

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	受動車輪を用いた教育用魚型 1 自由度グライド推進移動体の開発 座 学を実学として実感できる高校生向けロボット教材
Title	Development of an Educational Fish-like 1-DOF Gliding Locomotion Robot with Passive Wheels -An Educational Tool to Bridge a Classroom Lecture and a Hands-on Experience for Highschool Students-
著者(和文)	遠藤玄, 広瀬茂男, 山田浩也
Authors	Gen Endo, Shigeo Hirose, Hiroya Yamada
出典 / Citation	日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 2, pp. 124-132
Citation(English)	Journal of Robotics Society of Japan, Vol. 31, No. 2, pp. 124-132
発行日 / Pub. date	2013, 3
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2013 The Robotics Society of Japan.

受動車輪を用いた教育用魚型1自由度グライド推進移動体の開発 —座学を実学として実感できる高校生向けロボット教材—

遠藤 玄* 広瀬 茂男* 山田 浩也*

Development of an Educational Fish-like 1-DOF Gliding Locomotion Robot with Passive Wheels

—An Educational Tool to Bridge a Classroom Lecture and a Hands-on Experience
for Highschool Students—

Gen Endo*, Shigeo Hirose* and Hiroya Yamada*

This paper proposes an 1-DOF gliding locomotion robot named “Gyotaro-IIIa” as an educational robot. Gliding locomotion is one of propulsion method, which utilizes the difference of friction between the normal direction and tangential direction. Since this propulsion has interesting features in both physical aspect and engineering aspect, we think that gliding locomotion robot can be a good stimulus of student’s curiosity for engineering. We developed a prototype of gliding locomotion robot with one RC servo motor, radio controller and receiver. Finally we used it in a robot lecture which aimed to bridge a classroom lecture and a hands-on experience in order to promote science education.

Key Words: Gliding Locomotion, Educational Robot, Hands-on Experience

1. はじめに

学生の理科離れが問題視される現在、ロボットを題材として理科系教育を推進する教育プログラムが数多く実施されているが[1]、その多くは単に市販のキットを指示どおり組み立てるのみである。またこうしたプログラムで製作するロボットは独立2輪駆動型車両ロボット[2]や、リンク機構により定型動作を行う歩行ロボット[3]などが主であり、低価格で入手性は高いものの運動の原理自体は簡潔で工夫の余地が乏しく、仮に操縦するにしてもすぐに習熟できてしまうものであった。このような教材を用いたプログラムは理工系科目への興味を惹くための導入としては適当であるが、日々の理科系授業への学習意欲の向上に直接繋がっているかは疑問が残る。またこれらのプログラムのほとんどは小中学生を対象としており、本来進路選択に最も影響がある高校生を対象とした教育プログラム・教材は大変に乏しい状況である。

筆者らは報告書[4]において市販されているロボット教材の調査を行ったが、工業高校・高等専門学校の講義の一環として特別に開発された実習教材は散見されるものの、普通科の高校生を対象とした教材は実際見つけることができなかった。この

理由を教材開発・販売を行うメーカーにヒアリングしたところ、「高校生は受験勉強に忙しく、通常の座学講義の枠を外れた授業は普通科高校では行い難い。したがって体験的な教育プログラムは部活動などの課外活動として行うほかなく、その結果、販売したとしても数量が出ないため採算が取れない」との回答であった。

しかしながら、こうした大学受験のための知識詰め込み型の教育こそが昨今の理工系離れを引き起こしたのではないだろうか？例えば高校数学Iの三角関数では多くの公式を暗記することになるが、それらが実際にどのように役立つのか、具体的な応用例が示されず、また実体験もないがゆえに、多くの学生たちは実生活に無関係な無味乾燥なものと誤解し、その結果学習意欲を失ってしまうのではなからうか？もし学生たちが自らの手で動かし、試行錯誤し、改良することのできる教材があり、それが日々の座学の講義と直接的な関係を持っていることが体験的に理解できるならば、理工系講義をより能動的に興味を持って学習できるのではないかと筆者らは考える。同様の動機から小平らは産業用ロボット、古田らは独立2輪駆動型車両を題材とした高校生向け講義を実施している[5][6]。

