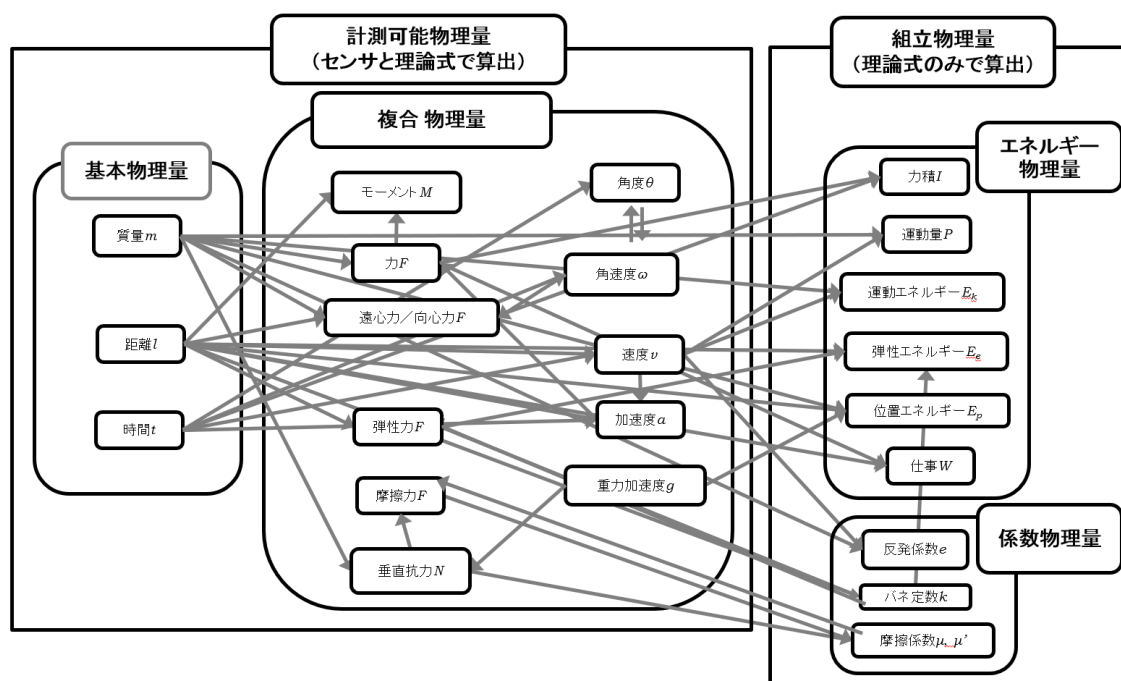


Fig. 2.7 Correlation diagram of physical quantities

2.4.1 物理量の体系化簡易学習ソフトウェア

提案する物理量の体系図を授業等で用いる際に、学生の理解をより効果的に促すため、各物理量の相関関係が把握できる簡易学習ツールを合わせて提案する。提案学習ツールは、PC上のボタン操作で各物理量間の相関関係が視覚的に確認できるというものであり、これを用いることで物理量の相関関係に関する学習効果の更なる向上が期待できる。

提案学習ソフトウェアは、接近性を容易にするために特別なソフトウェアを使用せず、一般的に入手可能なExcel(Microsoft社)のマクロ機能を使って開発した。学習ソフトウェアの物理量相関関係表示画面 (Fig. 2.8) とその実際のスナップ写真 (Fig. 2.9), 及びその操作パネル画面 (Fig. 2.10) を示す。操作方法はシンプルで、操作パネル上の各物理量が記されたボタンの中で、相関関係が知りたい物理量のボタンをマウスでクリックすると該当する物理量とそれに関連する物理量の色が変化し、それらが矢印でつながる。クリアボタンをクリックすると初期状態に戻り、他の物理量が選択できる。このように相関図を視覚的に確認することにより各物理量の性質や算出

方法までイメージでき、物理量の学習効率が向上すると期待できる。

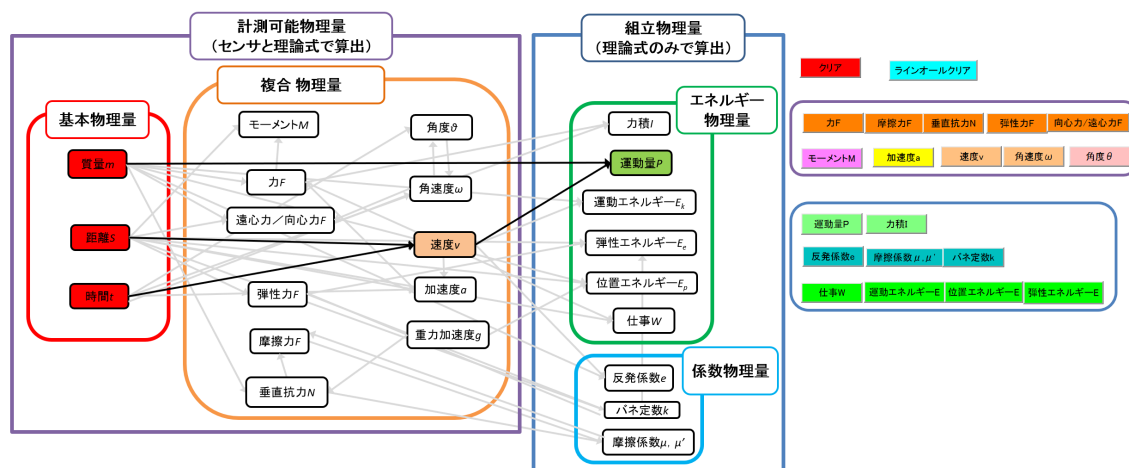


Fig. 2.8 Screen capture of the learning software for correlation of physical quantities

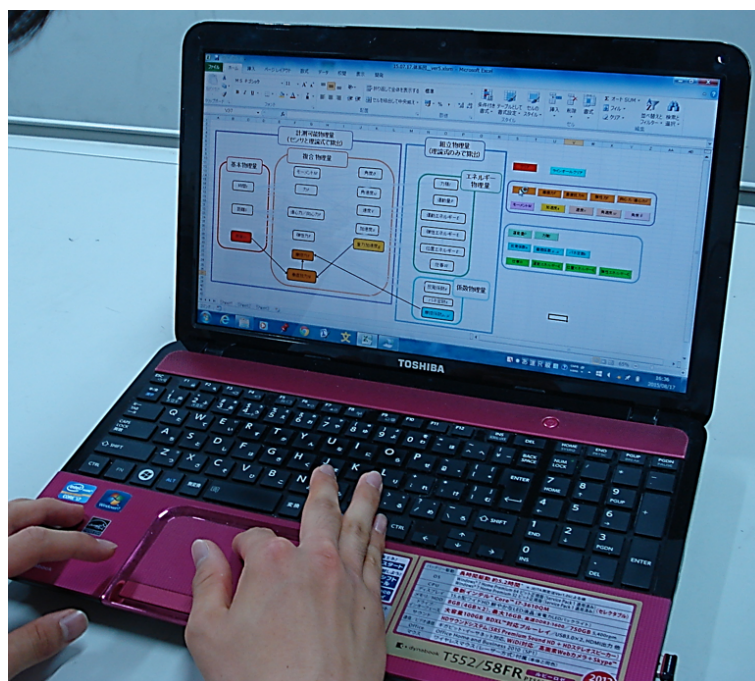


Fig. 2.9 Snap shot of the learning software for correlation of physical quantities

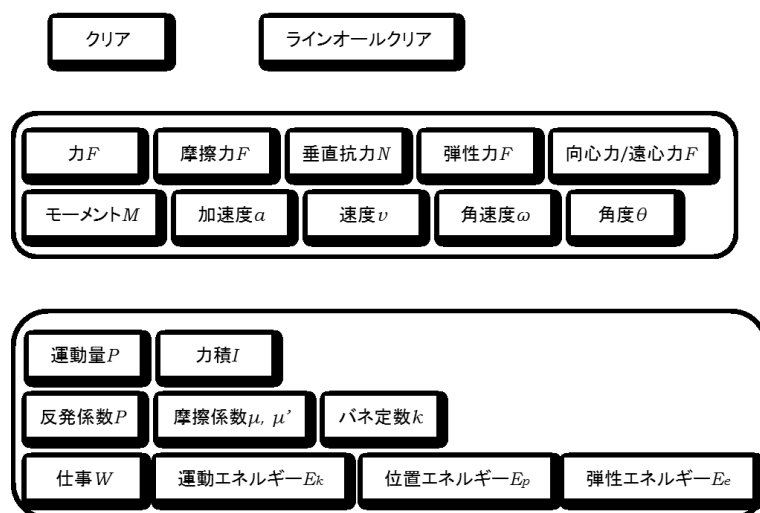


Fig. 2.10 Screen capture of control panel of the learning software

2.4.2 物理量体系化と簡易学習ソフトウェアの活用

提案した物理量の体系図と簡易学習ソフトウェアを活用した学習について、具体的に運動量 $p[\text{kg m/s}]$ を例として考える．運動量 $p[\text{kg m/s}]$ は、物体の質量 $m[\text{kg}]$ と速度 $v[\text{m/s}]$ のかけ算で算出されるもので、従来の学習であるならば、学生は公式として

$$p = mv \quad (2.9)$$

を暗記することになりがちである．この相関関係を本章の提案手法に当てはめる．まず運動量 $p[\text{kg m/s}]$ は組立物理量で、質量 $m[\text{kg}]$ と速度 $v[\text{m/s}]$ は計測可能物理量と分類される．ここで質量 $m[\text{kg}]$ は基本物理量である．速度 $v[\text{m/s}]$ は複合物理量であり、基本物理量である距離 $l[\text{m}]$ と時間 $t[\text{s}]$ から、

$$v = \frac{l}{t} \quad (2.10)$$

と算出される．つまり、運動量 $p[\text{kg m/s}]$ は、基本物理量である質量 $m[\text{kg}]$ と、基本物理量である距離 $l[\text{m}]$ 、時間 $t[\text{s}]$ により算出される複合物理量である速度 $v[\text{m/s}]$ によって算出される物理量であり、それ自身は、エネルギー物理量と分類される．

Fig. 2.10 の操作パネルにおいて、運動量 $p[\text{kg m/s}]$ のボタンをクリックすると、Fig. 2.8 の物理量相関関係表示画面のように関係する物理量が表示される．すなわ

ち、各物理量の関係性が矢印でつながれ、それぞれの関係性が視覚化されることによって体系的に理解できるのである。

このように学生は単に公式を暗記するのではなく、一つ一つの物理量の意味を理解しながら理論式を組み立ててブロックのように構築することで効率的な理解の定着が期待できる。また、各物理量を計測するセンサの例を合わせて解説することで実際の物理現象と物理量及び理論式をリンクさせてイメージを容易にすることが可能になる。

2.5 物理量体系化と簡易学習ソフトウェアの学習効果の評価

2.5.1 評価授業概要

本項で提案した物理量の体系化手法、同手法を基にした相関関係学習ツールの有効性を確認するために評価授業を実施した。その際の授業風景を Fig. 2.11 に示す。評価授業に参加した学生は、前項の参加者に加えて、高校3年生32名で、16名ずつの2グループ(C, D)に分けた。グループ分けは「物理」の成績の平均点が各グループ間で 49.5 ± 1 点となるようにした。評価授業の手順を以下に示す。



Fig. 2.11 Snap shot of the class using software to support learning physical quantities

【評価授業手順】

1. 学生全員に対して、事前の学力を調査するために物理量に関する Fig. 2.3 のような確認テストを実施した。このテストの詳細内容は後述する。(20 分間)
2. C グループに対して、提案する物理量の分類を基に作成した Fig. 2.4 の教材プリントを用いた。同時に、提案する物理量の体系化を簡易学習ソフトウェアを用い、各物理量を計測するセンサと物理量の相関関係について授業を実施した。授業の中で、センサ計測と物理現象、それに関連させた物理量分類を共に解説を行い、確認テストの答え合わせも同時に実施した。(25 分間)
3. D グループに対しては、最初は教員による授業を行わずに、簡易学習ソフトウェアを用いて提案する物理量の分類と体系化について自主的に確認テストの答え合わせをしてもらった。その後、簡単に物理現象に関して解説を行った。(25 分間)
4. 学生全員に対し、事前に実施した確認テストとは出題順を変更したテストと理解度アンケートを実施した。(20 分間)

評価授業で用いた確認テスト及びアンケートの内容について説明する。まず、確認テストは、Fig. 2.3 と同様のものを使用して、100 点満点で採点した。アンケートも前項同様に行い、以下の Q7 について追加で質問をした。

【アンケート追加質問】

- Q 7. 簡易学習ソフトウェアは、すべての物理量の関係性を理解するのに役立ちましたか？

2.5.2 実験結果

グループ C と D の学生の物理の成績と、確認テストの結果詳細 (Table A.3) の結果をもとに C, D グループの結果の平均値を Table 2.6 に、母平均 μ に関する有意の差についての判定結果を Table 2.7 に示す。

Table 2.3 と Table 2.6 を合わせた結果より、学習ソフトウェアを用いて物理量の分類と体系化に関する授業を行った C グループが最も高い平均点であった。次いで学習ソフトウェアは使用せず物理量の分類と体系化に関する授業を行った B グループの平均点が高く、提案手法に関しては触れずに確認テストの解説のみを行った A

グループの平均が最も低い結果が得られた。また、Dグループについては、学習ソフトウェアを使った自習のため他のグループとは条件が異なるが、Aグループに比べて高い平均点が得られた。この結果に対して Table 2.4, Table 2.7 より、 μ_A と μ_B では μ_B に、 μ_A と μ_C では μ_C に、 μ_B と μ_C では μ_C に有意の差が確認できた。この結果から物理量の相関関係に関する内容に限るが、本稿で提案する物理量の分類と体系化は学習効果があり、また学習ソフトウェアを用いることで更なる効果の向上がみられることが確認できた。Dグループでの結果からは μ_A と μ_D では μ_D に有意の差が確認できたことから、学習ソフトウェアを用いることが家庭学習などの自学自習で有効なソフトウェアとなり得る可能性を示唆していると考ええる。

Table. 2.6 Average of confirmation test results conducted before and after class about Group C and D

Group	confirmation test average point		before and after difference		
	before	after	average \bar{x}	variance s^2	standard deviation s
C	3.69	62.44	58.88	577.72	24.04
D	5.75	43.44	37.75	138.60	11.77

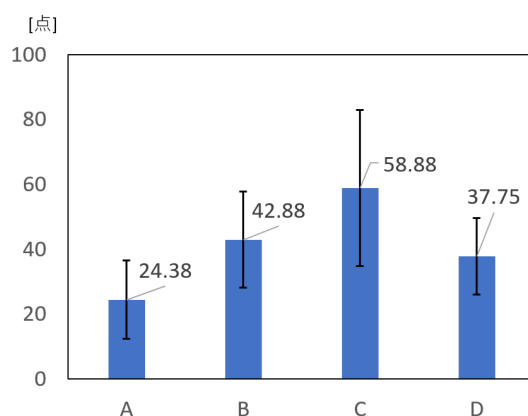


Fig. 2.12 Average of confirmation test results conducted before and after class from Group A to D(Average \pm S.D.)

Table. 2.7 Hypothesis test result of confirmation test for each group

		A and C	B and C	A and D
F test	test statistic T	3.911	2.618	1.066
	critical region R	2.403	2.403	2.403
	population variance	hetero scedastic	hetero scedastic	homo scedastic
t test	test statistic T	5.124	2.265	1.880
	critical region R	1.717	1.708	1.697
	null hypothesis H_0	rejection	rejection	rejection
	result	$\mu_A < \mu_C$	$\mu_B < \mu_C$	$\mu_A < \mu_D$

次に授業後に実施した5段階評価アンケートの各設問に対する回答値の詳細結果 (Table A.4) をもとに、同回答値の母平均 μ と比較値 $\mu_0 (= 3)$ の差における t 検定の判定結果を Table 2.8 に示す。グループ C, D では、すべての問いに対して、 $\mu > 3$ となり「役に立った」と判定された。

テスト結果を合わせて考えると、グループ C では、テスト、アンケートの結果共に理解度は高かったが、自由記述では「矢印が理解しやすく、線のつながりで何と何とが関係していて、何に変わるかが分かった」、「見やすく楽しく理解できた」という回答があった。これらの回答で、“矢印”や“線のつながり”、“見やすい”という体系化による物理量の相関関係における視覚化の効果に関して高い評価が得られた。また、「自分でソフトウェアを使用するので頭に入りやすい」、「話を聞くだけより分かりやすく良かった」という回答があり、学習ソフトウェアを使用することによる学習意欲の上昇で能動的に授業に参加出来ることが成績と理解度が上がる要因だと考えられる回答が得られた。

Table. 2.8 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group C and D

($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.753$)

		Q1	Q4	Q5	Q6	Q7
C	average \bar{x}	3.50	3.81	3.75	3.94	4.19
	variance s^2	0.40	0.73	0.90	0.60	1.10
	standard deviation s	0.63	0.86	0.95	0.77	1.05
	test statistic T	3.175	3.488	2.905	4.883	3.086
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$
D	average \bar{x}	3.63	3.81	3.75	3.94	4.19
	variance s^2	0.52	0.70	0.33	0.33	0.96
	standard deviation s	0.72	0.83	0.58	0.57	0.98
	test statistic T	3.500	3.904	5.172	6.596	4.857
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$

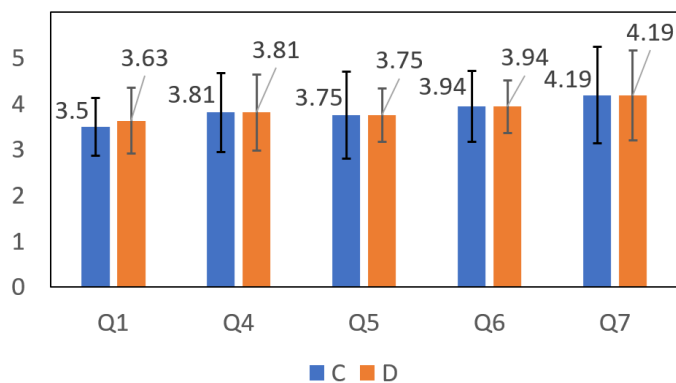


Fig. 2.13 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about Group C and D(Average \pm S.D.)

2.6 まとめ

本章では、物理量の算出方法による分類及び体系化を提案した。分類の基準として、RT (Robot Technology) を用いた物理量の感覚化という視点に注目し、物理の力学分野で学習する物理量を「センサで計測可能なもの」と「センサで計測できないもの」に分類した。この分類が学生の物理学習において、学力向上に対して有効性があるのかを検証するため、高校3年生を対象とした提案分類の学習効果に関する評価授業を実施し、物理量の相関関係に対する学力が向上していることが確認できた。しかし、理解度では学生の手ごたえは高くないというアンケート結果が得られた。

この結果を受けて、提案した分類を基に相関関係の視覚化を進め、その伝達手法として学習支援ツールを開発した。このツールは、学生が学びたい物理量についてPC上でのボタン操作により物理量の相関関係図を確認できるものである。提案した物理量の分類及び体系化、学習支援ソフトウェアが、学生の物理学習における学力の向上に有効であるかを検証した。学生を異なる条件で4つのグループに分け、前後の理解度テストと講義内容に関するアンケート調査を行った。その結果、提案する手法を用いることで、学習内容が記憶に残りやすく、学力の向上にもつながることが検証できた。

第3章 摩擦現象学習支援用RT教材による物理量可触化の有効性の検証

前述のように学生の物理学習を難しく感じる理由として考えられるのは、物理の理論式と実際の現象のつながりがイメージできておらず、学習する各物理現象に関する誤った概念の存在である。これは、学習前から学生が自分なりに構成して持っている実際の物理法則とは食い違う誤った概念である。これを授業を聞くのみで覆すのは非常に困難である。物理現象に則した正しい概念を持つために重要なことは、物理現象を正しく実感、体感することである。

そこで、学生が物理現象を目と手で体感することで課題を検証し物理理論を理解することを支援する、「物理現象の可触化」をベースとしたRT教育ツールを提案する。これは前章で提案した物理量の分類と体系化を基にして開発されており、これを用いることで物理現象を正しく実感し、正しい概念の構築を促すことが出来る。

本章では、一例として摩擦現象の学習支援に焦点を当てたRTツールを提案する。提案ツールは、センサにより直接測定可能な物理量である摩擦力 F と垂直抗力 N から摩擦係数 μ を算出し、理論式とリアルタイムの値を搭載されている液晶ディスプレイで表示する機能を持つ。学生はロボット教材を通して、物理現象を感じながら、理論式と定量的な物理量の各値を視認することができる。

学習効果の検証のため、学力的に差が無い2つのグループにRT教材の有無という異なる条件の下で実験授業を行い、提案ツールの有効性を検証した。

3.1 RT 教材による物理現象の可視・可触化

前述のように学生が物理学習で科学的概念を持つためには実験・実習授業が効果的であるが、現状では実験や報告書作成の「作業化」、学生が物理現象に興味を示さず効果が薄いことも経験的に少なくない。また、実験器具が大掛かりで常時実験は難しい。

物理学習の支援がより効果的に行える物理現象を可触化できるシステムの構築は、ロボット技術を利用した RT 教材が適していると言える。RT 教材の利点としては、学生がロボットや使用されるセンサ、モータ等に非常に興味を示すという点である。百瀬らは、理科教育における教材ロボットは、多くの学生の興味を引き、学生の向上心を引き出す教材であると報告している [62]。また、RT そのものに多くの物理現象が利用されているため、授業内容の再現が比較的容易であり、物理量の定量的な表示も可能である。このことから学生自身が頭の中で持つイメージを理論と結びつける考察がしやすくなると考えられる。また、近年センサやその他電子デバイスの小型化、低価格化も進み、一般的に RT デバイスが入手可能であり、小型のシステムを構築することが比較的容易であるという背景がある。本章では、具体的なアプリケーションの一つとして、摩擦現象の学習支援 RT 教材の開発と、その学習効果の検証について報告する。