本論文ではヘビや魚の推進原理に基づき、RCサーボモータ1自由度でありながら進行方向と速さを制御できる魚型グライド推進移動体“魚太郎 IIIa 号機”を開発する(Fig. 1)。本移動体は本体に対して互いに屈曲する前後アームと、本体および前後アーム下部に設置され駆動力を持たない首振り受動キャスト

原稿受付 2012年2月1日

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

■本論文は提案性で評価されました。

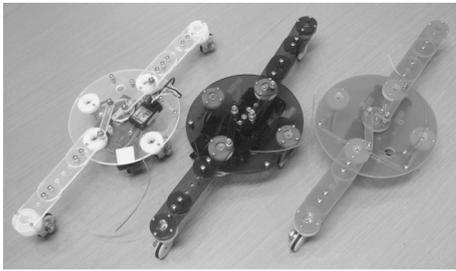


Fig. 1 Overview of "Gyotaro IIIa"

を用いることで、水平面上を泳ぐように滑走することができる。その推進の様子はあたかも魚のようであり大変興味を惹く動きであることから、学生たちの知的好奇心を刺激することができる。また通常の能動車輪型の移動ロボットとは異なり、屈曲操作により生成される推進運動が自明ではなく、操縦の習熟や、改良のための体験的な試行錯誤が必須である点も特徴である。

そしてこの移動体の組み立てと、速度を最大化するための改良を行う課題を通して、高校の座学で習う数学・物理との関連を直接的に示す教材を開発する。これによりモノづくりの実体験と高校で習う講義との間を結び付け、普段の講義により高い学習意欲をもって臨めるようになることが期待できる。さらに本教材を用いたロボット教室を実施し、参加者にアンケート調査を行うことで本教材の教育効果について考察する。

2. 魚太郎 IIIa 号機の開発

2.1 推進原理

筆者らは「直交する 2 軸方向に働く抗力の差を利用した推進」をグライド推進と名付け、それを利用した移動体を提案してきた [7]。グライド推進の例としては魚の鱗やヘビの蛇行、アイススケートやローラースケートなどが挙げられる。

Fig. 2 に提案するグライド推進移動体の推進原理を示す。説明のため前輪がボールキャスタ、後 2 輪が首振り受動キャスタであるモデルを考える (Fig. 2(a))。受動車輪を保持する部材とボディの間にはバネが取り付けられており、常に車輪が進行方向 X に揃うように調整されている。

バネが伸ばされて受動車輪が左右対称に θ をなすときを考える (Fig. 2(b))。このとき車輪接地点には F_n の力が働く。この反力は F_x, F_y に分解されるが、 F_y は左右の対称性から相殺され F_x のみが残る。これが推進力となり X 方向に進み最終的には (a) の平衡状態に達し停止する。すなわちバネに蓄えられたエネルギーは X 正方向の運動エネルギーに変換される。

次にこの首振りキャスタを前 1 輪・中 2 輪・後 1 輪の菱形に配置し、進行方向に対して受動車輪が同じ大きさで Fig. 2(c) のように傾いた場合を考える。このような配置でも F_y やそれによるボディへのモーメントは相殺され F_x のみが残る、結果、 X 方向に直進する。