3.2 摩擦現象学習支援用 RT 教材

3.2.1 摩擦現象の学習における物理量と計測センサ

摩擦現象を学習する際に用いる各物理量をセンサ等で直接測定可能なもの、理論式で算出し定義するもの、その両方で測定・算出可能なものに分類し、その相関関係を Fig. 3.1 に示す。物体にかかる静止摩擦力 F [N]、動摩擦力 F' [N] 及び垂直抗力 N [N] は、理論式又は圧力センサで測定可能な物理量である。静止摩擦係数 μ 、動摩擦係数 μ' は理論式からのみ算出できる値であり、センサ等で直接測定できない物理量である。

垂直抗力 N [N] は、負荷質量 m [kg] と、重力加速度 g 9.8 [m/s²] から次式により算出される。

$$N = mg \quad (3.1)$$

ここで、重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ は既知の物理量として直接測定可能なものとして取り扱う．次に摩擦係数 μ , μ' は、摩擦力 $F[\text{N}]$, $F'[\text{N}]$ と、Eq. 3.1 で得られた垂直抗力 $N[\text{N}]$ を Eq. 3.2, Eq. 3.3 に代入することにより算出できる．

$$\mu = F/N \quad (3.2)$$

$$\mu' = F'/N \quad (3.3)$$

これらの各物理量と関係式は次項で説明する教材ロボット上のディスプレイで表示される．

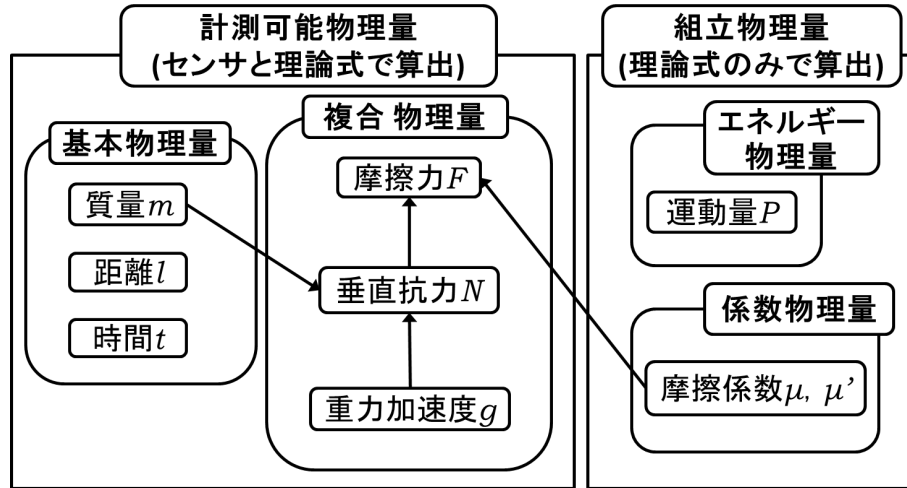


Fig. 3.1 Correlation diagram of physical quantity in frictional phenomenon

3.2.2 摩擦現象学習支援用 RT 教材とそのシステム構成

本稿で提案する摩擦現象学習支援用ロボットの外観を Fig. 3.2 に、その仕様を Table 3.1 に示す．静止摩擦力，動摩擦力（水平方向の反力），負荷質量を計測するために、それぞれロボット本体後部側面と上面に圧力センサ (FSR-402, Interlink Electronics Inc.) を配置した．また、ロボットの前方上部にはタッチパネル式ディスプレイ (SK-43PT-Pi) を設置した．システム構成図を Fig. 3.3 に示す．各圧力センサで計測した電圧値は、4 次ローパスフィルタ回路で平滑された後 CPU である Arduino Uno に入力される．その後、理論式を考慮して垂直抗力 N と摩擦力 F に別々に計算処理される．以上で求められた各物理パラメータの値及び Eq. 3.2 は一緒にディス

プレイに表示される．これにより，学生はロボット後部を水平に手で押すことで摩擦を感じ，与えた力に応じたそれぞれの物理量の値をディスプレイからリアルタイムで視覚的に確認できる．物理量及び関係式を表示するディスプレイの表示例を，Fig. 3.4 に示す．

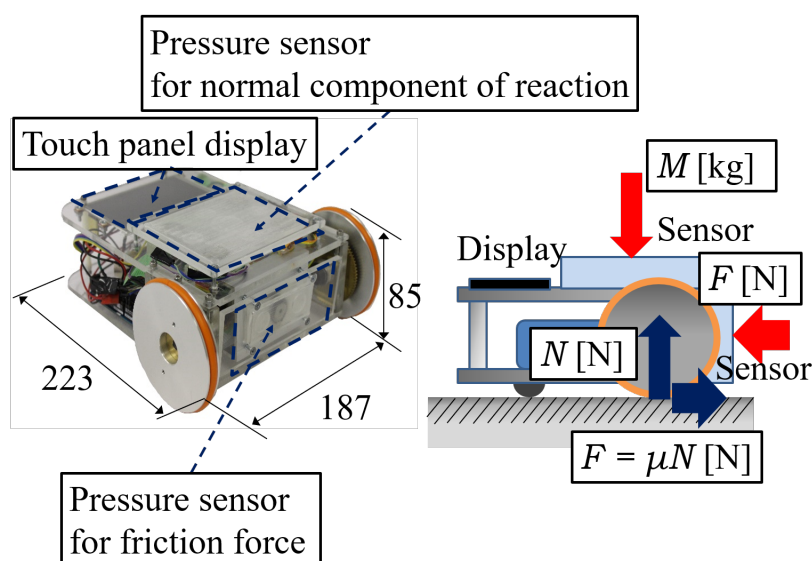


Fig. 3.2 Appearance of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon

Table. 3.1 Specification table of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon

Size [mm]	(H)85 × (W)187 × (D)223
Diameter of wheel [mm]	85
Weight [kg]	1.77
Pressure sensor	FSR-402
Micro computer	Arduino Uno
Motor	RD0-29BMA
Motor driver	TB6612FNG
Touch panel display	SK-43PT-Pi

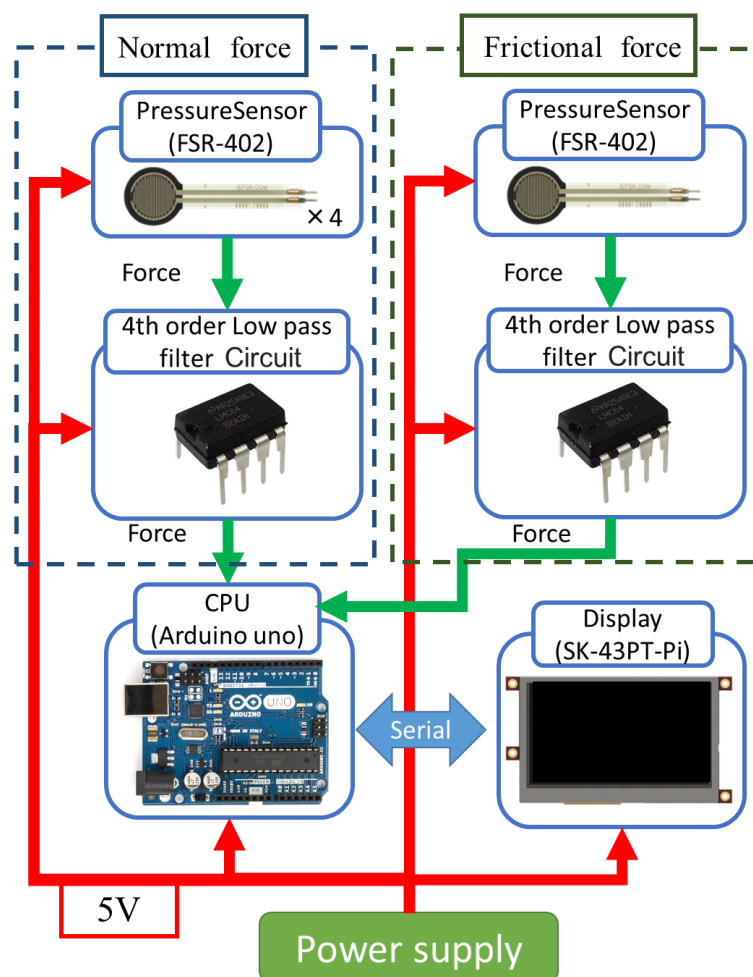


Fig. 3.3 System Configuration of an RT educational tool to support learning frictional phenomenon

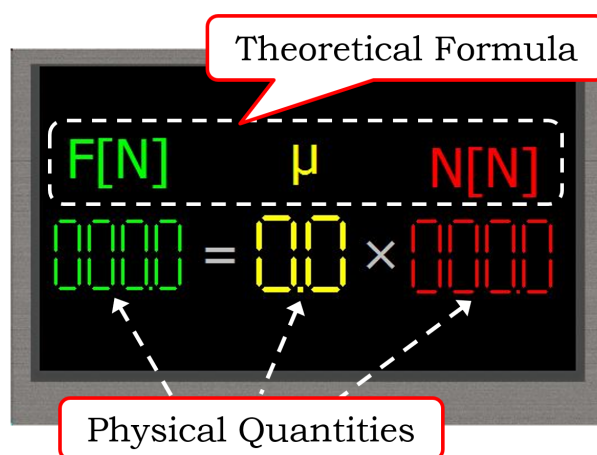


Fig. 3.4 Display example of an RT educational tool

3.3 摩擦現象学習支援用 RT 教材の評価

3.3.1 評価授業概要

摩擦現象学習支援用 RT 教材の効果を検証する為に開発した教材を用いて授業を実施した。検証方法としては、授業や教材に関するアンケートと RT 教材を使用した授業の前後で授業内容の確認テストを実施し、学習内容の理解や知識の定着に効果があったかを調べた。授業に参加した学生は、「物理基礎」の授業において摩擦現象を既に学習済みの高校生 36 名で、18 名ずつの 2 グループ (A, B) に分けた。グループ分けは、事前学力や知識の量に偏りがないように、「物理基礎」の成績で平均値が各グループ間で ± 0.1 点となるようにした。各グループに対して提案 RT 教材の使用有無を条件として摩擦現象に関する授業を実施した。RT 教材を使用した実験授業の風景を Fig. 3.5 に示す。授業では、0.5 kg, 2 kg の 2 種類のおもりを準備して負荷質量による摩擦力の違いを考察し、また、カーペット、ベニヤ板、ゴムの 3 種類の床材を準備して摩擦係数による摩擦力の違いを考察した。学生は、それぞれの条件においてディスプレイに表示された式を見ながらロボットを手で水平方向に押すことによって摩擦力を感じながら、摩擦力、垂直抗力と摩擦係数の関係を考察した。また、水平に押す力を徐々に増し、ロボットが動き出す瞬間を手による感覚と表示された数値を観察することで、静止摩擦から動摩擦への変化について考察するよう促した。評価実験授業の手順を以下に示す。

【評価授業手順】

1. 学生全員に対して摩擦現象に対する確認テストを実施した (15 分).
2. テスト終了後に 2 つのグループに対して異なる条件で授業を実施した.
3. グループ A に対し, RT 教材を使用せずに高校物理で学習する静止摩擦力, 動摩擦力についての座学を実施した (25 分).
4. グループ B に対し, RT 教材を使用し学習者が摩擦現象を体感し, 変化する物理量と関係式をディスプレイで確認できる授業を実施した (25 分).
5. 授業終了後, A, B 両グループに対して, (1) で行ったものと同じ形式の確認テストを実施し, アンケートを実施した (15 分).

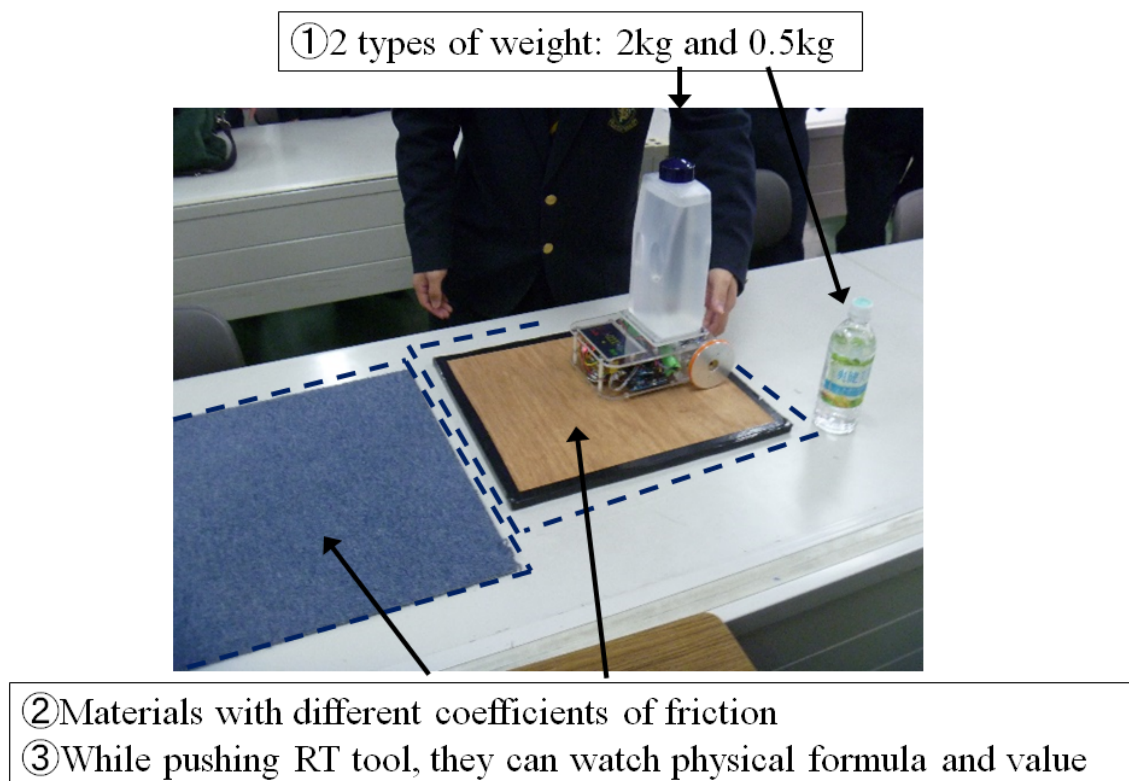


Fig. 3.5 Snap shot of the class of frictional phenomenon using RT educational tool

3.3.2 確認テストとアンケート内容

確認テストの内容を以下に示す.

【問題】

質量が 10 kg の物体が水平な台の上に置かれている. 静止摩擦係数は 0.50, 動摩擦係数は 0.10 である. 重力加速度の大きさを 9.8 m/s^2 とする [41].

Q1. このとき最大静止摩擦力の大きさを求めよ.

Q2. 30 N の力を水平方向に加えたときの摩擦力を求めよ.

Q3. 50 N の力を加えたときの摩擦力を求めよ.

Q1 は最大静止摩擦力, Q2 は静止摩擦力, Q3 は動摩擦力を求める問題である. 採点は各問に対して, 単位が書けていれば 1 点, 摩擦係数等の物理量が書けていれば 2 点, 式が書けていれば 5 点, 計算間違いなどは 7 点, 完答出来ていれば 10 点という基準で行い, 合計を 100 点満点となるように換算した. アンケートは RT 教材に関する学習者の評価を確認するためグループ B に対して全 7 問で行った. 各質問において「大変できるようになった (5 点)」, 「できるようになった (4 点)」, 「ふつう (3 点)」, 「分からなかった (2 点)」, 「全然分からなかった (1 点)」の 5 段階評価を行った. 5 段階評価だけでは答え難い質問に対しては自由記述にすることで被験者である学生の考えを可能な限り読み取れるようにした. 以下にアンケート内容を示す.

【アンケート内容】

Q1. この授業を通して, 各物理量 (垂直抗力・摩擦係数・摩擦力) の相関関係 (Eq. 3.2) は理解, イメージできるようになりましたか?

Q2. なぜそのように思いましたか? 理由をお書きください. (自由記述)

Q3. この授業は, 摩擦力 $F[\text{N}]$ をイメージし, 理解するのに役立ちましたか?

Q4. この授業は, 垂直抗力 $N[\text{N}]$ をイメージし, 理解するのに役立ちましたか?

Q5. この授業は, 静止摩擦係数 μ , 動摩擦係数 μ' をイメージし, 理解するのに役立ちましたか?

Q6. ディスプレイで関係式や物理量の数値の表示は摩擦現象を理解するのに役立ちましたか？

Q7. ロボット教材を使用した授業はどのように感じましたか？(自由記述)

3.3.3 実験結果

授業前後の確認テストの得点とアンケートの各設問に対する5段階評価の回答値を基に、(2.3.3)章で示した方法でデータ分析を行った。事前、事後の確認テストの詳細結果 (Table A.5, Table A.6) について、それら各問いの値やそれらの前後差分の平均値等についての結果を Table 3.2 に示す。また、その結果をもとに授業後にどれだけ点数が変化したのかについて、各グループの母平均 μ に関する有意の差についての判定を行い、その結果を Table 3.3 に示す。

Table 3.2 から、RT 教材を用いて摩擦現象に関する授業を受けたグループ B の平均点が比較すると高い点数となっていることが分かる。その結果について行った有意差の判定では Table 3.3 の μ_A と μ_B (total) で、 μ_B に有意が確認できた。この結果から摩擦現象に関する内容に限るが、本章で提案する RT 教材を用いた授業は通常の講義形式の授業に比べて学習効果があることが確認できた。

ここで、提案する RT 教材がどのような点で学生に対して効果的であったのかを各問の結果と解答から考察する。まず、Q1 は最大静止摩擦力 F に関する問いである。事前テストで、学生の間違いが多かったのは、物体の質量 m と垂直抗力 N の関係が理解できていないことと、関係式 Eq. 3.2 が身についていないため白紙解答となっていることが目立った。これに対して Table 3.3 より母平均 $\mu_{A1} < \mu_{B1}$ となり RT 教材の有意の差が確認できる。これはグループ A に対して B の方が事後の答案で関係式がよく定着している事が要因であるのがわかる。グループ A のアンケートの自由記述では「黒板で文字だけではイメージしにくい」というものがあり、グループ B の RT 教材に関しては「各物理量を実際に体験し、視覚的・感覚的にわかりやすい」という回答もあり触覚での摩擦力や質量、重さの体感と、ディスプレイにより視覚的に関係式を確認しながら実験出来ることが知識の定着に効果的であったと考えられる。

Q2 は静止摩擦力 F' に関する問であり、加える力が最大静止摩擦力 F_{max} 以下であるので、物体は静止したままで、加える力と静止摩擦力 F が等しくなるということである。不正解の原因を考察するために授業前に学生に対して「このように力を加えた場合、物体はどのように振る舞うか」という質問をしたところ約半数の学生は、

「動く」と回答した。これは、「力を加えると物体は移動するものだ」という物体の運動に関する誤概念であり、これが不正解の原因となりえると考ええる。Table 3.3の結果では母平均 $\mu_{A2} < \mu_{B2}$ となり RT 教材の有意性が確認できた。これは RT 教材を使用したことで実際に自らの手で摩擦力を加えて物体の運動の様子を確認しながら、摩擦力の値をディスプレイで確認できることが可能となるからであると考ええる。この問題で、不正解から正解に転じた学生の自由記述でも「数値をみながら実験できてイメージし易かった」との回答があり、「力を加える」という「原因」が「即座に運動をもたらず」という誤概念を RT 教材により改善できた学生がいることが確認できた。

Q3 は動摩擦力 F に関する問で、 $\mu_{A3} = \mu_{B3}$ となり有意の差は見られなかった。自由記述では RT 教材に関して「動き出すとロボットが曲がってしまい、ディスプレイの値は急に変化するので見ただけでは分かりにくい」という回答があった。動摩擦力 F と運動の関係に関しては、観察が難しい仕様になっていることが考えられる。今後は F (力)- t (時間) グラフを表示する機能を追加する等の改善を加えることで学習効果が向上すると思われる。

Table. 3.2 Confirmation test results conducted before and after class about frictional phenomenon

Group	confirmation test average point			before and after difference		
	Question	before	after	average \bar{x}	variance s^2	standard deviation s
A	total	21.33	30.50	9.27	559.74	23.66
	Q1	14.17	17.67	3.50	356.38	18.88
	Q2	3.27	3.00	-0.28	20.09	4.48
	Q3	3.56	9.67	6.11	91.87	9.58
B	total	15.89	45.22	29.33	587.06	24.22
	Q1	7.83	23.39	15.56	316.97	17.80
	Q2	4.61	9.50	4.89	81.63	9.04
	Q3	3.44	12.33	8.89	59.63	7.72

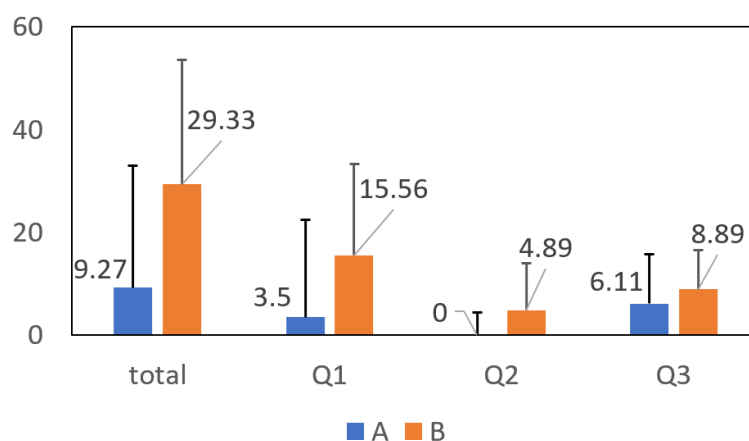


Fig. 3.6 Confirmation test results conducted before and after class about frictional phenomenon(Average±S.D.)

Table. 3.3 Hypothesis test result of confirmation test about frictional phenomenon

		A and B			
		total	Q1	Q2	Q3
F test	test statistic T	1.049	1.124	4.062	1.541
	critical region R	2.271	2.271	2.271	2.271
	population variance	homo scedastic	homo scedastic	hetero scedastic	homo scedastic
t test	test statistic T	2.513	1.971	2.173	0.957
	critical region R	1.691	1.691	1.708	1.691
	null hypothesis H_0	rejection	rejection	rejection	do not rejection
	result	$\mu_A < \mu_B$	$\mu_{A1} < \mu_{B1}$	$\mu_{A2} < \mu_{B2}$	$\mu_{A3} = \mu_{B3}$

授業後に実施した5段階評価アンケートの各設問の結果で得られた回答値の詳細 (Table A.7, Table A.8) を基に, そこで, 母平均 μ と「普通 (3点)」を比較値 $\mu_0 (= 3)$ として, その差の t 検定の判定結果を Table 3.4 に示す. グループ A, B ともに, $\mu > 3$ となり「役に立った」という結果が得られた. テスト結果を合わせて考えると, グループ A の学生は授業が理解に役立つという手応えは得られているが, 学力の向上

には至っていない。つまり実感の伴わない知識は定着し難い結果が得られた。グループBの学生はRT教材が理解に対して役立つという手応えが得られ、学力向上への効果も認められた。自由記述では、「文字で説明されるよりロボットを使うことで簡単にイメージ出来て記憶に残りやすい」、「講義形式より楽しく思えた」などRT教材で体感することにより効果的に学力が向上するという回答が学生から得られた。また、ディスプレイによる視覚効果に対する学生の評価が高く、「リアルタイムで数値が出され体感出来て、それを見ながら実験したからイメージし易かった」という回答もあり、Table 3.4のアンケートQ6の結果でも平均 $\bar{x} = 4.17$ という高い値が得られている。これらのことから提案するRT教材の触覚的な体感の効果とディスプレイの数値や実際の現象を見るという視覚的な刺激が、物理の学習者にとって学習効果があるということが確認できた。また、教材ロボットが親しみやすいと読み取れるアンケート結果から提案するRT教材が有用であることがわかる結果が得られた。

Table. 3.4 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about frictional phenomenon ($\mu_0 = 3$, critical region $R = 1.740$)

		Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
A	average \bar{x}	4.00	3.83	3.56	3.78	
	variance s^2	0.82	1.09	1.20	1.48	
	standard deviation s	0.91	1.04	1.10	1.21	
	test statistic T	4.68	3.39	2.15	2.72	
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	
B	average \bar{x}	3.89	4.22	3.94	4.06	4.17
	variance s^2	0.69	0.42	0.64	0.88	0.97
	standard deviation s	0.83	0.65	0.80	0.94	0.99
	test statistic T	4.53	8.02	4.99	4.78	5.02
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$

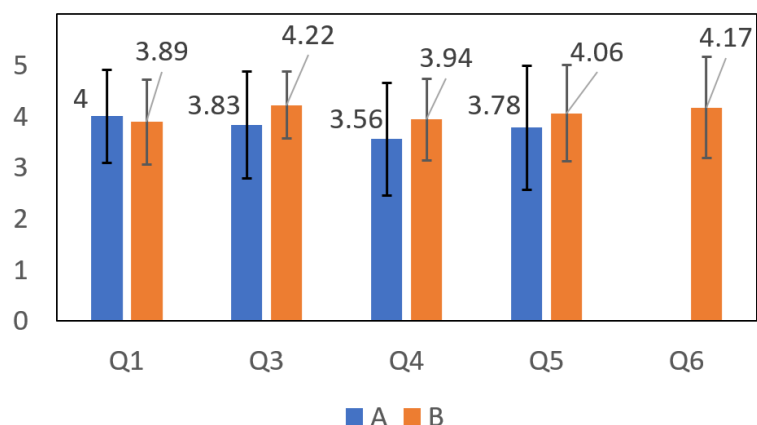


Fig. 3.7 Questionnaire results and hypothesis test results conducted after class about frictional phenomenon(Average \pm S.D.)

3.4 まとめ

本章では，高等学校の物理学習をより効率的に支援する物理現象と理論式が体感可能な RT 教材を提案し，具体的な例として，摩擦現象の学習支援に特化した触覚と視覚に働く RT 教材を製作し，高校生を対象とした評価授業を実施した．RT 教材は，摩擦力 F と垂直抗力 N を学生が触覚で体験できる仕組みと，ディスプレイにより物理量や関係式が視覚で確認できる仕組みが組み込まれている．提案教材を用い，2 グループに対して RT 教材の使用有無による評価授業を実施した．その結果，RT 教材を使用したグループ B が理解度，学力ともに向上し，統計的に有意性が確認され，摩擦現象に限られることではあるが，学力の向上につながることが検証できた．

次章以降では，センサシステムやディスプレイの表示などインターフェース部分等で設計を進め，摩擦現象以外のテーマに対して教材開発と評価実験を行い結果を報告する．

第4章 高校物理学学習支援用RT教材の設計と開発

前章までは、高校物理において学習する「物理量の分類と体系化」と、摩擦現象学習支援用RT教材を用いて、「物理現象の可触化」についての学習効果の有効性を示した。本章では、摩擦現象だけでなく、高校物理の力学分野で学習する物理現象に広く対応可能なセンサを備えた物理学学習支援用RT教材の教材ロボットについての設計と開発について示す。このRT教材を使用することにより、学生は高校で学習する物理量や理論式をそこに搭載されているディスプレイによって見ながら、教材ロボットに触れることで五感を使って物理現象を感じることができる。このRT教材は、前述した物理量の分類と体系化に基づいてセンサシステムを設計しており、Table 2.2に示す高校物理力学分野で学習する物理量を計測、算出可能にするのに十分な計測センサを搭載している。開発したRT教材ロボットの設計検証を行うため、いくつかの物理現象において計測実験を行い、各物理量を計測した。

4.1 教材ロボットの仕様と設計

4.1.1 RT 教材のコンセプト

提案する RT 教材は、学生が高校物理学習における物理現象を RT を用いて視覚・触覚等の五感で体感することで関連する物理理論を効果的に学習理解することを支援する教材を目指すものである。そのために、ロボットにはセンサ技術、通信技術を用いて各物理量をリアルタイムで計測し、その結果を数値化することで目視で確認できるようにする。それと同時に、係数等の物理量も併せて理論的に算出して、計測値と同時に表示できるようにする。そして、学習する物理現象に関連する物理量の値や理論式は搭載するディスプレイに全て表示し、現象の変化に対応した、それら物理量の値の変化を目視確認できる仕組みとする。このロボット教材と合わせて物理現象とリンクした考察課題を用意することで、物理現象の理解と同時に学力向上も期待できるのである。

上記に述べた提案 RT 教材のコンセプトを反映した物理学習支援用 RT 教材システムの概念図を Fig. 4.1 に示す。このシステムでは、ロボットによって再現された物理現象について、それに関連する各物理量をセンサで計測し、マイコン等を用いて定量的に数値化する。その情報をロボットに搭載したディスプレイ等の表示機器でモニタリングできるようにする。なお、同概念図は、計測対象の物理量を変えることで他の物理現象の学習にも拡張できるように、Table 2.2 に示す高校物理で学習する物理量に対応可能とするために必要となるセンサを搭載する。

また、物理の学習阻害の原因となる誤概念を正すためには、正しい概念を実感と共に学習することが学習効果を高めるので、RT 教材は日常的に授業で使用可能なものとするのが望ましい。そのためには、教員に対する授業で使用しやすくなるような配慮が必要であると考え。コンセプトとしては、「システムが複雑でないこと」、そして「実現可能な価格であること」と考える。複数の教員にアンケートを取ったところ、授業で使用する際に RT 教材の実現可能な価格は、という問いに関しては「3~5 万円」という回答が得られた。目標としては、5 万円以内の材料費を目標とする。

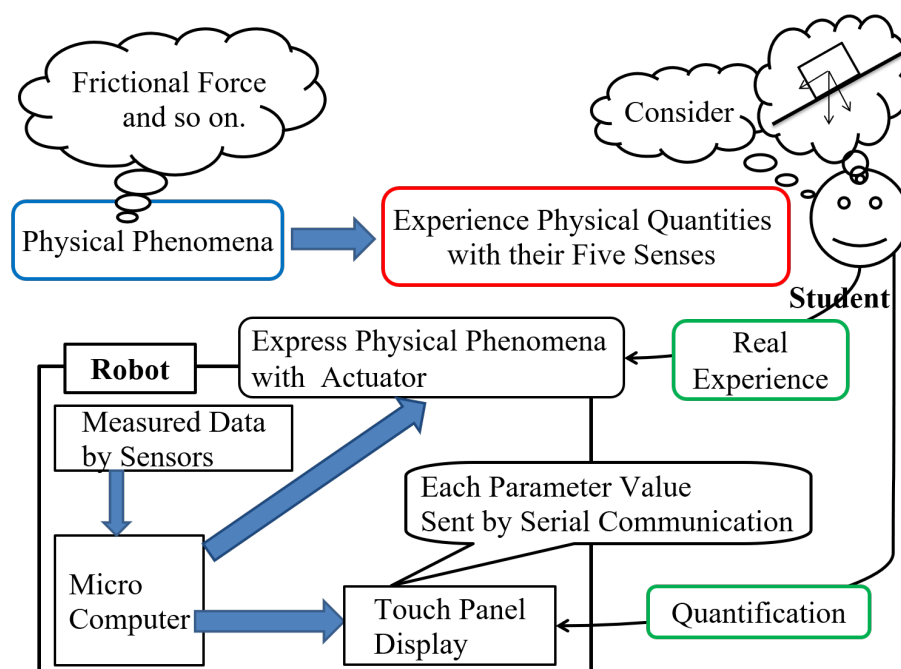


Fig. 4.1 The concept of an RT educational tool to support learning physics in high school curriculum

4.1.2 計測センサ群の選定について

本章で提案するロボット教材は，高校物理の力学分野で学習する物理量を過不足なく計測，算出することを考えて設計を進める．ここで，必要以上のセンサをロボットに搭載した場合，システムの構成が複雑なものとなってしまう，授業で使用する際の簡便さの妨げになり，また，多くの費用もかかりロボット自体の価格が高価になる原因になる．これはRT教材のコンセプトに反することとなる．シンプルでできる限り安価な構成でなおかつ，過不足なく物理量を計測可能とするセンサの選定が必要となる．

Table 2.2 で示す物理量の分類と Fig. 2.7 で示す体系化相関図から，学習する物理量はすべてが計測できるものではなく，組み合わせで算出する物理量も存在する．つまり，組立物理量に分類される，エネルギー物理量と係数物理量は，計測可能物理量から算出される物理量であり，また，計測物理量の中でも複合物理量は，直接計測することも可能であり，また，基本物理量とその他の物理量の組み合わせで算出

ことも可能である。よってロボット教材に搭載すべきセンサは、前述の物理量の分類、体系化から、計測可能物理量に着目して選定を行い、シンプルな構成とするために、それらを計測できる最低限の計測センサ個数を搭載し、すべての物理量を表すことを考える。

4.1.3 計測センサと学習する物理現象、物理量の関係

計測可能物理量とそれに関連する物理現象について、それぞれの物理量の値を計測する際に、関係するセンサについて考えて、どのようなセンサが必要になるのかを考える。

基本物理量である、時間 $t[s]$ 、質量 $m[kg]$ 、距離 $l[m]$ について考える。これらの値は、各物理量の基本となり直接計測することにより得られる値であり、対応する計測センサをそれぞれ考える。時間 $t[s]$ は、教材ロボットの制御用マイクロコンピュータに内蔵されているタイマカウンタやソフトウェア的に制御するカウンタを用いて、物理現象の変化についてその時間間隔 $t[s]$ を計測する。質量 $m[kg]$ は、学習する物理現象を考える際に基本は教材ロボットの自重を考えることとなる。学習を進めるにあたり、質量の変化を考える際に、教材ロボットの上部におもり等の荷重を載せて、その荷重による変化と現象及び、その他の物理量の関係性を学習することとなる。よって質量 m の計測は、力センサを教材ロボットの上部に設置して、鉛直方向に加えたおもりの荷重を計測する。距離 $l[m]$ は、距離センサによって教材ロボットと対象物との距離を計測する。また、ロータリーエンコーダを用いて、車輪の回転数 $n[-]$ とタイマカウンタで計測した時間 $t[s]$ から教材ロボットの移動距離 $l[m]$ を計測することも可能である。このように距離 l の計測は、光学式センサや超音波式センサの反射を利用したものと、ロータリーエンコーダを用いて車輪の回転数 n を利用したものが考えられる。前者は、対象物までの直線距離 l を計測するもので、並進運動に関する物理現象での距離 l の計測や相対的なロボットの位置の検出を行う。ロータリーエンコーダでは車輪の回転数 n によって移動距離 l を計測するため、並進運動だけでなく、回転運動に関する物理現象での移動距離 $l[m]$ 、速度 $v[m/s]$ を計測することも可能である。

その他、ロータリーエンコーダでは、回転数 $n[-]$ の計測とそれをもとに回転運動における周期 $T[s]$ 、周波数 $f[Hz]$ や、弧度法における弧の長さ $l[m]$ と回転角度 $\theta[rad]$ 、回転角速度 $\omega[rad/s]$ についてを計測することができる。また、教材ロボットの水平方向の運動やつりあい等を考えて、運動状態の変化が起こる際に加わる、その変化の要因となる力 $F[N]$ を、力センサを用いて計測する。この4つのセンサは、物理量

の分類における基本物理量の計測を主に行うので，RT 教材の物理現象における基本情報を知ることができるセンサである。

加速度センサは，加速度 $a[\text{m/s}^2]$ を計測するものであるが，運動状態によっての意味合いが異なる計測データが取得される。静止や等速運動時には，常に鉛直下向きに計測される重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ が計測される。また，並進の加速度運動の際に計測できる並進加速度 a ，回転運動の際に計測できる遠心加速度 a ，接線加速度 a である。直交 3 軸の加速度センサの計測値によりロボットの傾斜角度 $\theta[\text{rad}]$ を得ることもできる。高校物理で学習する場合には慣性の法則からの流れで一括りに加速度 a として学習するが，これが物理を理解する際に反対に理解を難しくしている要因であるとも考えられる。RT 教材によって運動状態とその際にどのように加速度 a が働いているのかを分類，表示して，視覚，触覚によって学習することができれば，それは大いに学習効果が期待できる。また，角速度センサは，角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ を計測することにより回転運動における姿勢角 $\theta[\text{rad}]$ や移動距離から算出し，相対位置 $l[\text{m}]$ を計測することができる。このように加速度センサと角速度センサは，運動の分類から運動の状態を知ることができるセンサであり，物理現象を理解するにあたり非常に重要なセンサであることが分かる。

以上から，この高校物理の力学分野に関するロボット教材を構成するために必要となるセンサは，タイマカウンタ，力センサ，距離センサ，ロータリーエンコーダ，加速度センサ，角速度センサが考えられる。

4.1.4 計測センサ群の決定

Table 2.2 の I と II で示した，計測可能物理量について直接計測するために必要なセンサと複合物理量に関しての理論公式を基に，学習する物理量の値を取得するために必要となる計測センサの一覧表を Table 4.1 に示す。ここで記載されている数字は，それぞれの物理量を計測するために要するセンサの個数を示している。数字に括弧印のついたものは，その物理量を直接計測するセンサを示している。数字のみで括弧印のついていないものは，理論公式により算出する際に必要となる物理量を計測するセンサを示している。その際のロボットの仕様において，最少構成は Table 4.1 より，力センサを 2 個，その他のセンサを各 1 個という構成になることが分かる。このようにセンサ仕様を最少の構成とすることで，システムがシンプルなものとなり，使用の平易さと，価格の低減が期待できると考える。

Table. 4.1 Number of sensors for measuring physical quantities in high school curriculum

Name	Symbol	Timer counter	Force sensor	Distance sensor	Rotary encoder	Acceleration sensor	Angular velocity sensor
Time	$t[\text{s}]$	(1)					
Mass	$m[\text{kg}]$		(1)				
Length	$l[\text{m}]$			(1)	1		
Velocity	$v[\text{m/s}]$	1			(1)	1	
Acceleration	$a[\text{m/s}^2]$	1			1	(1)	
Angle	$\theta[\text{rad}]$	1			(1)		1
Angular Velocity	$\omega[\text{rad/s}]$	1			1		(1)
Period	$T[\text{s}]$	(1)					
Frequency	$f [\text{Hz}]$	1					
Force	$F[\text{N}]$		(1)			1	
Centrifugal Force	$F[\text{N}]$	1	(1)	1	1	1	1
Elastic Force	$F[\text{N}]$		(1)	1	1		
Frictional Force	$F[\text{N}]$		(1)+1				
Normal Force	$N[\text{N}]$		(1)				
Torque	$M[\text{Nm}]$		(1)	1	1		
total number of sensors		1	2	1	1	1	1

4.1.5 教材ロボットの仕様構成

教材ロボットの全体形状を Fig. 4.2, センサの配置図を Fig. 4.3 に示し, その仕様を Table 4.2 に示す. 物理量, 及び物理現象の視覚での体感を実現するためにタッチパネルディスプレイをロボットの上面の目立つ箇所に配置している. Fig. 4.4 のようなディスプレイ上のメニュー画面のタッチパネルを操作して学習内容の選択操作を行うことが出来る. 画面上のボタンにタッチすると画面が切り替わり, Fig. 3.4 のように学習したい公式やその時に学ぶ物理量のセンサ計測値が表示される.

ロボットの大きさは, 学生が学習机の上で取り扱いやすい大きさという要求に応え (H)85 mm × (W)187 mm × (D)223 mm とした. 質量は 1.77kg であり, 片手でも十分扱うことができると考える. 運動の安定性と回転運動への対応が容易なため車輪型を採用した. 駆動輪は左右 2 輪で独立したモータで駆動する.

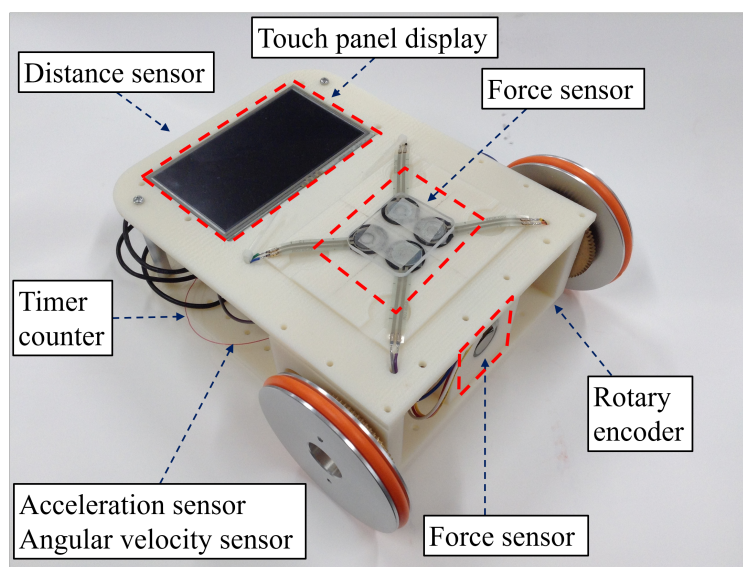


Fig. 4.2 The appearance of an RT educational tool for physics in high school curriculum

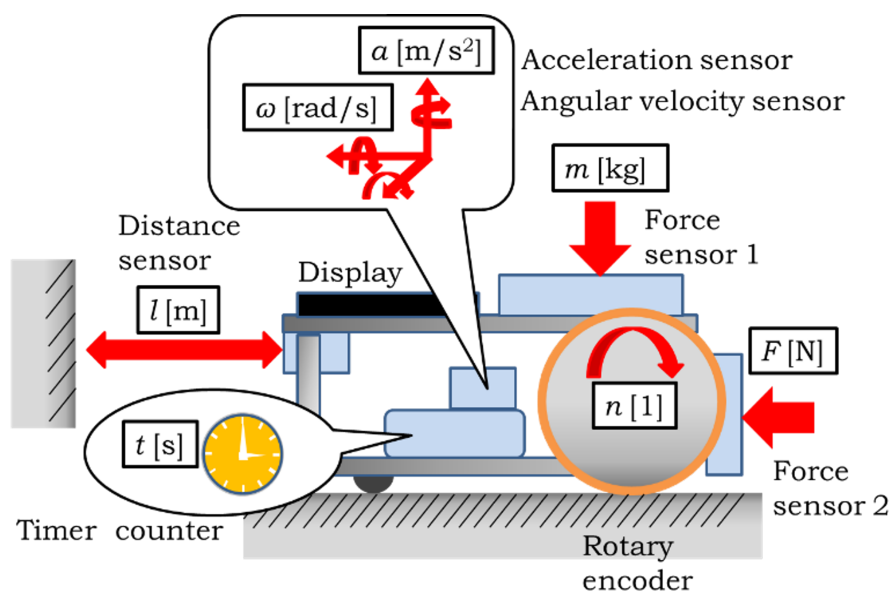


Fig. 4.3 The sensor system of an RT educational tool for physics in high school curriculum

Table. 4.2 The specification of RT educational tool for physics in high school curriculum

Size [mm]	(H)85 × (W)187 × (D)223
Diameter of tire [mm]	85
Mass [kg]	1.77
Force sensor	FSR-402
Acceleration sensor	MPU-9250
Angular velocity sensor	
Distance sensor	GP2Y0A21YK
Micro computer with timer counter	Arduino MEGA
Motor with rotary encoder	RD0-29BMA
Motor driver	TB6612FNG
touch panel display	SK-43PT-Pi