そこで Fig. 2(d) に示すように前後アームを能動的に同じ角度で屈曲すれば、前後の首振りキャスタに受動的に同じ大きさ

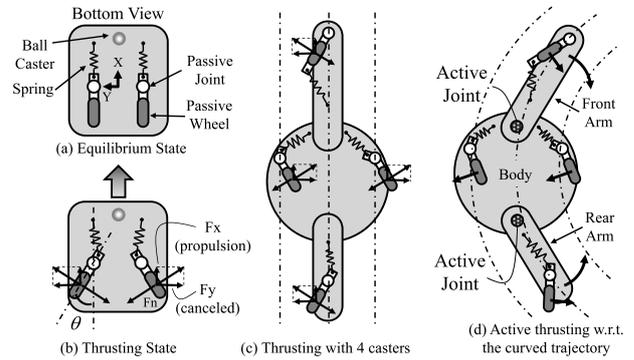


Fig. 2 Qualitative explanation of the locomotion principle

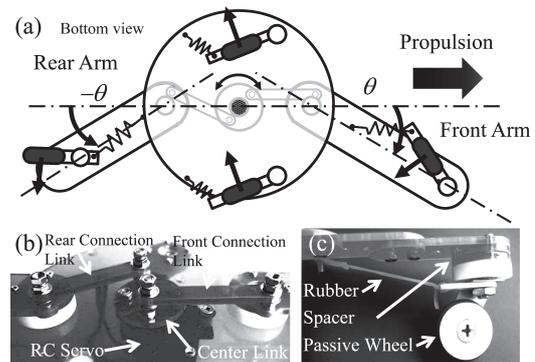


Fig. 3 Basic configuration: (a) structure (black circle: active joint, white circle: passive joint, servo motor is not shown here), (b) link mechanism, (c) passive caster

の首振り角度を持たせることができる。また前後アームの能動屈曲の反力を受け、ボディの首振りキャスタは前後のキャスタと逆方向に同じ角度だけ屈曲する。また移動体の推進方向は屈曲角度に応じた円弧軌道となる。したがってこの屈曲を左右で繰り返せば平均的には直進することになり、屈曲の振動数と振幅に依存して推進速度が調節できる。また屈曲の中心角度を左右どちらかにオフセットさせれば旋回動作も可能となる。これは索状能動体“ACM-III”の操舵法と同一である [8]。

2.2 機構設計

開発した“魚太郎 IIIa 号機[†]”は本体と前後アームで構成され、各部材の下にはバネで首振り軸周りにコンプライアンスを持たせた受動キャスタが取り付けられている (Fig. 3(a))。標準的な大きさは全長 335 [mm]、全幅 130 [mm]、全高 70 [mm] (アンテナ部含まず)、質量は 385 [g] である。

本体中央底面には RC サーボモータが取り付けられ、その回転を上面の前後連結リンクを介して前後アームに伝達している (Fig. 3(b))。後連結リンクを斜めに架け渡すことで前後で対称の屈曲角になるよう設計した (後述)。また首振り受動キャスタは、車輪軸とねじれの位置にある首振り軸を持ちそのオフセットは 10 [mm] である。各受動キャスタは、アームまたはボディと引きバネで接続されている。バネは定数の調整の容易さと入手性から輪ゴムを用いている (Fig. 3(c))。

受動車輪、キャスタ軸、アーム関節軸は試作検討の段階で軸方向ガタがあると有効に推力を発生できないことが分かった。な

[†]I 号機は後アームのみ、II 号機は前後アームで対称駆動であるが、ボディ下部の受動車輪は推進方向に転がり方向が固定されていた。いずれも推進速度は小さく、改良を重ねた結果、IIIa 号機の形態となった。

るべく安価で加工性の高い部品を探した結果、引き戸用の軸付き樹脂ベアリングが単価 100 円前後で入手できることが分かったため [9]、これを追加工して用いることとした。受動車輪は U 溝戸車に O リングを嵌めている。主要な構造部材は当初は板厚 2 [mm] の A5052 板材で構成していたが [10]、低コスト化と高校生自身による改造のしやすさを考え、汎用的な手工具で加工可能な板厚 3 [mm] のアクリル板に変更した [11]。なおアクリル板は同価格帯で様々な色が販売されており、学生の好みの色を選択することが可能であり、より魅力的な教材とすることができる。また組立て後にアームの長さや四つの受動車輪への荷重分布など、性能向上のため改良・調整できる余地があることが望ましい。そこで部品数は増えるが、前後アームを取って 3 分割化し、中間部品の長さを変えることでアーム長を、受動キャスタとアームの間に板厚の薄い複数のスペーサを挟むことで車輪への荷重分布を、それぞれ調整できるような構成とした。