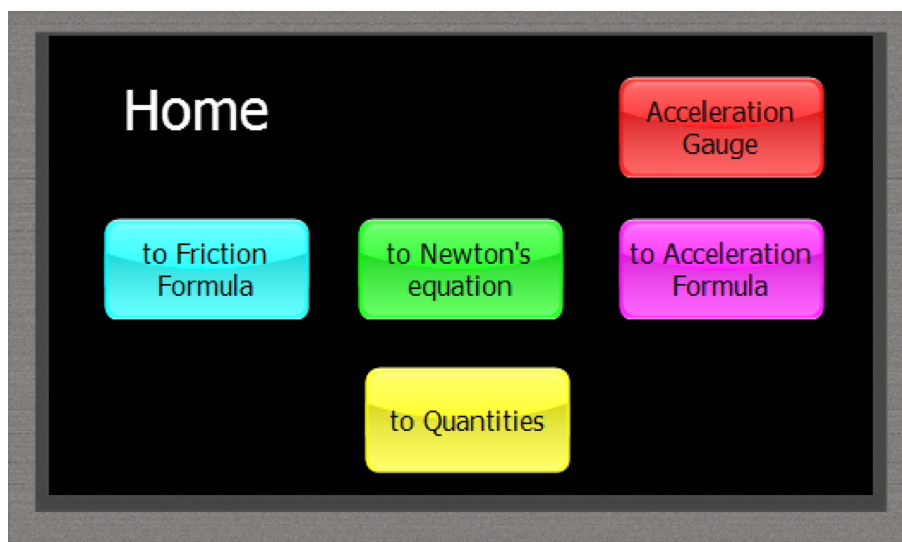


Fig. 4.4 A touch panel menu screen of RT educational tool for physics

システム構成図を Fig. 4.5 に示す．ロータリーエンコーダは各左右のモータからの出力を PIC マイコンで計測し，I²C 通信でマスターである Arduino へデータ送信する．加速度センサ，角速度センサに関しても同様に I²C 通信でデータ送信する．過重負荷の変化を計測する力センサを上面と側面に配置し，距離センサを前面に配置して，それぞれのセンサのアナログ電圧出力端子を Arduino の各アナログ入力ポートと接続した．

また，Fig. 4.6 のようにロボットに搭載されているすべてのセンサの値を表示して，学生が実験を実施中にリアルタイムに各物理量の変化を定量的に視覚で確認し，ロボットに触れながら学習を行うことも可能である．この RT 教材の操作は，ユーザインターフェースとしてタッチパネルを採用しているために直感的な操作が可能であり，また起動は電源を ON にするだけでよく特別な操作は必要ない．電源にはモバイルバッテリーを使用しているため ON/OFF や充電にも特別な操作方法は存在しない．この RT 教材の使用者は，コンピュータ，電子回路，プログラミングの熟練した技術やマイクロコンピュータに関する深い知識も必要ない．よってこの RT 教材を授業で使用する際には，教員及び学生には特別なスキルを必要としない．また，Table 4.2 で示す構成でトータルコストとしては，48,000 円程度であった．

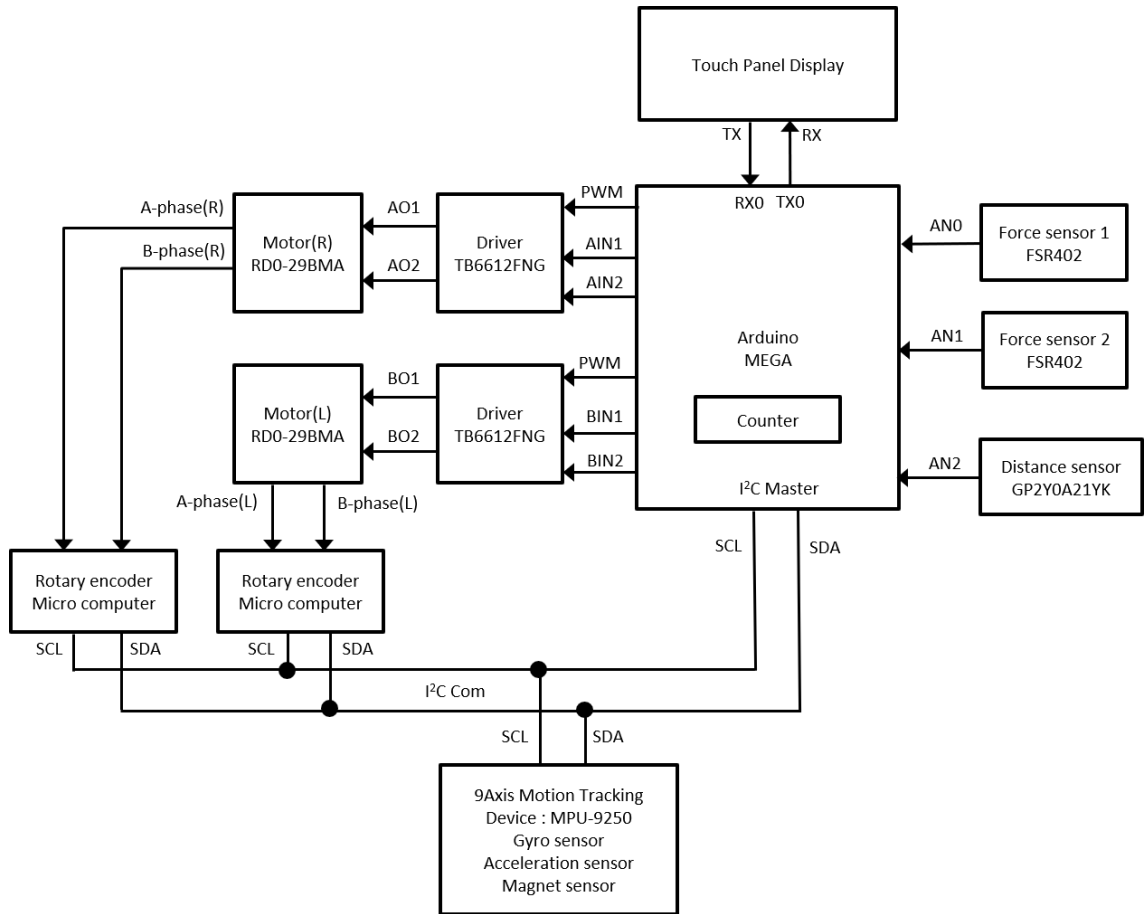


Fig. 4.5 The system Configuration of RT educational tool for physics

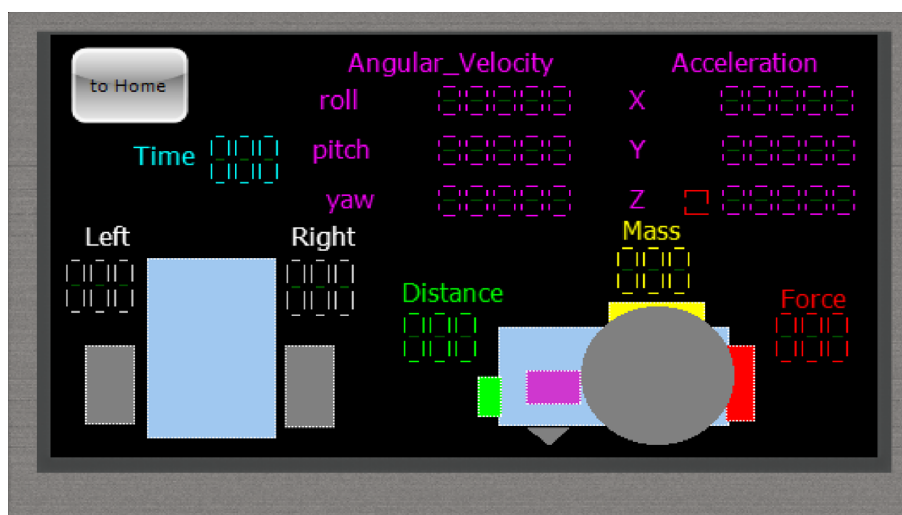


Fig. 4.6 A screen that can monitor the values of all sensors

4.2 教材ロボットの設計検証

提案する RT 教材について前項において開発の詳細を示した。本項では、RT 教材システムとして高校物理で学ぶ各物理量の計測を行い、性能的に授業で行う実験に使用可能であることを検証する。方法は、高校物理で学習する代表的な物理現象に関していくつか物理量の計測実験を実施し、その計測結果において各センサが示した値を理論と照らし合わせて妥当性があるかを検証する。物理量の分類で示した計測可能物理量に関して、RT 教材システムを使用した物理実験において計測可能であることを検証する。

4.2.1 検証実験方法

いくつかの物理現象について、この RT 教材システムを用いて計測実験を行い、得られたデータを分析してその妥当性の検証を行う。高校物理で学習する運動の軌道と力の関係は直線、放物線、円の 3 つの形に集約される。実験を実施する物理現象の選定に関しては、これらの運動で代表的なものとして、直線運動、投げ上げ運動を行った。そして、これらの実験を行った際の各センサで取得されるデータを用いて分析を行う。

データ取得について，サンプリング周波数は100Hzとした．これは，物理基礎と物理の教科書 [41][42] で高校物理で従来行う実験として記載されている内容を調査したところ，単位時間あたりのデータを取得する場合に，交流電源を用いたタイマによってデータプロットが行われていた．つまりサンプリング周波数は商用交流電源の50, 60Hzで実験が行われているからである．提案のRT教材システムでは，それ以上の周波数であれば高校物理の実験で 사용할ことが出来ると考えた．ここでは，RT教材の仕様や学習内容等を鑑みて100Hzが妥当であると考えて決定した．計測データは，Arduino マイコンをPCとケーブルで接続して，マイコン側で一定間隔(100Hz)となるようにデータをシリアル出力し，PC側でシリアルモニタによって取得した．ケーブルが実験中に運動状態に影響を与えて実験に支障を来さないように注意を払った．

4.2.2 直線運動

直線運動は，高校の物理基礎で最初に学習する運動についての内容である [41]．これは，運動についての基本的な物理現象であり，同時にこの概念は，気体の分子運動や電界中の電子の振る舞い等，その他の物理現象においても応用される物理概念を含んでいる重要項目である．学習のポイントは，時間 t ，速さ v ，加速度 a ，及び距離 l の物理量における相関関係とその関係性を表したグラフの理解である．

計測システムと実験方法についてそれぞれ Fig. 4.7 と Fig. 4.8 に示す．本実験では，左右のモータ共に一定出力で前進させ，教材ロボットの進行方向前方に取り付けた距離センサによって，教材ロボットが前方の壁を検知して壁から0.3mの距離に達したときに，モータ出力を0にして減速しながら教材ロボットが停止する．この運動は，壁を検出するまでは加速しながら前進し，検出後は減速して壁の手前で停止する．

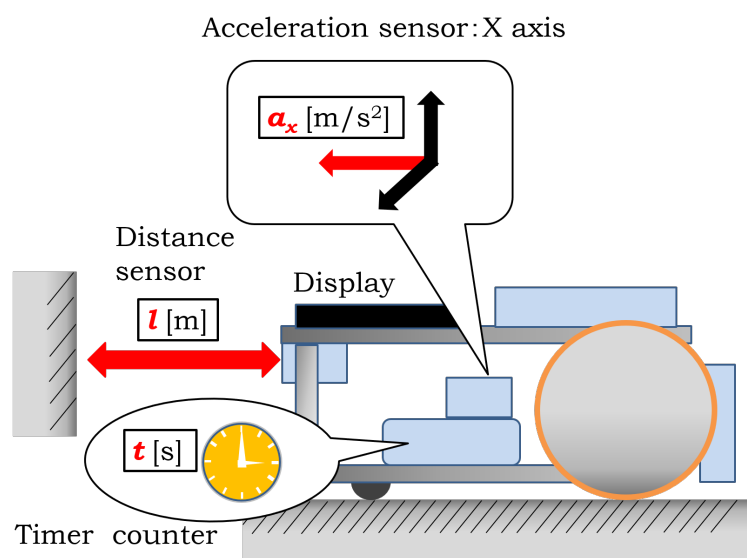


Fig. 4.7 The measurement system for linear motion of uniform acceleration

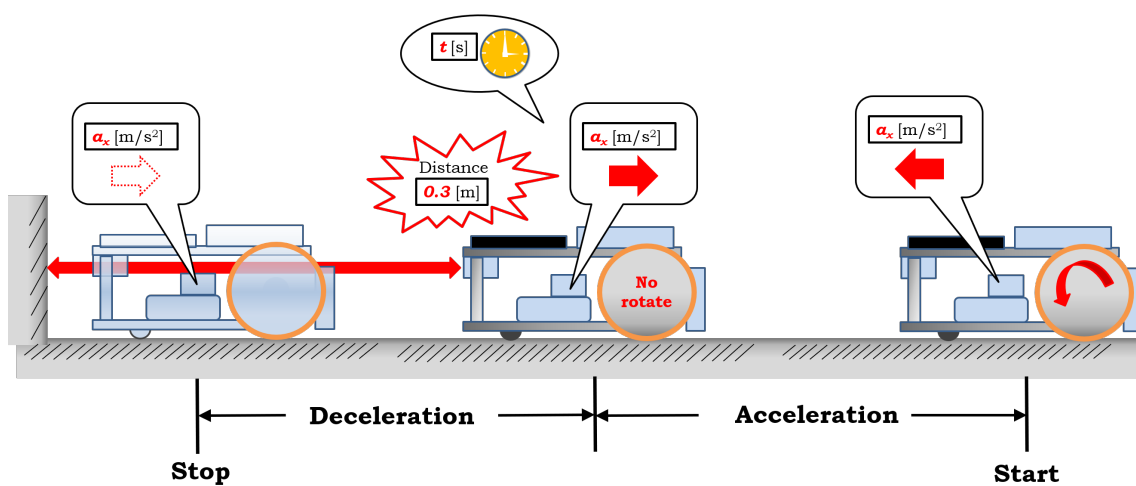


Fig. 4.8 An experiment for linear motion of uniform acceleration

計測したデータについて、加速度センサを用いて進行方向の並進加速度 a_x 、距離センサを用いて教材ロボットと壁との距離 l とその時の時間 t について計測した結果の考察を行う。ここで、得られた距離 l と時間 t のデータから、

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (4.1)$$

によって、速さ v を算出した。それぞれ取得したデータについて、時間 t との関係グラフにまとめて示す。時間 t と速さ v の関係を Fig. 4.9 に、加速度 a と時間 t の関係を Fig. 4.10 に示す。また、距離 l と時間 t の関係を Fig. 4.11 に示す。

教材ロボットは、壁から 0.3[m] でモータ出力を 0 としたが、それは Fig. 4.11 の結果より $t = 0.9s$ の時点であることが確認できる。物理現象としては、 $t = 0.9s$ の前後で運動の様子が加速から減速に推移する。Fig. 4.9 のグラフから、 $t = 0.9s$ の時点で近似線の傾きが、正から負へ変化していることから確認できる。また、Fig. 4.10 においても加速度の値が、同様に正から負へ変化していることが分かる。教材ロボットのモータが停止する制御が計測結果に反映されていることが確認できた。また、Fig. 4.10 から $t = 0.9s$ で変化している加速度を読み取り、Fig. 4.9 から近似式を考察すると以下ようになった。

$$(1) \quad t = 0s \sim 0.9s \quad a = 0.62m/s^2$$

$$v = 0.62t \quad (4.2)$$

$$(2) \quad t = 0.9s \sim 1.5s \quad a = -0.99m/s^2$$

$$v = -0.99t + 1.51 \quad (4.3)$$

この結果から得られた加速度 a_x と速度 v の値から、距離 l と時間 t の関係を導出し、計測値と Eq. 4.2, Eq. 4.3 から得られる理論値を比較する。 $t = 0s \sim 0.9s$ では、初速度 $v_0 = 0m/s$ 、加速度 $a = 0.62m/s^2$ の等加速度直線運動であるので、

$$l = \frac{1}{2} \cdot 0.62t^2 \quad (4.4)$$

と表される。次に、 $t = 0.9s \sim 1.5s$ では、加速度 $a = -0.99m/s^2$ 、そして、速度 v 、距離 l の値がすでに明確になっている時間、 $t = 0.9s$ (運動状態の変化)、 $1.5s$ (停止)での情報を踏まえて、等加速度直線運動で減速から停止に至るので、

$$l = -0.50t^2 + 1.56t - 0.77 \quad (4.5)$$

と表される．この結果から，Fig. 4.11 に，距離 l について計測値と，以上で導出した式から得られる理論的な値を示す．

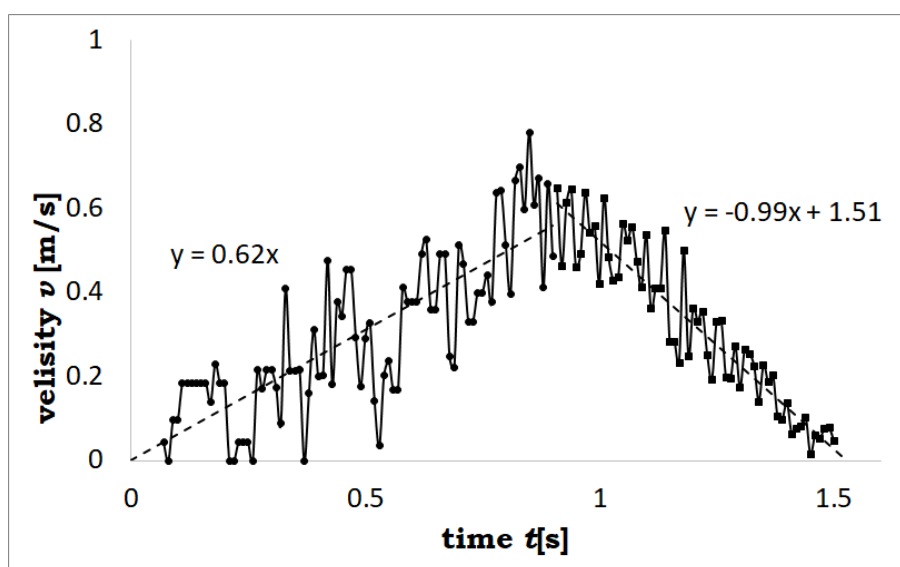


Fig. 4.9 v - t graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration

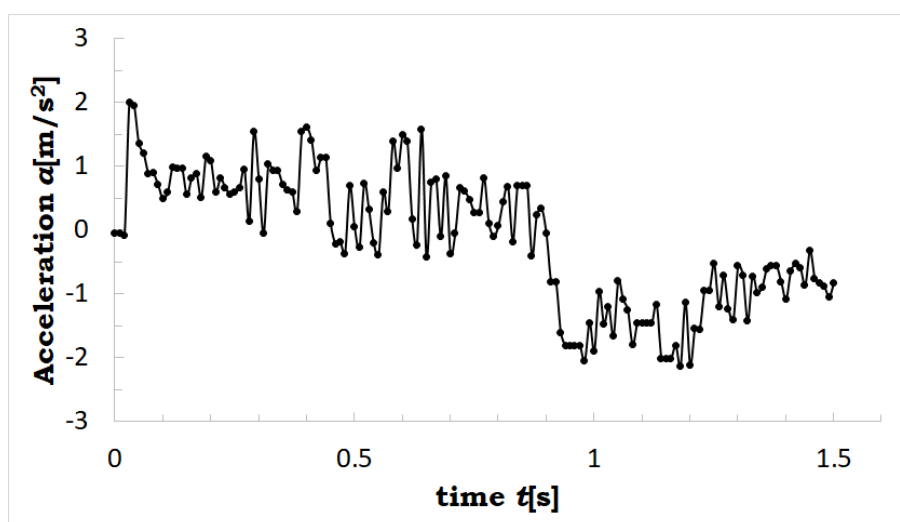


Fig. 4.10 a - t graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration

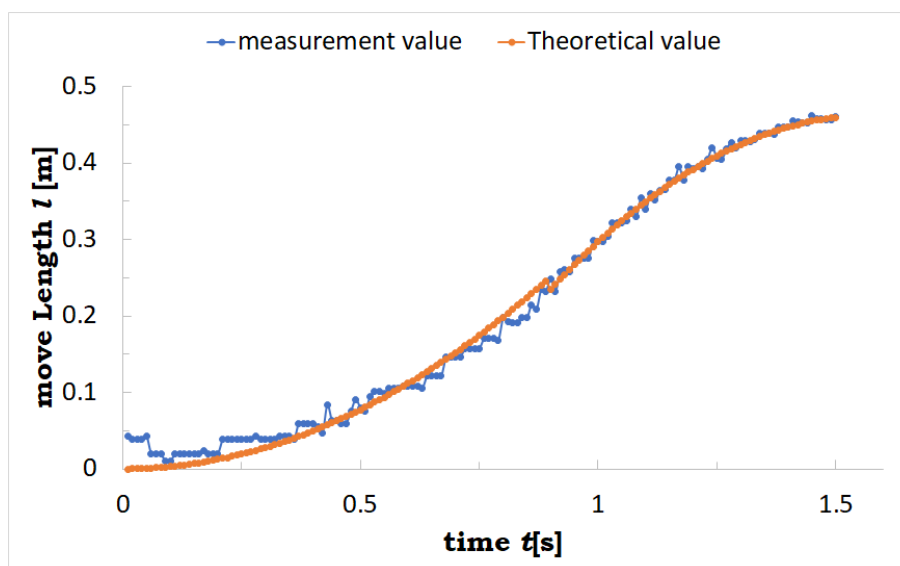


Fig. 4.11 l - t graph of an experiment for linear motion of uniform acceleration

これらの結果から，計測値と理論値は概ね一致していると考え，この RT 教材によって行った直線運動に関する実験は妥当なものであるといえる．そして教材ロボットのセンサシステムで行った実験で加速度 a ，距離 l ，速度 v ，時間 t の計測を行うことが出来た．

4.2.3 投げ上げ運動

投げ上げ運動は，高校の物理基礎で運動の 3 法則を学習した後，さまざまな運動について実例を通して学習する内容の中の一つである [41]．学習のポイントは，鉛直上向きを正とすると，加速度が $-g = -9.8\text{m/s}^2$ の等加速度直線運動となり，時間 t と速さ v ，及び距離 l の物理量の相関関係とその関係性を表したグラフの理解が大切である．

計測システムと実験方法についてそれぞれ Fig. 4.12 と Fig. 4.13 に示す．実験を行う生徒が教材ロボットを真上に放り投げて，その運動時の各物理量を計測し，その運動の様子を考察する．物理量の計測は，教材ロボットの前方に取り付けられた距離センサを真下を向くようにして教材ロボットを投げ上げて，センサと床面と距離 l を計測する．また，加速度センサを用いて投げ上げる軌道方向の加速度 a_x を計測する． a_x の値は，重力加速度 g ，及び投げ上げ時と受け取り時の衝撃により加わる力

に由来する加速度 a が合わせて計測される。加速度センサは慣性センサであり、投げ上げ後の空中での運動時は加速度の値は出力されず 0 の値を示す。

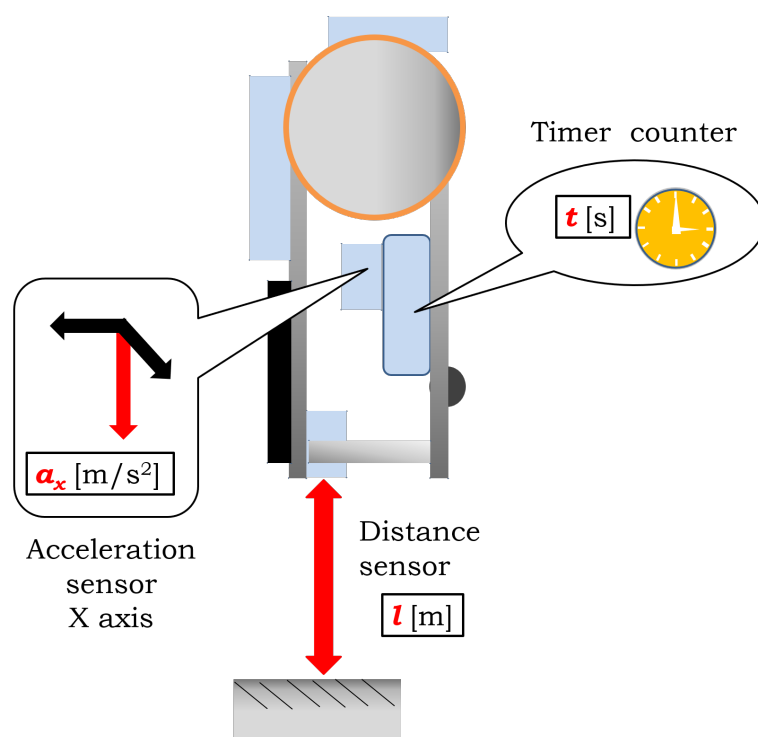


Fig. 4.12 The measurement system for the motion of throwing upward

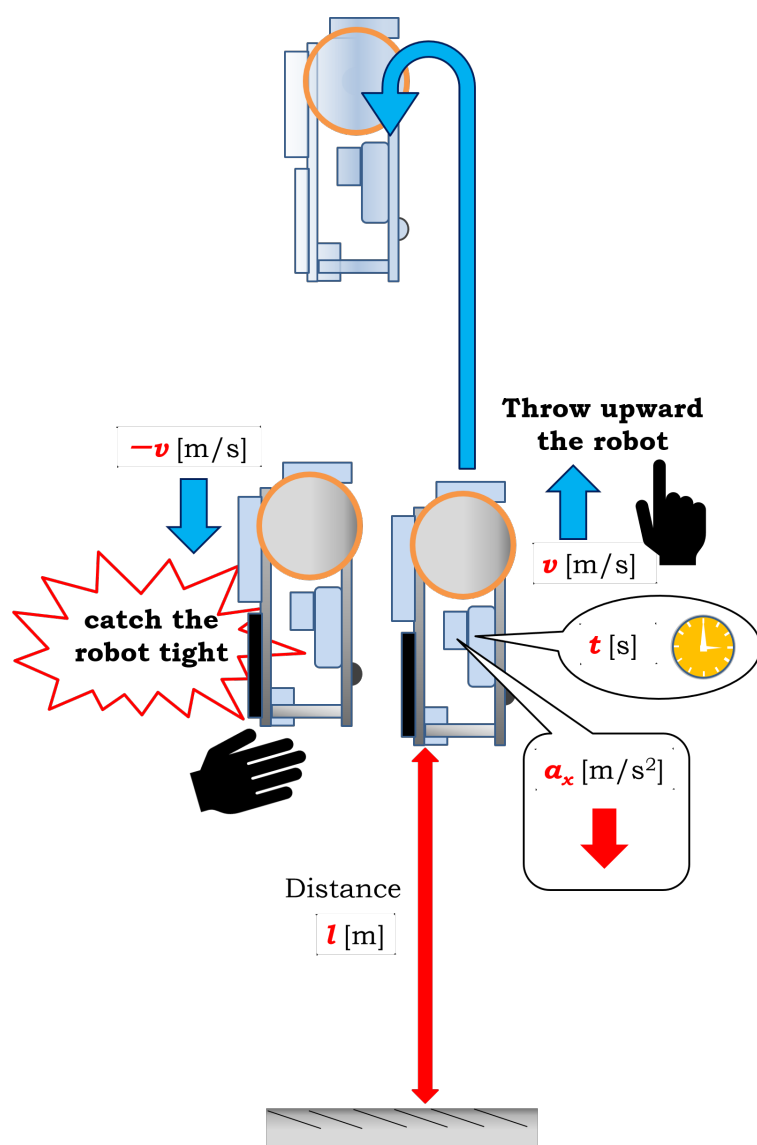
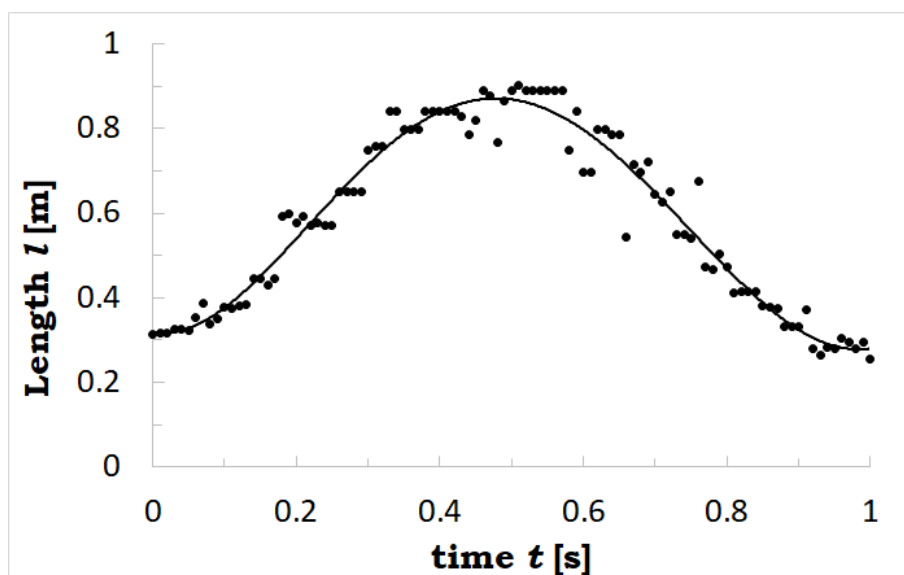
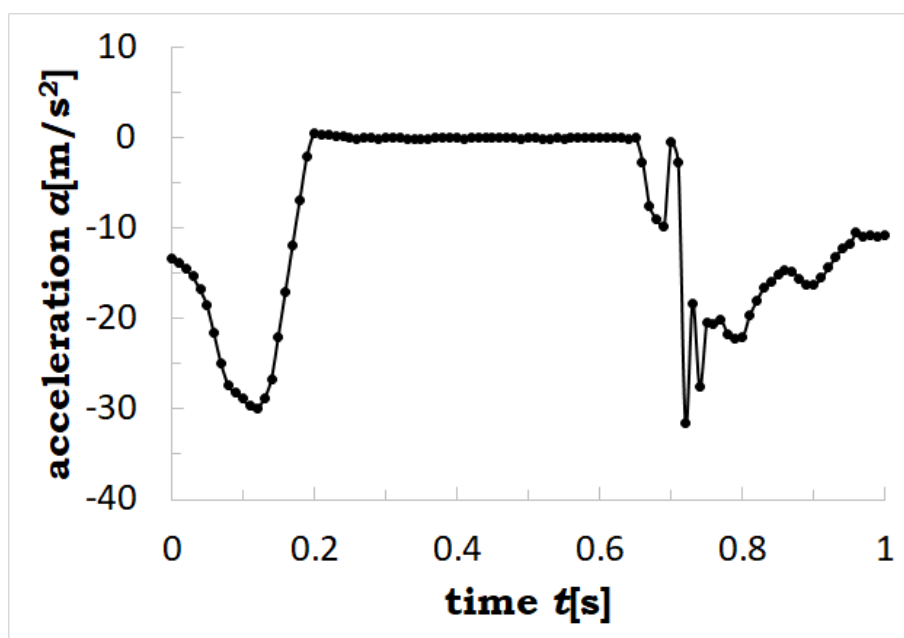


Fig. 4.13 An experiment for the motion of throwing upward

教材ロボットと床との距離 l について得られたデータで、横軸を時間 t 、縦軸を距離 l としてまとめたグラフを Fig. 4.14 に示す。このグラフで投げ上げた瞬間と教材ロボットの最高到達点と、受け取り点を考える。教材ロボットの運動の様子を分析するために鉛直方向の加速度 a_x についてのグラフを Fig. 4.15 に示す。投げ上げた瞬間と受け取る瞬間に教材ロボットには力が加わるため、重力加速度 g 以外に加速度が加わることとなる。つまりその加速度が大きく加わる時点が投げ上げと受け取りの時点である。投げ上げは、 $t = 0.12s$ でトータルで $a_x = -30.0m/s^2$ となっており、その時の床との距離も最下点に近い値であることから、ここが投げ上げの時点であると考えられる。しかし、受け取り時は、波形が歪んでおり、 $t = 0.72s$ で $a_x = -31.6m/s^2$ となっているが、床との距離は最下点とは言えない値をとっている。これは、受け取る瞬間に受け取り位置が上下に動いてしまっているのではないかと考えられる。また、投げ上げ運動時は加速度 a_x の値は 0 となっており、Fig. 4.14 の最高点にあたる $t = 0.47s$ の時点はこの間にあたり、投げ上げ運動時と考えられる。

Fig. 4.14 l - t graph of an experiment for the motion of throwing upwardFig. 4.15 a - t graph of an experiment for the motion of throwing upward

投げ上げと最高到達点を特定し，この2つの時点における力学的エネルギー E を算出する．位置エネルギー E_p の基準を投げ上げ地点とすると，投げ上げ時の運動エネルギー E_k と最高点での位置エネルギー E_p が等しくなる．

投げ上げ時の初速度 v_0 を，Table 4.3 の値を用いて以下の関係式により算出し，そして，投げ上げ時の運動エネルギー E_k ，最高点での位置エネルギー E_p を算出する．ここで，教材ロボットの質量 m は，1.77kg である．

Table. 4.3 Data of time and length at start and top

time t [s]	Length l [m]	Δt [s]	Δl [m]
0.12	0.382	—	—
0.47	0.877	0.35	0.495

$$\Delta l = v_0 \Delta t - \frac{1}{2} g \Delta t^2 \quad (4.6)$$

ここで，以上の式を用いて， $v_0 = 3.13 \text{ m/s}$ の値が得られた．そして，この値を用いて，運動エネルギー E_k ，位置エネルギー E_p をそれぞれ求める式は，

$$E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (4.7)$$

$$E_p = m g \Delta l \quad (4.8)$$

このように表される．そして得られた値を代入することによって，次のような値が得られた．

$$E_k = 8.68 \text{ J}$$

$$E_p = 8.60 \text{ J}$$

以上の結果から，運動エネルギー E_k と位置エネルギー E_p に関してそれぞれの値の差は小さく，その誤差は，1% 以下であった．よってこれらの値はほぼ一致しておりこの実験について妥当であるといえる．

4.3 まとめ

「物理量の分類と体系化」と「物理現象の可触化」について、本章では、高校物理の力学分野で学習する物理現象に広く対応可能なセンサを備えた物理学習支援用 RT 教材の設計と開発について示した。この RT 教材システムは、前述した物理量の分類と体系化に基づいてセンサシステムを設計しており、高校物理力学分野で学習する物理量を計測、算出を可能にするのに十分な計測センサを搭載していることを示した。よって広く高校物理学習の内容を五感を用いて実感しながら学習することができる。開発した教材ロボットの設計検証を行うため、等加速度直線運動と鉛直投げ上げ運動についての計測実験を行い、各物理量を計測して、それらの値を用いて物理現象について考察を行い、その妥当性を検証した。

これらの提案が、前述の物理教育における課題である3つ要因、1) 効果性、2) 実行性、3) 先進性について解消するものであることを確認する。1) 効果性「学力の向上と意欲・関心を高める」であるが、前章の摩擦現象の結果からも分かるように搭載されているディスプレイの効果もあり、単に物理現象を体感して確認するだけでは無く物理量および物理公式の定着と学力向上が確認されている。次に、2) 実行性「準備・片付けにかかる時間と高額な費用を必要としない」であるが、摩擦現象では、質量負荷 Δm となるおもりと摩擦係数 μ を変更する床材と教材ロボットのみで実験が可能であり、準備・片付けにはほとんど時間を要さなかった。また、計測システムおよびセンサ類をすべて搭載して、材料費で5万円弱であった。ナリカ製データロガーセットの価格が50万円であることを考えると大幅な低価格が実現可能であると考ええる。また、3) 先進性「将来への有用性が感じられ、高い技術を必要とせず使用できる」であるが、タッチパネル・ディスプレイや RT を搭載したロボット教材への学生の反応は期待度の高いものであり、操作は電源スイッチとタッチパネルでの直感的な操作で使用可能であり特別な技術や知識は必要としないので、この点も満たしていると考ええる。

次章では、この RT 教材システムを用いて授業を行い、生徒の学習効果の検証について示す。

第5章 開発した高校物理学習支援用 RT教材の評価

前章では高校教育課程における物理学習支援用 RT 教材の開発を報告した。この RT 教材システムを用いて学習をする生徒は、物理現象や理論を五感で感じながら、学習をすることができる。このシステムには、高校物理で学習する物理量の計測を可能にするのに十分なセンサーが搭載されている。本章では、異なる条件の下で3つの生徒のグループに円運動に関する授業を実施した。グループ A は RT 教材を使用して実験を行う授業を実施、グループ B は従来の座学による授業を実施、グループ C はひもの先にボールをつけた実験器具を使用して実験を行う授業を実施した。また、RT の効果の分析のために、RT 教材のディスプレイを使用せずモータによる運動のみを使用した実験を行う授業を実施した。各授業について前後に確認テストを行い学習効果の検証を行った。またアンケート調査を行い、授業内容の理解度を検証した。

5.1 RT 教材検証テーマについて

前章において高校物理の力学分野に関する学習で実験を行う際に必要なセンサ等を備えた高校物理学習支援用 RT 教材の設計開発について報告した。本章では、この RT 教材を用いて授業実践を行い教材の学習効果に関する評価を行う。

学習効果の評価を行うにあたり、その適した題材について考える。題材としては、生徒が学習して理解する過程において、運動と力の関係について高校物理で学習する要素が多く含まれているものについて考える。田中らは高校物理において、多くの生徒が解消されにくい「進む向きに力が必要」という MIF 素朴概念を抱える題材として「円運動」をあげて、それに関する調査を行っている [29]。

高校の物理で扱われる運動の軌道と力の関係は、直線、放物線、円運動の3つの形に集約することができる。直線運動は、運動の方向と力の方向が一致するという特徴がある。放物線運動では、運動の向きに関係なく、常に一定の向きに一定の大きさの力が働くという特徴がある。円運動では、運動の向きに常に垂直に一定の大きさの力が働くという特徴がある。力と軌道の複雑な関係の円運動を理解することは、高校物理での運動と力の関係の学習の完成といえる。よって、円運動がどれだけ理解されているのか調査を行うことは、力学全体の理解度を把握する上で有用であると考えられる。

また、三浦は科学的概念を構築するための科学教育の試み [69] の中で、物理の基本法則を繰り返し教えても、うまく伝わらない理由として学生に「物理量の概念」がほとんどないことを挙げ、学生に概念を実感させることの重要性を述べている。そして、具体例の一つとして「円運動」に関する実例による解説授業の効果を述べている。列車事故の実例についての力学的解析の学生からの評価は77%と高い結果であり、「円運動」は、学生が誤った概念を持ちやすい学習項目であること、身近な物の回転運動から、事例を交えた発展性等、実感が伴った際の理解への移行のしやすさを示す良い学習項目であることを示している。

本章では、開発した高校物理学習支援用 RT 教材を用いて円運動の授業を行い、RT 教材の学習効果に関する評価検証を行う。

5.2 物理学学習支援用 RT 教材の評価

5.2.1 評価実験概要

物理現象学習支援用 RT 教材の効果を検証する為に開発した教材を用いて授業を実施した。検証方法としては、授業や教材に関するアンケートと RT 教材を使用した授業の前後で授業内容の確認テストを実施し、学習内容の理解や知識の定着に効果があったかを調べた。学習内容は、円運動をテーマとして設定して授業を行った。3 章において検証結果を報告した摩擦現象は、教材ロボットに動きがない静的な内容である。そこで、本章では動きのある動的な内容であり、また摩擦現象とは異なるセンサを使用する内容での効果を検証する。RT 教材では、それぞれの条件においてディスプレイに表示された式や値、ゲージの変化と物理現象を視覚的に見ながら、教材ロボットにかかる力を手で触覚的に感じることによって、向心力・遠心力 F 、加速度 a 、速度 v 、角速度 ω と回転半径 l の各物理量と物理現象の関係を考察することができる。

授業に参加した生徒は、「物理基礎」を履修中の高校生 2 年生で、15 名ずつの 3 グループ (A, B, C) に分けた。グループ分けは、事前学力や知識の量に偏りがないように、「物理基礎」の成績で平均値が各グループ間で有意差のないようにした。円運動は「物理」の学習内容であり、対象の生徒は未習である。各グループに対しては異なる条件で授業実施した。グループ A は提案 RT 教材を使用、グループ B は RT 教材を使用せず座学のみ、グループ C は RT 教材を用いないで従来の実験演示授業を実施した。

5.2.2 円運動の学習内容における物理量と計測センサ

円運動を学習する際に用いる各物理量をセンサ等で直接測定可能なもの、理論式で算出し定義するもの、その両方で測定・算出可能なものに分類し、その相関関係を Fig. 5.1 に示す。基本物理量である円運動の半径 l と教材ロボットの質量 m は本実験においては既定の量である。物体にかかる向心力・遠心力 F 、向心加速度 a 、速度 v 、角速度 ω は、理論式又は各種センサで測定可能な物理量である。速度 v は次式により算出できる。

$$v = l\omega \quad (5.1)$$

次に加速度 a は, Eq. (5.1) で得られた速度 v と半径 l から次式より算出できる.

$$a = \frac{v^2}{l} \quad (5.2)$$

また, 向心力・遠心力 F は, Eq. (5.2) で得られた a と質量 m から次式より算出できる.

$$F = ma = m \frac{v^2}{l} \quad (5.3)$$

これらの各物理量と関係式 Eq. (5.2), Eq. (5.3) は教材ロボット上のディスプレイで表示される.

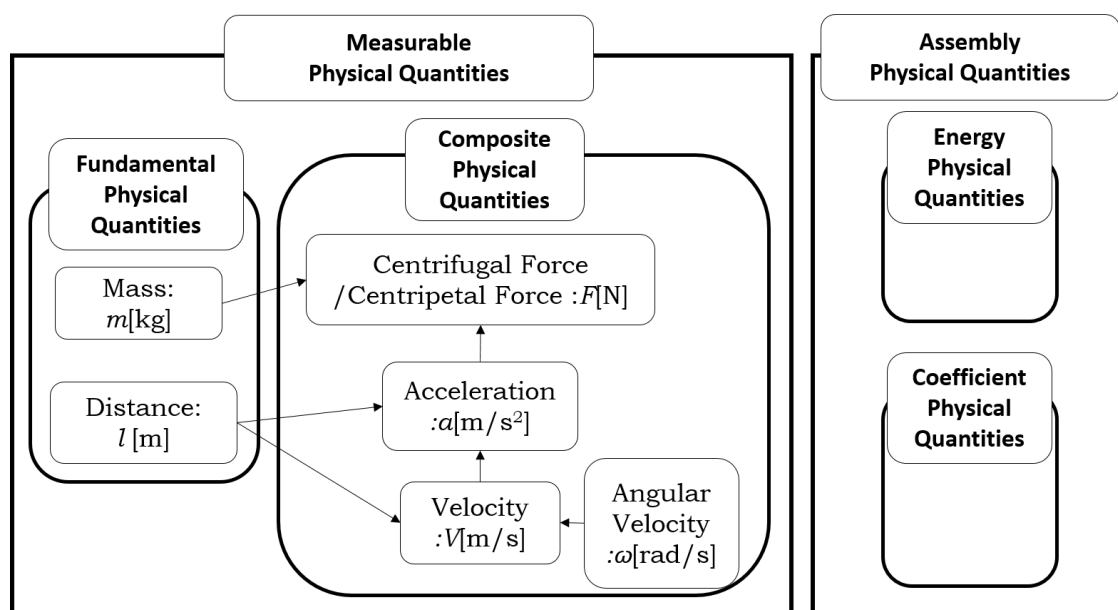


Fig. 5.1 Correlation diagram of physical quantities for circular motion

5.2.3 円運動の授業内容

授業の内容に関して述べる．RT教材を使用した実験授業の風景を Fig. 5.2, Fig. 5.3 に示す．モータを一定速度で回転させて等速度 v で直進運動するロボットに取り付けたひもを直進方向とは垂直に力 F を加えることでロボットの運動が直進から回転へ変化することを体感する．それによって内側に加えた力 F が円運動の要因となることを，ひもをひいた手の感覚で実感する．その際に Fig. 5.4 で示すように，加速度センサの値をゲージで表示して内向きに加速度 a がかかることを視覚的に確認し，その値を算出する公式も同時に表示して学習効果を高める．さらに，ひもの長さ l を 0.2m, 0.4m と変えることで，回転半径 l によって手で加える向心力 F が変化することを手の感覚で実感しながらディスプレイで表示している公式と各数値，加速度のゲージの変化を観察することで，各物理量の関係について考察することを促す．



Fig. 5.2 Snap shots of experiment

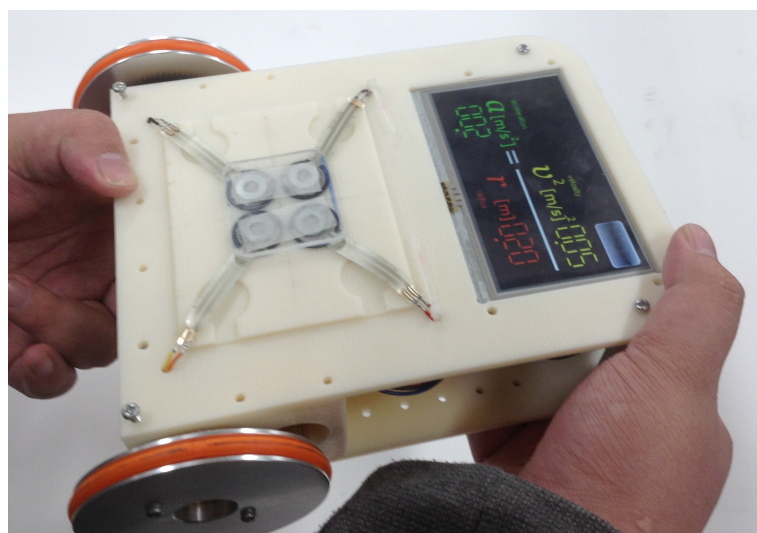


Fig. 5.3 Snap shots of an RT educational tool, and physical formula shown on the display

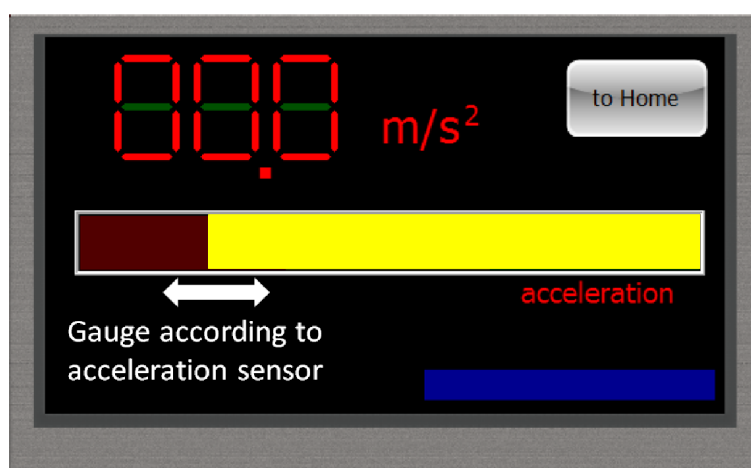


Fig. 5.4 Snap shots of the acceleration gauge shown on the display

評価実験の手順を以下に示す.