制御系としては最も一般的なラジオコントロールを選択した。RC サーボモータはロボット制御の基本であるサーボの概念を解説する上でも良い教材である。安価で高剛性な GWS 社製 RC サーボモータ [12] を選定した。送受信機は 1ch で十分であるが、適切なものが入手できなかったため、最も安価な 2ch の製品 (実売価格: 6,000 円程度) を選択した [13]。

25 台を試作し、その部品コストは 1 台あたり 12,000 円程度である[†]。

2.3 動作実験

ビニル床シート平面上で“魚太郎 IIIa 号機”を動作させたときの様子を Fig. 4 に示す。推進と操舵が密接に関連しているため、思いどおりに操縦するためには練習が必要であったが、徐々に慣れるにつれ操縦者は送信機右側のレバーを左右に適切なタイミングで往復させることで所望の速さ・方向に推進させることができた。

Fig. 4 の左図は直進の様子であり、線はスタート位置を示している。アームの往復運動によりロボットが推進していることが確認できる。またアームの往復運動にオフセットを加えることで旋回動作が可能であることも確認した (Fig. 4 右)。走行路面にもよるが最大の推進速度はおよそ 0.5 [m/s]、最小回転半径は 0.25 [m]、単 3 電池 4 本 (SANYO: eneloop) での動作時間はおよそ 4.5 時間であった。

本ロボットはアームの往復運動と、それによりバネに蓄えられたエネルギーが解放されることによって推進することから、適切な振幅・振動数が存在する。実際アームの往復運動が小さすぎれば推進せず、大きすぎれば蛇行が大きくなり直進性が低下した。また往復運動を徐々に速くすると、始めは推進速度が上昇していくものの、速すぎると逆に推進速度が低下する様子が確かめられた。さらにこれらの運動は首振りキャスタに付加するバネの特性や、アーム長、四つのキャスタへの荷重分布によって大きく変化することも確かめられ、調整が適切でなければまったく推進できなくなる場合もあることが分かった。

このように操作の習熟や調整など多くの試行錯誤が必要であ

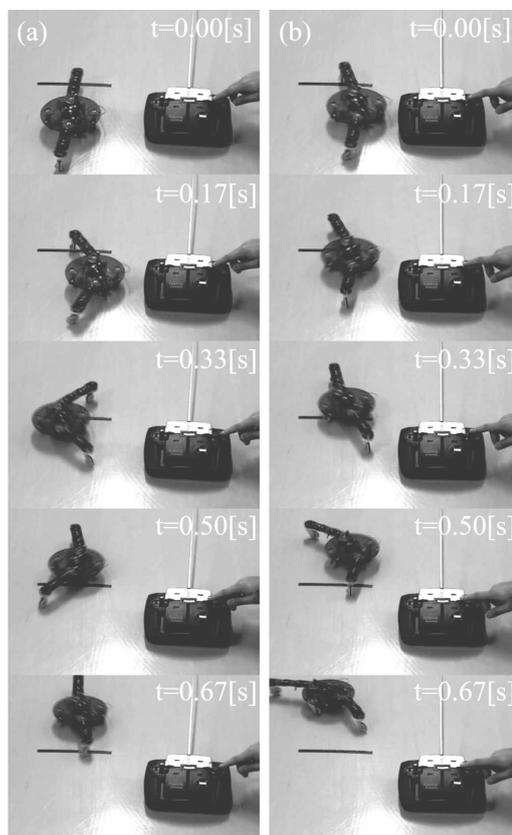


Fig. 4 Propulsion of “Gyotaro-IIIa” ((a): moving forward, (b): turn)