1. 生徒全員に対して事前に円運動に対する確認テストを実施した (10 分).
2. テスト終了後, 各グループに対して異なる条件で授業を行う. 内容「日常生活における円運動」, 「高校物理で学習する慣性の法則, 運動方程式と円運動について」の座学を実施した (各 20 分).
3. A グループに対して, ディスプレイに物理情報を表示しモータで運動する RT 教材を用いた授業を実施した.
4. B グループに対して, RT 教材を用いないで座学による授業を実施した.
5. C グループに対して, 物体にひもをつけたもので円運動についての実験を行う授業を実施した.
6. 授業終了後, A, B, C グループに対して最初に行ったものと同様の確認テストと授業に対するアンケート実施した (10 分).

5.2.4 評価方法

授業評価は, 確認テストと授業についてのアンケートで行う. まず, 確認テストの内容を以下に示す.

【問題】 [70]

質量 2.0 kg の物体が, Fig. 5.5 のような半径 0.20 m の円周上を一定の速さで運動している. その時, 速さ 2.0 m/s であった. (100 点満点)

- Q1. 加速度の大きさ $a[\text{m/s}^2]$ を求めよ. (公式 10 点, 答え 10 点).
- Q2. Fig. 5.5 の点 P で, その加速度 a の向きはどちら向きか. 記号で答えよ. (15 点)
- Q3. なぜそのように考えたか. 簡単に書きなさい. (記述)(20 点)
- Q4. この円運動に必要な力の大きさ $F[\text{N}]$ を求めよ. (公式 10 点, 答え 15 点).
- Q5. Q2. の力 F の反対の向きに現れる力は何というか. (10 点)
- Q6. その一般的な総称を何というか. (10 点).

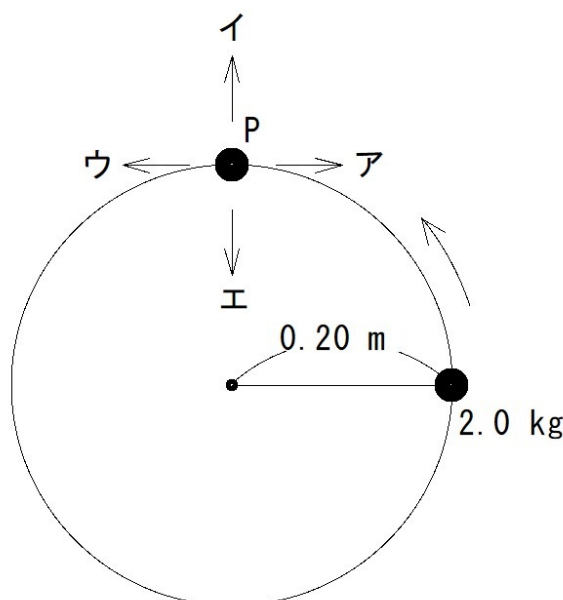


Fig. 5.5 A figure about circular motion in this examination

ここで、Q1 は円運動の加速度を公式で計算する問題、Q2, Q3 は加速度の向きについての問題、Q4 は向心力を公式で計算する問題、Q5, Q6 は遠心力、慣性力についての語句を回答する問題である。採点は 100 点満点であり、配点は各問の末尾に示しているとおりである。

アンケートは各質問において「大変役に立った (5 点)」、「役に立った (4 点)」、「ふつう (3 点)」、「役に立たなかった (2 点)」、「全然役に立たなかった (1 点)」の 5 段階で回答してもらい評価を行った。5 段階評価だけでは答え難い質問に対しては自由記述にすることで被験者である生徒の考えを可能な限り読み取れるようにした。以下にアンケート内容を示す。なお、問 1 から問 7 までは全てのグループに対して行い、問 8 から問 11 まではグループ A のみに対して行った。

問 1. この授業を通して、各物理量（向心力，遠心力，速度，加速度，半径，質量）の相関関係の公式と物理現象は理解，イメージできるようになりましたか？

問 2. なぜそのように思いましたか？理由をお書きください。

(自由記述)

問 3. この授業は，向心力 F をイメージし，理解するのに役立ちましたか？

- 問 4. この授業は，円運動では速度ベクトルと垂直な向心力 F がはたらいっていることをイメージし，理解するのに役立ちましたか？
- 問 5. この授業は，運動方程式を踏まえて向心力 F から加速度 a をイメージし，理解するのに役立ちましたか？
- 問 6. この授業は，加速度 a と半径 l の関係をイメージし，理解するのに役立ちましたか？
- 問 7. このような授業はどのように感じましたか？
(自由記述)
- 問 8. 加速度 a をディスプレイ表示のゲージの変化で見れる所は，加速度 a をイメージし，理解するのに役立ちましたか？
- 問 9. 加速度 a の公式と数値をディスプレイ表示で見れる所は，それらの関係を理解するのに役立ちましたか？
- 問 10. 向心力 F の公式と数値をディスプレイ表示で見れる所は，それらの関係を理解するのに役立ちましたか？
- 問 11. ロボット教材を使用した授業はどのように感じましたか？
(自由記述)

5.2.5 確認テストに関する分析結果

授業の前，後に行った確認テストの各グループの詳細データ (Table A.9, Table A.10, Table A.11) をもとに，前後データの差分についての結果を Table 5.1 に示す．また，その結果について，各グループの母平均 μ に関する有意の差についての判定を行い，その結果を Table 5.2 に示す．これらの表では，テスト全体の変化 (Total) と各問の変化 (Q1～Q6) を示しており，生徒の理解についての詳細な分析を行う．

Table 5.1 のテスト全体の点数変化において，RT教材を用いて授業を行ったグループ A の母平均 μ が通常の講義形式の授業を行ったグループ B と実験を演示する授業を行ったグループ C の二つと比べて向上したことが分かる．その結果についての有意差の判定では Table 5.2 で，グループ A に有意が確認できた．この結果から円運

動に関する内容に限るが、本研究で提案する RT 教材システムを用いた授業は他の二つに比べて学習効果があることが確認できた。

ここで、提案する RT 教材がどのような点で生徒に対して効果的であったのかを各問の結果と解答から考察する。Q1 は円運動の加速度 a を関係式で算出する問いである。Table 5.2 の Q1 の母平均 μ でグループ A に有意の差が確認できる。このことからグループ B とグループ C に対してグループ A の方が加速度 a についての関係式がよく定着している事がわかる。グループ A のアンケートの自由記述では「実際に見て感じることは話を聞いているより良かった。式の意味をようやくイメージすることができた。」というものがあり、視覚、触覚的な体感により物理現象の意味とそれを表す関係式のつながりが理解できたのではないかと考える。ディスプレイにより関係式の表示を見ながら実験出来ることも知識の定着に効果的であるのではないかと推察されるが、この点に関しては別のデータをもとに考察した結果を後述する。グループ B は座学のみであるが、「公式の作り方は分かったが、半分ほどしか理解できなかった。初めて聞く言葉がいろいろ出てきて理解が追いつかなかった。」という記述があり、生徒の表現で「公式を作る」、「新しい言葉」ということから、物理現象を理解して学習事項とつなげるのではなく、言葉や公式を覚えて理解しようとするため、余計に関係式の定着が進まなかったと考える。グループ C は実験演示を行ったが、「イメージはできたが理解はできなかった。各物理量は理解できたが、公式や計算などが難しい。」という記述があり、円運動を見せながらの授業であったため物理現象は認識できたが、やはり現象と学習内容である公式や計算とはつながらなかったと考える。また、グループ B とグループ C の母平均 μ の比較では有意の差は確認できなかった。

Q2, Q3 は円運動における加速度 a の向きとその理由について記述するものであり、向心力 F と円運動の関係についての理解と慣性の法則と運動方程式から加速度 a の向きを考える問いである。Table 5.2 の Q2, Q3 の母平均 μ で他の二つのグループと比べてグループ A で有意の差が確認できた。また、グループ B とグループ C の比較では実験演示を行ったグループ C に有意の差が確認できた。Q2 の加速度 a の向きについての問いで正答率を比較すると、グループ A が 15 人中で 12 人正解の 80 %、グループ B とグループ C で 3 人ずつ正解で 20 %であり、グループ A の正答者が多かった。また、この問いの点数でグループ B とグループ C で C に有意差があるにもかかわらず、加速度 a の向きの正答者数が同じという結果になっている。これは、Q3 の理由を記述する問いに対して、グループ B の生徒はほとんど回答できなかったのに対して、グループ C では正解を記述できた生徒が多かったという結果である。実験演示によって物理現象が実感できたのではないかと考える。これは Fig. ?? のよ

うに、加速度センサの値をリアルタイムでゲージの変化としてディスプレイ表示で見えることが要因であると考えられる。自由記述でも、「ディスプレイ表示のゲージが分かりやすかった」という意見が複数あった。グループ B とグループ C の不正解で最も多かった回答は、加速度 a の向きと速度 v の向きは同じというものであり、グループ B で 12 人の 80 %、グループ C で 10 人の 67 %であった。これは、加速度 a の向きと速度 v の向きは同じであるという誤った概念を持っており、これを訂正することができなかったのではないかと考える。

Q4 は向心力 F を運動方程式の公式を用いて算出する問いであり、Table 5.2 の Q4 の母平均 μ で他の二つのグループと比べてグループ A で有意の差が確認できた。これは Q1 と同じように、グループ A では RT 教材の使用で視覚、触覚的な体感により物理現象の意味とそれを表す関係式のつながりが理解できたのではないかと考える。

Q5, Q6 は遠心力、慣性力の語句を回答する問いであり、Table 5.2 の Q4 の母平均 μ でグループ A、グループ C がグループ B に比べて有意の差が確認できた。これは、グループ B のように授業を聞いているだけでは、はたらく力 F の概念や関係性を理解やイメージすることは難しいという結果であると考え。また、グループ A とグループ C では有意の差はなく、母平均もほぼ同じであり、20 点中で 14 点と高い得点であった。これは、RT 教材や演示実験を見ることで理解が進み、語句内容がよく記憶に残ったのではないかと考える。

以上の結果から、円運動についての学習において RT 教材を用いた授業は、座学だけの授業、演示実験を実施した授業と比べてその学習の効果が確認できた。

Table. 5.1 A result of an examination about circular motion

Each Group		Total 100	Q1 20	Q2,Q3 35	Q4 25	Q5,Q6 20
A	\bar{x}	70.7	18.0	19.0	21.3	14.0
	s^2	724.5	13.6	229.3	40.9	54.3
	s	26.9	3.7	15.1	6.4	7.4
B	\bar{x}	32.5	11.0	2.3	13.7	6.7
	s^2	474.8	86.4	38.8	98.1	66.7
	s	21.8	9.3	6.2	9.9	8.2
C	\bar{x}	44.3	9.3	9.7	13.0	14.0
	s^2	424.5	56.7	173.1	52.9	68.6
	s	20.6	7.5	13.2	7.3	8.3

Q1: Calculate Acceleration

Q2,Q3: Direction of Acceleration

Q4: Calculate Centripetal Force

Q5,6: Centrifugal Force and Inertial Force

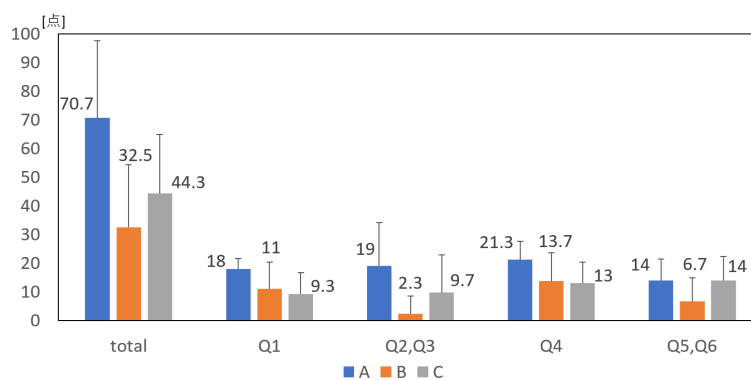


Fig. 5.6 A result of an examination about circular motion(Average±S.D.)

Table. 5.2 A significant test about a result of the examination

Groups		Total	Q1	Q2,Q3	Q4	Q5,Q6
A	B	$\mu_A > \mu_B$	$\mu_A > \mu_B$	$\mu_A > \mu_B$	$\mu_A > \mu_B$	$\mu_A > \mu_B$
A	C	$\mu_A > \mu_C$	$\mu_A > \mu_C$	$\mu_A > \mu_C$	$\mu_A > \mu_C$	$\mu_A = \mu_C$
B	C	$\mu_B = \mu_C$	$\mu_B = \mu_C$	$\mu_B < \mu_C$	$\mu_B = \mu_C$	$\mu_B < \mu_C$

μ_A : population mean of group A
 μ_B : population mean of group B
 μ_C : population mean of group C

5.2.6 RT 教材のディスプレイ表示に関する学習効果の検証

次に、この RT 教材についてどの機能が効果的であり、どの感覚によって理解が進んだのかを確認することを目的として、RT 教材のディスプレイを使用せずゲージや物理量の値、公式を表示しない状態で、モータによる運動制御の機能のみを使用して同様の授業を他のグループと同じ前提条件で、グループ D15 人に対して実施して、その結果についてグループ A、グループ C と比較を行った。その確認テストの結果についてグループ D の詳細データ (Table A.12) をもとに、平均値等のデータを Table 5.3 に示す。また、その結果について、グループ A とグループ C の母平均 μ に関する有意の差についての判定を行い、その結果を Table 5.4 に示す。

グループ A とグループ D との比較結果は、Q5, Q6 では有意の差は認められなかったが、確認テストの合計点やそれ以外の問いに関してはグループ A に有意の差が認められた。また、グループ C とグループ D との比較では確認テストの合計点、各問いの点数において母平均 μ の値も大きな差はなく、それらに関する有意の差も認められなかった。この結果から、RT 教材を用いたとしてもモータによる運動制御のみでは、従来の演示実験と効果に差はないことが分かった。つまり、手で感じる感覚や現象を視覚的に確認するだけでは学習効果は高まらず、各種センサによる物理量の計測値を数値化、グラフ化して目に見える形で表現し、それと同時に物理関係式も視覚的に表示することで、学習内容に具体性が増して学習効果が高まることが考えられる。

グループ D の自由記述では、「言葉だけだとどうしてもイメージしにくいですが、実際に視覚化した事で理解しやすくなった.」, 「ロボットを使った授業はわかりやすい」

という物理現象を目で見る事が出来る点とロボットへの好奇心に対して好意的な意見が得られた。その反面、「理解，イメージはできたが，実際に計算となると公式等が出てこなくなる」という意見も多数あり，物理量の数値，関係式に関する理解は学習効果が薄いという結果が得られた。グループAの自由記述では，「ディスプレイ表示のゲージが分かりやすかった。公式や値が表示されている所は分かりやすかった。」という意見からディスプレイ表示に関する効果ははっきりと記述されており，また確認テストの結果でも有意の差も認められるため，RT教材における物理量の数値とそれらのグラフ化，関係式のディスプレイ表示に学習効果があると考えられる。その他の意見として，「動いているときに値が見にくい」というものもあり，今後はロボットに無線通信について機能拡張を進めて，数値やグラフをタブレット等の複数の外部端末からモニタ可能なシステムの構築を行っていきたい。

Table. 5.3 A result of an examination about circular motion without display

Group		Total	Q1	Q2,Q3	Q4	Q5,Q6
		100	20	35	25	20
D	\bar{x}	41.7	10.0	5.7	16.7	10.7
	s^2	657.6	67.8	149.5	65.5	78.1
	s	25.6	8.2	12.2	8.1	8.8

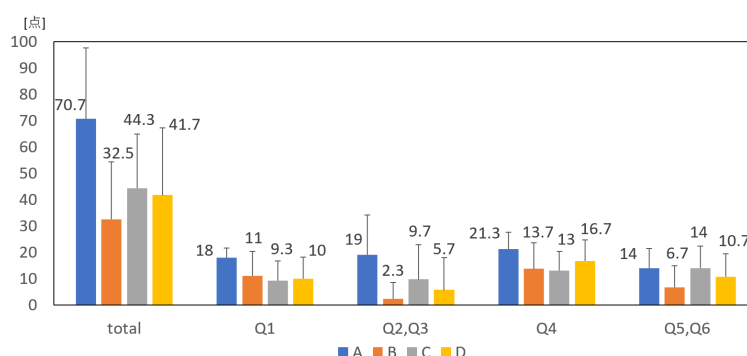


Fig. 5.7 A result of an examination about circular motion from Group A to Group D(Average±S.D.)

Table. 5.4 A significant test about a result of the examination without display

Groups		Total	Q1	Q2,Q3	Q4	Q5,Q6
A	D	$\mu_A > \mu_D$	$\mu_A > \mu_D$	$\mu_A > \mu_D$	$\mu_A > \mu_D$	$\mu_A = \mu_D$
C	D	$\mu_C = \mu_D$	$\mu_C = \mu_D$	$\mu_C = \mu_D$	$\mu_C = \mu_D$	$\mu_C = \mu_D$

μ_A : population mean of group A
 μ_C : population mean of group C
 μ_D : population mean of group D

5.2.7 アンケートに関する分析結果

全グループに対して授業後に行ったアンケートの集計結果 (Table A.13, Table A.14, Table A.15, Table A.16) をもとに, 実施した 5 段階評価アンケートの各設問で得られた回答値の母平均 μ と「普通 (3 点)」を比較値 $\mu_0 (= 3)$ として, その差の t 検定の判定結果を Table 5.5 に示す. グループ A に対してのみ行った RT 教材に関するアンケートの結果を Table 5.6 に示す. グループ A, B, D において, $\mu > 3$ となり「役に立った」という結果が得られた. 特にグループ A の問 4, 5 とグループ B の問 3 においては $\mu > 4$ となり「大変役に立った」という結果が得られた. また, グループ C においては, 多くの質問において $\mu = 3$ となり「普通」という芳しくない結果が得られた.

グループ A の生徒は RT 教材が理解に対して役立つという手応えが得られ, 学力向上への効果も認められた. 自由記述では, 「体験できるので記憶に残りやすい」, 「物理が見てわかるためロボットで深く理解できるなら今後も続けてほしい」など効果的に学力が向上するという回答とロボットに関する期待感が生徒から得られた. 特に問 4 では速度ベクトル v と向心力 F の関係, 問 5 では円運動における加速度 a と運動方程式の関係についての質問である. 速度や加速度のベクトル量に関する物理量の相関関係に関する内容は, 講義で説明が困難な箇所であることは経験的に感じていたため, ここで生徒が理解に関する満足度が高く, 合わせて学習効果も高いことは特筆に値するのではないかと考える. ただし, 問 3 ではあまり高い値が得られていないことは, 自由記述で「ロボットに実際触れていないから」ということがあり, 限られた台数の RT 教材での演示実験での問題であり, 1 台あたりの生徒数を減らし, 教材ロボットに触れる時間を長くする等, の改善は可能であると考ええる.

Table. 5.5 Information of the questionnaire respondent

		1	3	4	5	6
A	\bar{x}	4.13	3.80	4.47	4.40	4.20
	s^2	0.41	1.17	0.27	0.40	0.60
	s	0.64	1.08	0.52	0.63	0.77
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 4$	$\mu > 4$	$\mu > 3$
B	\bar{x}	4.13	4.33	4.13	4.00	4.07
	s^2	0.55	0.52	0.69	1.14	0.69
	s	0.74	0.72	0.83	1.07	0.83
	result	$\mu > 3$	$\mu > 4$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$
C	\bar{x}	3.13	3.27	3.73	3.13	3.07
	s^2	0.98	1.35	1.35	1.27	0.78
	s	0.99	1.16	1.16	1.12	0.88
	result	$\mu = 3$	$\mu = 3$	$\mu > 3$	$\mu = 3$	$\mu = 3$
D	\bar{x}	3.53	3.87	4.27	3.60	3.87
	s^2	0.69	1.55	1.21	1.26	1.55
	s	0.83	1.25	1.10	1.12	1.25
	result	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$	$\mu > 3$

- 1: Understanding of circular motion and correlation between each quantity
 3: Understanding of centripetal force
 4: Understanding of correlation between velocity vector and centripetal force
 5: Understanding of correlation between acceleration and equation of motion
 6: Understanding of correlation between acceleration and a radius

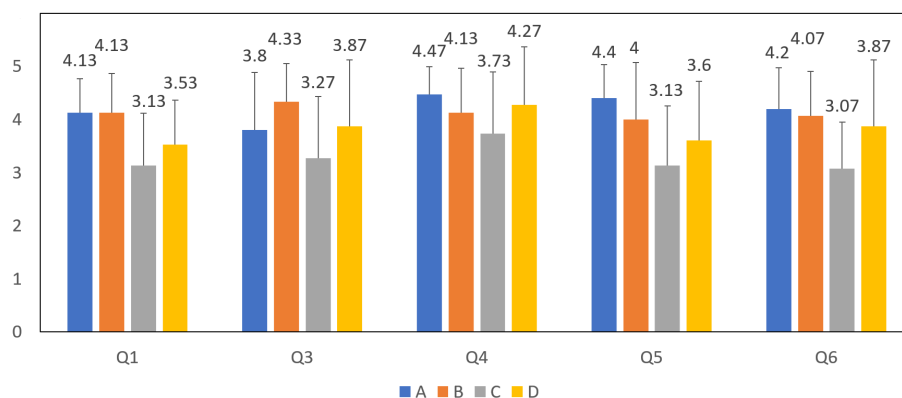
Fig. 5.8 Information of the questionnaire respondent(Average \pm S.D.)

Table. 5.6 Information of the questionnaire respondent

	8	9	10
\bar{x}	4.00	4.40	4.27
A s^2	0.86	0.40	0.78
s	0.92	0.63	0.88
result	$\mu > 3$	$\mu > 4$	$\mu > 3$

8: Effectiveness of a gauge on a display
for understanding of acceleration

9: Effectiveness of a display
for understanding of acceleration

10: Effectiveness of a display
for understanding of centripetal force

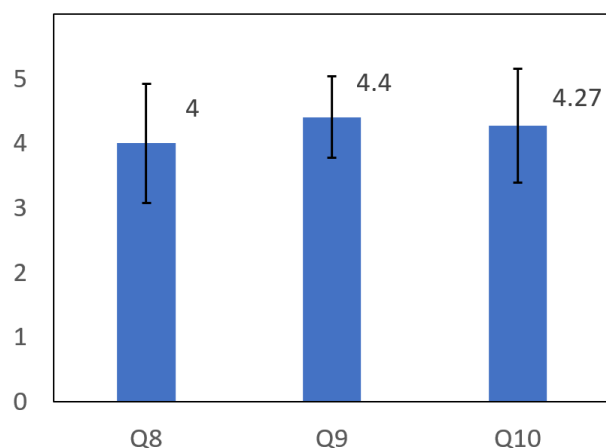


Fig. 5.9 Information of the questionnaire respondent(Average \pm S.D.)

グループ B の生徒は授業が理解に役立つという手応えは得られているが、テスト結果を合わせて考えると大きな学力の向上には至っていない。実感が伴わない場合には知識の定着は難しいという結果であると考える。

グループ C の生徒はほとんどの問いで $\mu=3$ という結果が得られた。確認テストの結果では、グループ B, C との間に有意の差はないが、あまり満足感は得られていないことが分かる。自由記述では「どういう力かはだいたい分かったけど、公式はいまいち分からなかった。」という意見も多く得られた。

グループ D の生徒も概ね授業が理解に役立つという手応えは得られているが、大きな学力の向上には至っていない。問 4 では $\mu=4.27$ と高めの値となっており、確認テストでも Q5, Q6 で高い値が得られており慣性力等の概念的な理解には満足感とともに学力の向上も見られる。

これらのことから提案する RT 教材の手で力を感じるような触覚的な体感の効果と、ディスプレイに表示したゲージと公式、数値や実際の現象を見るという視覚的な刺激が、物理を学習する生徒にとって満足度は高く、合わせて学習効果が認められるということが確認できた。また、教材ロボットは、従来の演示実験では得られないような親しみやすさが得られると読み取れるアンケート結果から、提案する RT 教材システムが有用である結果が得られた。

5.3 まとめ

本研究では，高等学校の物理学習をより効率的に支援するために，物理現象と理論式が体感可能な RT 教材を提案した．この教材ロボットは学習する物理量を計測するために必要な最少の組み合わせのセンサを搭載した仕様とした．本章では，円運動について高校生を対象とした評価授業を実施した．RT 教材は，向心力 F を生徒がひもを引くことにより触覚で体験できる仕組みと，ディスプレイにより物理量や関係式が視覚で確認でき，向心加速度 a の向きと大きさをゲージで表示できる仕組みを使用して授業を実施した．提案教材を用い，4 グループに対して RT 教材の使用有無による評価授業を実施した．その結果，RT 教材を使用したグループ A が理解度，学力ともに向上し，統計的に有意性が確認され，円運動に限られることではあるが，学力の向上につながることが検証できた．

今後の予定として，ディスプレイでの表示にとどまらず，Wi-Fi 環境など無線通信機能を用いて，外部端末から物理量の値やその関係式，数値のグラフ化した情報をモニタできるシステムを構築していきたい．また，センサのモジュール化を進めて授業内容に応じたセンサの種類や設置場所を容易に変更可能として，多くの教員の方々が日常の授業でも容易に使用しやすいものとなるよう改善を進めていきたい．

第6章 結論

物理学習において高校教育課程に即した RT 教材は現状では適したものが無いのが実情である。しかし、物理学習で実験が重要であることと、それに反して実験があまり積極的に授業では実施されていない現状を鑑みて、本研究では、高校生がより効率的に物理を理解できるように、高等学校教育課程に即した実験・体験を可能とする RT を使用した教材を提供するのが目標である。

そこで、高等学校教育課程における物理の力学分野で学習する物理量を整理し、それらが測定できるセンサシステムと物理量の体系化及びそれを基に行う教材開発の方向性を示した。そして、実際の教材ロボットを設計開発し、それをを用いた実験授業を実施し、その学力向上への学習効果を検証した。そして、高校物理力学分野の学習内容に関する実験が可能な最少限なセンサシステムとそれを搭載した教材ロボットを提案し、この RT 教材システムを用いた学力向上への学習効果を検証した。

第2章では、高校教育課程の物理学習における物理量の分類と体系化を提案した。教科書等では、学生が物理量を効率的に理解できるように、それらを適切に分類又は体系化して提示しているとは言いがたい。そこで学生の理解に適した分類の基準として、RT (Robot Technology) を用いた物理量の感覚化という視点に注目し、物理の力学分野で学習する物理量を「センサで計測可能なもの」と「センサで計測できないもの」に分類する方法を提案した。この分類が学生の物理学習において、学力向上に対して有効性があるのかを検証するため、高校3年生を対象とした提案分類の学習効果に関する評価授業を実施し、物理量の相関関係に対する学力が向上していることが確認できた。しかし、理解度では学生の手ごたえは高くないというアンケート結果が得られた。この結果から、提案した分類を基に相関関係の視覚化を進め、その伝達手法として学習支援ツールを開発した。このツールは、学生が学びたい物理量について PC 上でのボタン操作により物理量の相関関係図を確認できるものである。提案した物理量の分類及び体系化、学習支援ソフトウェアが、学生の物理学習における学力の向上に有効であるかを検証した。その結果、提案する手法を用いることで、学習内容が記憶に残りやすく、学力の向上にもつながることが検証できた。

第3章では、物理量と物理現象の可触化を目指して、摩擦学習支援用 RT 教材を開発し、その学習効果を検証した。学生の物理学習を難しくする原因は、物理現象に関して実際の法則とは食い違う誤った概念の存在である。物理現象に則した正しい概念を持つために重要なことは、物理現象を正しく実感、体感することである。そこで、学生が物理現象を体感し理論を理解することを支援する、「物理現象の可触化」をベースとした RT 教育ツールを提案した。提案した物理量の分類と体系化を基に、物理現象を正しく実感し、正しい概念の構築を促すことが出来る。本章では、摩擦現象の学習支援に焦点を当てた RT ツールを提案した。センサにより直接測定可能な物理量である摩擦力 F と垂直抗力 N から摩擦係数 μ を算出し、理論式とリアルタイムの値を液晶ディスプレイで表示する機能を持つ。学生は RT ツール通して、物理現象を感じながら、理論式と定量的な物理量の各値を視認することができる。学習効果の検証のため、異なる条件の下で実験授業を行い、RT 教材ツールを使用したグループが理解度、学力ともに向上し、統計的に有意性が確認され、摩擦現象に限られることではあるが、学力の向上につながる事が検証できた。

第4章では、摩擦現象だけでなく、高校物理の力学分野で学習する物理現象に広く対応可能なセンサを備えた物理学習支援用 RT 教材システムの設計と開発について示す。RT 教材システムを使用することにより、学習内容を五感を使って実感しながら学習することができる。この RT 教材システムは、高校物理力学分野で学習する物理量を計測、算出を可能にするのに十分な計測センサを搭載している。開発した教材ロボットの設計検証を行うため、等加速度直線運動と鉛直投げ上げ運動についての物理現象において計測実験を行い、各物理量を計測してその値に関して考察を行いその妥当性を検証した。

第5章では、開発した高校物理学習支援用 RT 教材について、異なる条件の下で3つの生徒のグループに円運動に関する授業を実施して学習効果を検証した。その結果、RT 教材システムを用いたグループは、理解度とテスト結果共に、円運動において学習効果に有意性が確認された。

今後の研究予定として、ディスプレイでの表示にとどまらず、Wi-Fi 環境など無線通信機能を用いて、外部端末から物理量の値やその関係式、数値をグラフ化した情報をモニタできるシステムを構築していきたい。また、センサのモジュール化を進めて授業内容に応じたセンサの種類や設置場所を容易に変更可能として、多くの教員の方々が日常の授業でも容易に使用しやすいものとなるよう改善を進めていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり，研究生としてお世話になって以来入学後も御指導をいただいている大阪電気通信大学 田中 宏明教授と 鄭 聖熹教授には御多忙な時間の中，多大なる御助言と御指導をいただきました．社会人大学院生ということで，いつも夜間などに御時間を調整していただきました．深く感謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたり大阪電気通信大学 兼宗 進教授には，御教示・御助言をいただき，深く感謝いたします．本論文の御審査を頂いた 宇田 豊教授に深く感謝の意を表します．

さらに，本研究を遂行するにあたり，多大なる御協力をいただきました 森田 敬介氏をはじめ人支援ロボティクス研究室（鄭研）の皆様にご心よりお礼申し上げます．

また，大阪電気通信大学高校 吉川 省吾先生，岸本 有生先生，角樋 大地先生，吉田 雅江先生には研究活動に御理解をいただき，日ごろの校務，検証授業を行う際には多大なる御協力を，ときには御助言をいただきました．深く感謝の意を表します．大阪電気通信大学高等学校の生徒の皆さんにはアンケートや検証授業，確認試験で協力をいただきました．特にメカトロニクス部部員の皆さんには製作作業等でお手伝いもしていただき，心から感謝いたします．

最後になりましたが，学校の職務の傍らで平日の夜間，休日と研究活動を続けてこれたのも日頃から協力していただいた家族のおかげです．深く感謝の意を表し，謝辞とさせていただきます．

参考文献

- [1] 広井 禎：「高校物理履修者の大きな減少」，物理教育，Vol.31，No.4，pp.240-241，1983
- [2] 渡辺 正紘：「共通一次試験の難化と高校教育への影響」，物理教育，Vol.37，No.2，pp.122-123，1989
- [3] ベネッセ教育総合研究所：「第5回学習基本調査 データブック [2015]」，pp.4-19，2015
- [4] 文部科学省：「高等学校教育の現状 参考資料 5」，pp.28-35，http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/047/siryo/_icsFiles/afieldfile/2013/06/14/1334827_6.pdf，（最終参照日 2018 年 1 月 14 日）
- [5] 文部科学省：「新しい学習指導要領の主なポイント（平成 14 年度から実施）」，http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/cs/1320944.htm，（最終参照日 2018 年 1 月 20 日）
- [6] 国立教育政策研究所編：「生きるための知識と技能 2 OECD 生徒の学習到達度調査 (PISA)2003 年調査国際結果報告書」，2004
- [7] 国立教育政策研究所編：「生きるための知識と技能 3 OECD 生徒の学習到達度調査 (PISA)2006 年調査国際結果報告書」，2007
- [8] 文部科学省：「高等学校学習指導要領解説 理科編」，2009
- [9] 国立教育政策研究所編：「生きるための知識と技能 6，OECD 生徒の学習到達度調査/PISA2015 年調査国際結果報告書」，2016
- [10] 井上 恵美，池田 幸夫：「理科に対する中学生の意識調査」，山口大学，教育実践総合センター研究紀要，Vol.25，pp.155-163，2008

- [11] 佐々木 信雄：「危機に瀕する理科教育－「理科嫌い・理科離れ」の原因はどこにあるのか－」，教師教育研究，Vol.4，pp.1-22，2008
- [12] 加藤 巡一：「理科教育と理科離れの実態(三) 高校生・まとめ」，研究紀要. 人文科学・自然科学篇，神戸松蔭女子学院大学学術研究会，Vol.50，pp.65-80，2009
- [13] 福原 行也，生澤 高典：「理科教育関連雑誌に見る「理科離れ」「理科嫌い」に関する論文の分析：日本理科教育学会「理科の教育」の場合」，筑波大学附属坂戸高等学校，研究紀要，Vol.45，pp.127-134，2008
- [14] 角谷 詩織：「有意義な理科の授業に必要な要素」，日本化学教育学会研究会研究報告，Vol.19，No.6，pp.77-81，2005
- [15] 内田 昭利，守 一雄：「中学生の「数学嫌い」「理科嫌い」は本当か－潜在意識調査から得られた教育実践への提言－」，兵庫教育大学大学院連合学校教育学研究科，教育実践学論集，Vol.13，pp.221-227，2012
- [16] 栗山 和広，平山 典子：「中学生の理科に対する好き嫌いの構成要因」，愛知教育大学研究報告. 人文・社会科学編，Vol.65，pp.1-7，2016
- [17] Lonie J. Rennie, Elsa Feher, Lynn D. Dierking, John H. Falk : "Toward an agenda for advancing research on science learning in out-of-school settings", Journal of Research in Science Teaching, Vol.40, pp.112-120, 2003
- [18] 大宮 輝雄，奥村 清：「高等学校における物理嫌いの要因についての一考察」，科学教育研究 Vol.18，No.4，pp.189-196，1994
- [19] 川村 康文：「構成主義的理科学習論に基づいた物理授業」，物理教育，Vol.46，No.5，pp.272-275，1998
- [20] 松原 静朗：「小学生-中学生-高校生の理科に対する意識」，化学と教育，Vol.49，No.5，pp.265-267，2001
- [21] 鶴岡 森昭，永田 敏夫，細川 敏幸，小野寺 彰：「大学・高校理科教育の危機：高校における理科離れの実状」，高等教育ジャーナル，北海道大学，No.1，pp.105-115，1996

- [22] 村山 功, 鈴木 宏明, 鈴木 高士, 杉本 卓:「教科理解の認知心理学」, 新曜社, pp.99-151, 1989
- [23] 中村 美知生, 荒木 紀幸:「「ものの動きとはたらき」に関する小学生から大学生に至る素朴概念の比較」, 兵庫教育大学教科教育学会紀要, Vol.12, pp.22-27, 1999
- [24] John Clement: "Students' preconceptions in introductory mechanics", American Journal of Physics, Vol.50, No.1, pp.66-70, 1982
- [25] 鈴木 亨:「誤概念を支える因果スキーマ」, 物理教育, Vol.56, No.1, pp.10-15, 2008
- [26] 川村 康文:「大学生にみる物理分野における素朴概念の実態」, 物理教育, Vol.48, No.1, pp.78-82, 2000
- [27] 川村 康文, 子安 増生:「力学法則における高校生の関心・意欲と理解度を高めるための実験演示法の開発」, Vol.22, No.1, pp.32-41, 1998
- [28] 吉野 巖, 小山 道人:「「素朴概念への気づき」が素朴概念の修正に及ぼす影響-物理分野の直落信念と MIF 素朴概念に関して」, 北海道教育大学紀要. 教育科学編, Vol.57, No.2, pp.165-175, 2007
- [29] 田中 照久, 定本 嘉朗:「高校における円運動に関する調査」, 物理教育, Vol.50, No.1, pp.8-10, 2002
- [30] 田中 照久, 定本 嘉朗:「円運動に関して生徒を科学的概念に導く教材開発」, 物理教育, Vol.50, No.2, pp.110-114, 2002
- [31] 田中 照久, 定本 嘉朗:「素朴概念の実態を基に開発した円運動教材を用いた授業実践」, 物理教育, Vol.51, No.2, pp.79-84, 2003
- [32] 加藤 伸明, 定本 嘉朗:「力の誤概念の解消を促す教材の開発と指導方法の改善」, 物理教育, Vol.59, No.3, pp.181-186, 2011
- [33] 山崎 翔平, 定本 嘉朗, 牧井 創:「MIF 素朴概念をなくす教材の開発と中学校での授業実践」, 物理教育, Vol.57, No.3, pp.215-219, 2009

- [34] 斉藤 浩一, 高橋 郷史:「理科離れ」の原因帰属に関するモデル作成の試み-高校生の意識調査をもとに-, 東京情報大学研究論集, Vol.9, No.1, pp.1-9, 2005
- [35] 山崎 敏昭, 井上 賢, 谷口 和成, 内村 浩:「高校物理実験の実態:2006年大学新入生からの分析」, 物理教育, Vol.55, No.1, pp.33-38, 2007
- [36] 山崎 敏昭, 井上 賢, 谷口 和成, 内村 浩:「高校物理実験の実態Ⅱ:2009年大学新入生調査の分析」, 物理教育, Vol.59, No.2, pp.101-107, 2011
- [37] 矢野 淳滋:「普通教室でできる物理の基本実験」, 物理教育, Vol.42, No.1, pp.55-68, 1994
- [38] 石原 武司:「物理教育における実験はどうあるべきか」, 物理教育, Vol.46, No.5, pp.276-280, 1998
- [39] 森本 雄一:「実験を物理教育にどのように取り込むか?」, 物理教育, Vol.57, No.4, pp.334-338, 2009
- [40] (独) 科学技術振興機構 理科教育支援センター, 国立教育政策研究所教育課程研究センター:「平成 20 年度高等学校理科教員実態調査報告書」, http://www.jst.go.jp/cpse/risushien/highschool/cpse_report_009.pdf (最終参照日 2018 年 1 月 21 日)
- [41] 三浦 登:「物理基礎」, 東京書籍, pp14-110, 2013
- [42] 三浦 登:「物理」, 東京書籍, pp6-96, 2013
- [43] 大宮 輝雄, 奥村 清:「高等学校における物理嫌いの要因についての一考察」, 科学教育研究, Vol.18, No.4, pp.189-196, 1994
- [44] 岡田 浩之, アツアンヤ 亜伊子, 大森 隆司, 福田 清, 水野 真:「ロボット工房における理科教育・工学教育」, 玉川大学工学部紀要, No.47, pp.11-17, 2012
- [45] 筒井和幸, 本管正嗣:「高校物理における PC 計測システムの活用方法について」, 大阪教育大学附属高等学校池田校舎 研究紀要, Vol.43, pp.35-40, 2010
- [46] 竹中 真希子, 山口 悦司, 稲垣 成哲:「CSCL:理科教育におけるコンピュータ利用の新しい研究動向」, 科学教育研究, Vol.29, No.2, pp.157-172, 2005

- [47] 山崎 敏昭, 谷口 和成, 古結 尚, 酒谷 貴史, 山口 道明, 岩間 徹, 笠 潤平, 内村 浩, 村田 隆紀:「高校物理に導入したアクティブ・ラーニングの効果と課題」, 物理教育, Vol.61, No.1, pp.12-17, 2013
- [48] 沖野 信一, 山岡 武邦, 松本 伸示:「科学的概念の形成をめざした理科授業開発ー作用・反作用の法則に関する指導法に焦点化してー」, 理科教育学研究, Vol.57, No.2, pp.103-114, 2016
- [49] 小林 道夫:「ロボット教材を活用した STEM 教育の実践」, 神奈川大学心理・教育研究論集, Vol.31, pp.77-86, 2012
- [50] Sullivan Amanda, R Kazakoff Elizabeth, Umashi Bers Marina : "The wheels on the bot go round and round: Robotics curriculum in pre-kindergarten", Journal of Information Technology Education, Vol.12, pp.203-219, 2013
- [51] Gourlay H, Dillon J : "Research and Trends on Science Teacher Education in England", Journal of Science Education in Japan, Vol.37, No.2, pp.88-98, 2013
- [52] H Altin, M Pedaste : "Learning approaches to applying robotics in science education", Journal of baltic science education, vol.12, No.3, pp.365-377, 2013
- [53] Amy Eguchi : "RoboCupJunior for promoting STEM education, 21st century skills, and technological advancement through robotics competition", Robotics and Autonomous Systems, Vol.75, pp.692-699, 2016
- [54] Sarantos Psycharis, Evi Makri-Botsari, Georgios Xynogalas, "The use of Educational Robotics for the teaching of Physics and its relation to self-esteem", Workshop Proceedings of SIMPAR 2008, pp.132-142, 2008
- [55] 谷口 博士, 近森 憲助:「ストレーンゲージを用いた摩擦力の測定」, 物理教育, Vol.38, No.2, pp.96-99, 1990
- [56] 山田 達之輔:「センサーを使った実験と高校物理の新しい構成」, 第 22 回物理教育研究大会, 日本物理教育学会, pp.134-137, 2005
- [57] JAPAN ROBOTTECH : <https://sites.google.com/site/japanrobotech2/home/> (参照日 2017 年 12 月 18 日)