ることは、その過程で学生の観察眼や論理的思考を育むことができることから大きな利点であると考えている。

3. 教育プログラムの開発

しばしば指摘されるように、提供されたロボットキットを組み立てて単に喜んでいるだけでは、遊びと何ら変わりがない。本教材では単に組み立てるだけの体験からより深く踏み込み、学生自ら能動的に手を動かし、その結果を観察・考察し、さらに改良して行くという工学的手法の基礎を肌感覚で体験することを重視する。そしてその課程で経験的に得た結果が、普段の座学で学習する内容とどのように関係するのか、具体的に解説することで座学と実学を結びつける。これにより普段の学習内容が如何に大切であるかを学生は強く実感することができるものと思われる。

3.1 全体構成

教育プログラムは半日の日程を、日を開けて 2 回実施する構成とした。第 1 日めは部品と工具を各学生に手渡し、おのおの標準的な機体を組み立てる。組立作業はモノづくりの経験や工具の扱いの技量により学生によって大幅に進度の差が出るため、おのおのペースで作業できるよう組立手順の詳細を写真で解説したマニュアルを作成した (Fig. 5)。マニュアル整備は製作指導の負担を減らすことにも大きく貢献する。

第 1 日めの最後に、製作した機体を自宅に持ち帰り推進速度が向上するよう、各自工夫をするように指示する。同時にアー

[†]コストの半分はラジオコントロールの送受信機であり、玩具用ラジコンなどで用いられる近距離赤外線通信などを用いれば大幅に低価格化できると考えられる。

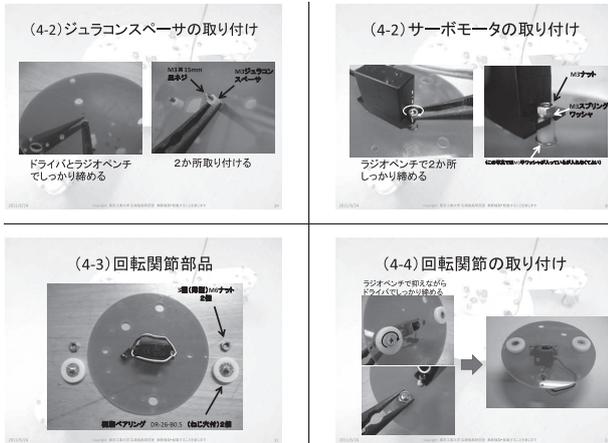


Fig. 5 Example of the assembling manual

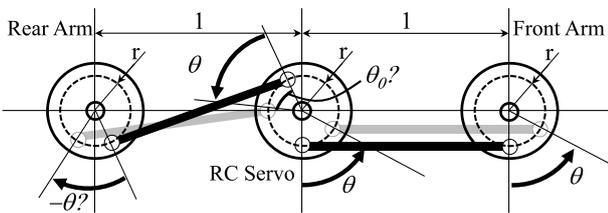


Fig. 6 Design problem for the rear link angle

ム長や受動車輪の高さを変えるスペーサ、ゴムなどの改造パーツも各学生に複数供給する。なお自作の部品に交換することも許可し、学生の自由な発想を認めている（ただし駆動源であるサーボモータと電池の交換だけは禁止とした）。

数日間の改良期間を経て、第 2 日めを実施する。2 日めは 2 人 1 組の対戦形式でタイムトライアルレースを行い、調整の具合や工夫の効果を確認する。タイム順に上位 4 名を選出し、準決勝・決勝戦を行うことで優勝者を決定する。続いて優勝した機体を題材として、なぜその機体が速かったのか、またこのロボットを設計する上でどのような知識が用いられているのか、高校で習う数学・物理を用いて解説する講義を行う。このようにすることで学生自身の試行錯誤の経験と、その結果を座学の知識と強く結びつけることができると考えている。