- [58] LEGO.com エデュケーションサイト : <https://education.lego.com/ja-jp>(参照日 2017 年 12 月 18 日)
- [59] 株式会社ダイセン電子工業 : <http://www.daisendenshi.com/> (参照日 2017 年 12 月 18 日)
- [60] ヴイストーン株式会社 : <https://www.vstone.co.jp/> (参照日 2017 年 12 月 18 日)
- [61] 野村 法雄, 中山 迅, 秋山 博臣 : 「模型自動車を用いた摩擦実験の教材化 : タイヤが滑りだすときの摩擦力の変化と摩擦係数の測定」, 日本理科教育学会九州支部大会発表論文集, Vol.38, pp.37-40, 2010
- [62] 百瀬 貴暁, 伊倉 良明, 石原 敦, 中原 真也, 鎌田 暁, 新井 健司 : 「公立中学校・理科連携授業における教材ロボットの利用」, 日本理科教育学会関東支部大会研究発表要旨集, Vol.53, pp.97, 2014
- [63] 石原 敦, 百瀬 貴暁, 伊倉 良明, 中原 真也, 新井 健二 : 「公立中学校・理科連携授業における教材ロボットの利用—50 分のたからもの—」, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.8, 2015
- [64] 根本 和昭 : 「物理教育で用いる量概念の捉えやすさについて」, 日本科学教育学会, 第 18 回年会論文集, pp227-228, 1994
- [65] 遠山 啓 : 「量とは何か I」, 太郎次郎社, 1978
- [66] 遠山 啓 : 「量とは何か II」, 太郎次郎社, 1981
- [67] 国際単位系 (SI) 日本語版刊行委員会 : 「国際単位系 (SI) の要約日本語版」, 独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, pp1-4, 2006
- [68] 上田 拓治 : 「44 の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方」, オーム社, 2009
- [69] 三浦 裕一 : 「科学的概念を構築するための科学教育の試み : 講義と融合した学生実験の企画と導入法」, 名古屋高等教育研究, Vol.10, pp.39-58, 2010
- [70] 数研出版編集部編 : 「リード light ノート物理」, 数研出版, pp.14-110, 2016

付 録 A

A.1 Chapter 2 の詳細データ

Table. A.1 Confirmation test results details conducted before and after class about Group A and B in Chapter 2

Group	student no.	results of regular physical class	confirmation test point		
			before	after	difference
A	1	61	0	38	38
	2	34	0	19	19
	3	55	0	38	38
	4	44	5	24	19
	5	42	5	38	33
	6	47	0	14	14
	7	50	0	38	38
	8	24	5	19	14
	9	84	14	24	10
	10	32	5	33	29
	11	55	5	24	19
	12	26	0	14	14
	13	71	38	86	48
	14	88	10	24	14
	15	41	5	14	10
	16	41	0	33	33
B	1	59	0	71	71
	2	47	0	52	52
	3	27	0	33	33
	4	23	5	52	48
	5	71	0	48	48
	6	51	0	43	43
	7	56	0	33	33
	8	29	5	48	43
	9	66	14	81	67
	10	40	0	38	38
	11	44	0	43	43
	12	41	10	48	38
	13	52	14	62	48
	14	63	0	43	43
	15	55	5	10	5
	16	59	0	33	33

Table. A.2 Questionnaire results details conducted after class about Group A and B in Chapter 2

Group	student	Question no.			
	no.	Q1	Q4	Q5	Q6
A	1	2			
	2	1			
	3	2			
	4	2			
	5	3			
	6	2			
	7	3			
	8	2			
	9	3			
	10	2			
	11	3			
	12	3			
	13	3			
	14	4			
	15	3			
	16	3			
B	1	4	5	5	5
	2	4	4	4	4
	3	2	3	2	2
	4	5	5	5	5
	5	3	3	3	3
	6	2	2	2	2
	7	3	2	3	2
	8	3	3	3	3
	9	5	5	5	5
	10	3	3	3	3
	11	1	1	1	1
	12	2	1	3	3
	13	4	3	4	5
	14	3	3	2	4
	15	3	3	3	3
	16	3	3	3	3

Table. A.3 Confirmation test results details conducted before and after class about Group C and D in Chapter 2

Group	student no.	results of regular physical class	confirmation test point		
			before	after	difference
C	1	41	0	48	48
	2	39	5	81	76
	3	85	24	100	76
	4	36	10	71	62
	5	41	0	14	14
	6	64	5	24	19
	7	46	0	81	81
	8	55	0	57	57
	9	46	5	86	81
	10	44	0	19	19
	11	48	0	52	52
	12	27	0	62	62
	13	55	0	57	57
	14	40	0	62	62
	15	71	5	95	90
	16	68	5	90	86
D	1	45	5	24	19
	2	54	0	38	38
	3	27	0	38	38
	4	56	0	43	43
	5	74	14	52	38
	6	28	0	62	62
	7	46	10	24	14
	8	40	0	52	52
	9	55	0	38	38
	10	53	0	24	24
	11	18	5	43	38
	12	41	0	38	38
	13	72	48	81	33
	14	50	0	48	48
	15	62	0	38	38
	16	62	10	52	43

Table. A.4 Questionnaire results details conducted after class about Group C and D in Chapter 2

Group	student	Question no.				
	no.	Q1	Q4	Q5	Q6	Q7
C	1	4	4	4	4	4
	2	5	5	5	5	5
	3	3	5	4	4	5
	4	3	3	3	3	3
	5	3	3	4	3	5
	6	4	4	4	4	3
	7	4	5	3	4	4
	8	3	3	3	4	4
	9	3	4	4	4	5
	10	3	4	4	4	5
	11	3	3	3	3	3
	12	4	3	3	4	4
	13	5	4	4	4	5
	14	4	3	4	5	5
	15	3	3	4	4	2
	16	4	5	4	4	5
D	1	4	4	4	4	5
	2	4	4	4	4	4
	3	4	5	5	5	5
	4	4	3	4	4	4
	5	2	2	2	4	1
	6	4	4	3	3	4
	7	3	3	3	3	3
	8	3	4	5	5	4
	9	4	5	5	5	5
	10	3	3	3	3	3
	11	3	3	3	3	3
	12	4	4	3	5	4
	13	3	3	3	3	3
	14	4	5	5	4	5
	15	3	4	3	4	4
	16	4	4	4	4	4

A.2 Chapter 3 の詳細データ

Table. A.5 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group A in Chapter 3

G r o u p	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before				after				difference			
			Q1	Q2	Q3	All	Q1	Q2	Q3	All	Q1	Q2	Q3	All
A	1	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	90	0	0	0	0	17	0	0	17	17	0	0	17
	3	80	0	0	0	0	17	0	7	24	17	0	7	24
	4	93	0	0	0	0	17	0	17	34	17	0	17	34
	5	88	0	0	0	0	33	0	0	33	33	0	0	33
	6	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	81	0	0	0	0	33	3	20	56	33	3	20	56
	8	95	33	17	10	60	13	0	0	13	-20	-17	-10	-47
	9	55	33	3	3	39	13	3	10	26	-20	0	7	-13
	10	53	17	0	0	17	34	0	0	33	17	0	0	16
	11	74	30	0	0	30	13	3	3	19	-17	3	3	-11
	12	87	33	33	34	100	33	33	34	100	0	0	0	0
	13	76	33	0	0	33	20	3	20	43	-13	3	20	10
	14	45	30	0	7	37	3	3	10	16	-27	3	3	-21
	15	73	33	3	10	46	33	3	33	69	0	0	23	23
	16	61	0	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	3
	17	46	3	3	0	6	33	0	0	33	30	-3	0	27
	18	71	10	0	0	10	3	3	20	26	-7	3	20	16

Table. A.6 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group B in Chapter 3

Group	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before				after				difference			
			Q1	Q2	Q3	All	Q1	Q2	Q3	All	Q1	Q2	Q3	All
B	1	73	0	0	0	0	17	7	7	31	17	7	7	31
	2	99	0	0	0	0	23	7	17	47	23	7	17	47
	3	91	33	33	24	90	24	33	33	90	-9	0	9	0
	4	86	0	0	0	0	33	17	0	50	33	17	0	50
	5	91	0	0	0	0	17	17	23	57	17	17	23	57
	6	46	0	0	0	0	20	3	0	23	20	3	0	23
	7	65	3	0	0	3	13	0	0	13	10	0	0	10
	8	86	33	4	0	37	3	0	20	23	-30	-4	20	-14
	9	59	13	4	0	17	13	3	10	26	0	-1	10	9
	10	73	0	0	0	0	33	0	0	33	33	0	0	33
	11	76	30	3	10	43	30	3	10	43	0	0	0	0
	12	61	3	0	0	3	33	3	10	46	30	3	10	43
	13	55	0	3	0	3	0	3	10	13	0	0	10	10
	14	75	23	33	24	80	33	33	34	100	10	0	10	20
	15	79	0	0	0	0	30	33	20	83	30	33	20	83
	16	34	0	0	0	0	33	3	4	40	33	3	4	40
	17	70	0	0	0	0	33	3	4	40	33	3	4	40
	18	81	3	3	4	10	33	3	20	56	30	0	16	46

Table. A.7 Questionnaire of friction phenomena results details conducted after class about Group A in Chapter 3

Group	student	Question no.				
	no.	Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
A	1	4	5	2	5	
	2	3	2	2	2	
	3	5	3	3	2	
	4	5	3	3	2	
	5	5	5	5	5	
	6	3	3	3	2	
	7	5	5	5	5	
	8	3	3	3	3	
	9	4	4	3	4	
	10	3	3	3	3	
	11	4	4	4	5	
	12	4	3	3	3	
	13	4	4	4	4	
	14	4	4	4	4	
	15	5	5	5	5	
	16	5	5	5	5	
	17	4	4	3	4	
	18	5	5	5	5	

Table. A.8 Questionnaire of friction phenomena results details conducted after class about Group B in Chapter 3

Group	student	Question no.				
	no.	Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
B	1	3	4	5	5	4
	2	5	5	5	3	5
	3	4	5	3	4	5
	4	4	4	4	4	4
	5	3	4	3	3	2
	6	4	4	4	5	4
	7	3	4	3	2	3
	8	3	3	3	3	4
	9	4	4	3	3	4
	10	4	5	4	4	4
	11	4	4	4	4	4
	12	5	4	4	5	5
	13	4	5	4	4	5
	14	5	4	4	5	5
	15	4	5	5	5	5
	16	2	3	3	4	2
	17	4	4	5	5	5
	18	5	5	5	5	5

A.3 Chapter 5 の詳細データ

Table. A.9 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group A in Chapter 5

G r o u p	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before						after					
			All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration	All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration
		100	100	20	35	25	20	Direction	100	20	35	25	20	Direction
A	1	99	15	0	15	0	0	エ	70	20	15	25	10	エ
	2	68	0	0	0	0	0	ウ	90	20	35	25	10	エ
	3	62	0	0	0	0	0	ウ	20	10	0	10	0	ウ
	4	41	0	0	0	0	0	-	100	20	35	25	20	エ
	5	85	0	0	0	0	0	ウ	80	20	15	25	20	エ
	6	95	10	0	0	10	0	ウ	100	20	35	25	20	エ
	7	96	25	0	15	0	10	エ	90	20	25	25	20	エ
	8	79	0	0	0	0	0	ウ	90	20	35	25	10	エ
	9	78	35	0	35	0	0	エ	55	20	0	25	0	イ
	10	87	0	0	0	0	0	ウ	100	20	35	25	20	エ
	11	65	0	0	0	0	0	-	60	15	15	10	20	エ
	12	83	0	0	0	0	0	ウ	90	20	35	25	10	エ
	13	48	0	0	0	0	0	ウ	40	10	0	10	20	ウ
	14	94	25	0	25	0	0	エ	95	15	35	25	20	エ
	15	89	0	0	0	0	0	ウ	90	20	25	25	20	エ

Table. A.10 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group B in Chapter 5

G r o u p	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before						after					
			All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration	All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration
		100	100	20	35	25	20	Direction	100	20	35	25	20	Direction
B	1	54	0	0	0	0	0	ウ	65	20	0	25	20	ウ
	2	90	0	0	0	0	0	ウ	45	20	0	20	0	ウ
	3	94	18	8	10	0	0	エ	40	0	30	10	0	エ
	4	99	0	0	0	0	0	ウ	65	20	0	25	20	ウ
	5	49	0	0	0	0	0		10	0	0	10	0	ウ
	6	66	0	0	0	0	0	ア	20	10	0	10	0	ウ
	7	79	0	0	0	0	0	ウ	45	20	0	25	0	ウ
	8	29	0	0	0	0	0	ウ	0	0	0	0	0	ウ
	9	95	0	0	0	0	0	ウ	15	0	0	5	10	ウ
	10	87	25	15	0	0	10	エ	65	20	0	25	20	ウ
	11	76	10	0	0	0	10	ウ	0	0	0	0	0	ウ
	12	71	15	0	15	0	0	エ	40	20	0	10	10	ウ
	13	96	15	0	15	0	0	エ	75	20	30	25	0	エ
	14	80	0	0	0	0	0	ウ	30	10	0	0	20	ウ
	15	99	55	0	35	10	10	エ	100	20	35	25	20	エ

Table. A.11 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group C in Chapter 5

G r o u p	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before						after					
			All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration	All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration
		100	100	20	35	25	20	Direction	100	20	35	25	20	Direction
C	1	82	0	0	0	0	0	-	30	0	0	10	20	ウ
	2	74	0	0	0	0	0	ウ	15	5	0	10	0	ウ
	3	60	0	0	0	0	0	ウ	85	20	20	25	20	ウ
	4	85	0	0	0	0	0	ウ	30	10	10	10	10	イ
	5	87	0	0	0	0	0	ウ	45	0	35	10	0	エ
	6	66	0	0	0	0	0	ア	20	0	0	10	10	ウ
	7	71	0	0	0	0	0	ウ	55	10	15	10	20	ウ
	8	66	0	0	0	0	0	ウ	65	10	25	10	20	エ
	9	71	0	0	0	0	0	ウ	65	20	0	25	20	ウ
	10	70	0	0	0	0	0	ウ	30	10	0	10	10	ウ
	11	96	0	0	0	0	0	ウ	65	20	5	20	20	ウ
	12	85	0	0	0	0	0	ウ	35	5	0	10	20	ウ
	13	69	0	0	0	0	0	イ	55	20	35	0	0	エ
	14	70	0	0	0	0	0	ウ	50	5	0	25	20	イ
	15	89	15	0	15	0	0	エ	35	5	0	10	20	ウ

Table. A.12 Confirmation test of friction phenomena results details conducted before and after class about Group D in Chapter 5

G r o u p	no.	results of regular physical class	confirmation test point											
			before						after					
			All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration	All	Q1	Q2,3	Q4	Q5,6	Acceleration
		100	100	20	35	25	20	Direction	100	20	35	25	20	Direction
D	1	67	0	0	0	0	0	-	10	0	0	10	0	イ
	2	66	0	0	0	0	0	イ	10	10	0	0	0	ウ
	3	67	0	0	0	0	0	イ	100	20	35	25	20	エ
	4	78	0	0	0	0	0	ウ	70	20	5	25	20	ウ
	5	65	0	0	0	0	0	ウ	45	20	0	25	0	ウ
	6	93	0	0	0	0	0	ウ	35	0	0	25	10	ウ
	7	67	0	0	0	0	0	ウ	60	0	35	25	0	エ
	8	82	0	0	0	0	0	ウ	52	15	0	17	20	ウ
	9	71	0	0	0	0	0	ウ	40	0	10	10	20	ウ
	10	65	0	0	0	0	0	ウ	32	15	0	17	0	イ
	11	84	0	0	0	0	0	ウ	52	15	0	17	20	ウ
	12	70	15	0	15	0	0	エ	25	5	0	10	10	イ
	13	81	0	0	0	0	0	ウ	65	20	0	25	20	ウ
	14	65	15	0	15	0	0	エ	35	5	10	10	10	ウ
	15	76	0	0	0	0	0	ウ	25	5	0	10	10	ウ

Table. A.13 the questionnaire results about Group A in Chapter 5

G r o u p	no.	questionnaire							
		results							
		Q1	Q3	Q4	Q5	Q6	Q8	Q9	Q10
A	1	4	4	4	5	4	5	5	5
	2	4	4	4	5	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	4	4	4
	4	4	3	4	4	4	5	4	5
	5	4	2	4	3	2	2	3	2
	6	5	5	5	4	5	4	4	4
	7	3	2	4	4	4	3	4	4
	8	4	3	5	5	5	5	5	5
	9	4	5	5	5	5	5	5	5
	10	4	5	5	5	5	4	5	5
	11	4	3	4	4	4	4	4	4
	12	3	4	5	4	4	3	4	3
	13	5	5	5	5	5	5	5	5
	14	5	3	4	5	4	4	5	4
	15	5	5	5	4	4	3	4	4

Table. A.14 the questionnaire results about Group B in Chapter 5

G r o u p	no.	questionnaire				
		results				
		Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
B	1	5	5	5	4	4
	2	4	5	4	5	5
	3	4	4	4	3	4
	4	4	3	4	5	5
	5	4	5	5	4	4
	6	5	5	5	5	5
	7	5	5	5	5	4
	8	3	4	3	2	
	9	4	4	4	3	3
	10	5	5	5	5	5
	11	3	4	3	3	3
	12	4	4	3	5	3
	13	4	4	4	3	3
	14	3	3	3	3	4
	15	5	5	5	5	5

Table. A.15 the questionnaire results about Group C in Chapter 5

G r o u p	no.	questionnaire				
		results				
		Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
C	1	2	3	4	3	3
	2	3	3	4	3	2
	3	4	3	4	3	3
	4	4	5	5	4	4
	5	5	5	5	5	5
	6	2	2	2	2	2
	7	3	3	3	3	3
	8	3	5	5	4	4
	9	3	1	3	1	3
	10	3	4	5	5	4
	11	3	2	2	3	2
	12	4	3	2	2	2
	13	4	4	5	4	3
	14	1	3	3	3	3
	15	3	3	4	2	3

Table. A.16 the questionnaire results about Group D in Chapter 5

G r o u p	no.	questionnaire				
		results				
		Q1	Q3	Q4	Q5	Q6
C	1	4	4	4	4	4
	2	2	2	4	1	1
	3	4	5	4	3	5
	4	4	4	5	3	5
	5	3	4	4	3	3
	6	4	5	5	4	5
	7	3	1	1	2	2
	8	4	5	5	4	4
	9	3	5	5	5	5
	10	4	3	5	4	3
	11	5	5	5	5	5
	12	4	4	4	4	4
	13	3	3	5	3	3
	14	2	3	3	4	4
	15	4	5	5	5	5

A.4 RT教材 Arduino シールド回路図

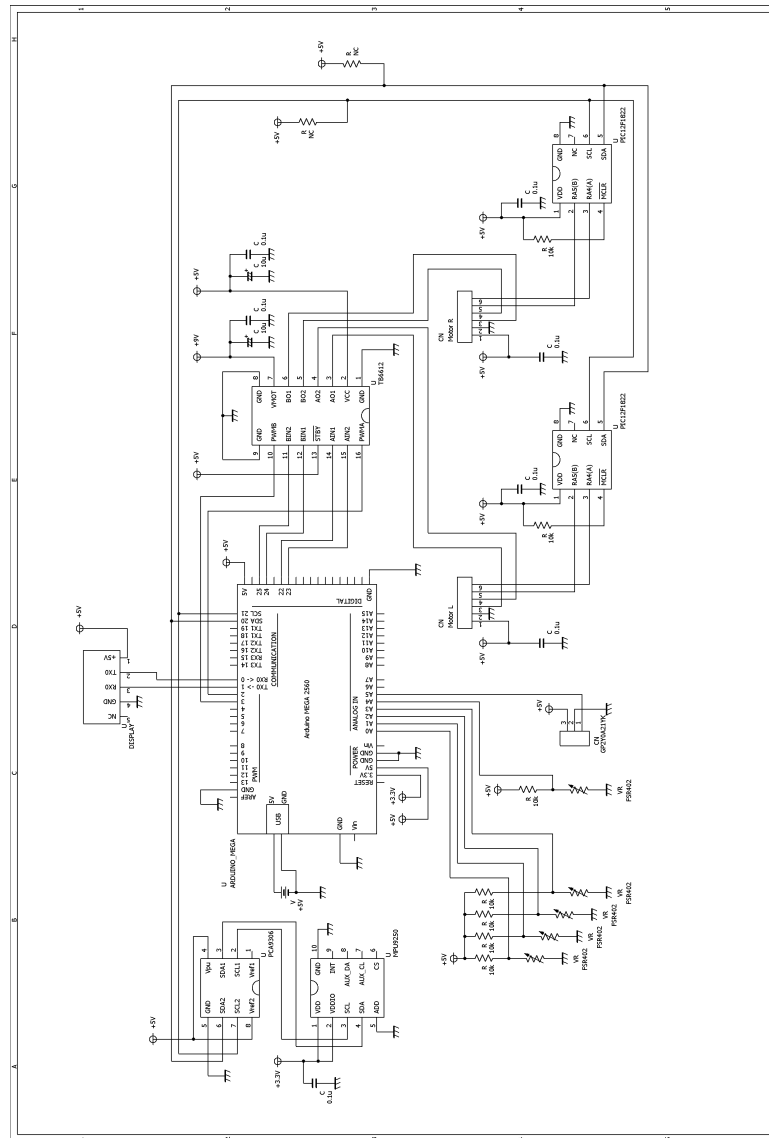


Fig. A.1 The electric circuit of RT educational tool