3.2 座学との連携

本節では魚太郎 IIIa 号機的设计と移動速度の向上に用いられている知識が、高校生までに授業で習う内容とどのように関連するのか、明確に示す教材例を提示する。

3.2.1 数学

本体中央に設置された RC サーボの回転を、前後連結リンクを介して前後アームに伝達しているが、前アームはサーボの回転方向と同じで 4 節平行リンクと等価であることから理解も設計も容易である。一方、後アームの駆動は回転方向を逆にしなければならない、リンク長や初期取り付け位置 θ_0 などは計算により求めなければならない。さらにサーボと後アームの回転角度は厳密には一致せず [14]、どの程度の誤差が生じているか設計の際に事前検討が必要である (Fig. 6)。後アームの回転機構のこれらの設計上の実際の問題は、以下の幾何学の問題に帰着

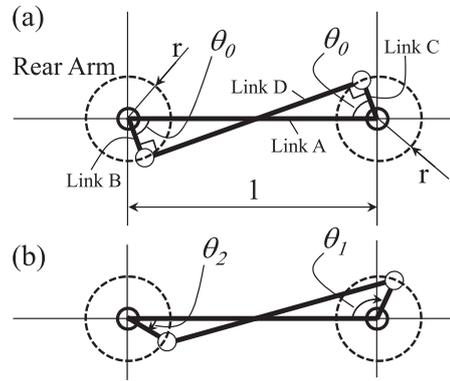


Fig. 7 Link geometry: (a) standard posture, (b) rotated posture

することができる。

問題

リンク A, B, C, D が Fig. 7 のように接続されている。リンク B と D, C と D は直角で、リンク A の長さは 1, リンク B, C の長さは r であるとする。

Q1: リンク D の長さを求めよ。

Q2: θ_0 を求めよ。

Q3: θ_1 と θ_2 の関係を求めよ。

リンク D の長さ l_D は三平方の定理から求められる。

$$l_D = \sqrt{1 - 4r^2} \quad (1)$$

また θ_0 は逆三角関数を用いて求められる。

$$\theta_0 = \cos^{-1} 2r \quad (2)$$

このリンク機構は幾何学的拘束から θ_1 と θ_2 に関して次式が成り立つ。

$$(r \sin \theta_1 + r \sin \theta_2)^2 + (1 - r \cos \theta_1 - r \cos \theta_2)^2 = 1 - 4r^2 \quad (3)$$

この式を整理すると、次式が得られる。

$$3r + r \cos(\theta_1 - \theta_2) - (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) = 0 \quad (4)$$

式 (4) を θ_2 に関して解いて θ_1 と θ_2 の関係を調べることも可能であるが、ここでは $\alpha = (\theta_1 + \theta_2)/2$, $\beta = (\theta_1 - \theta_2)/2$ と変数変換して次式を得る。

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r(1 + \cos^2 \beta)}{\cos \beta} \right) \quad (5)$$

よって α と β の関係が分かるので θ_1 と θ_2 の関係を求めることができる。

ところで設計上の寸法を出すためには式 (1), (2), (5) に具体的数値を入れて値を求めなければならない、計算には関数電卓を要するが、事前に高校生にアンケートを取ったところほとんどの学生が表計算ソフト (Microsoft Excel) を操作した経験があるとの回答であった。よって、PC 上で表計算ソフトを用いて演算

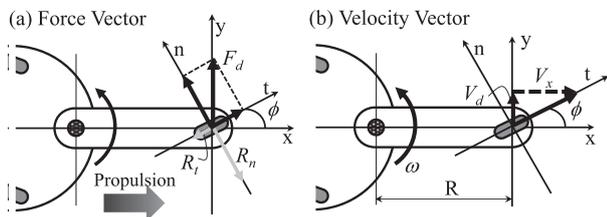


Fig. 8 Force (a) and velocity (b) acting on the passive wheel

すれば関数電卓がなくとも具体的な数値を求めることができる。実際の設計値はサーボと後リンクの軸間距離が 45 [mm], リンク B, C の長さは 10 [mm] であることから, $l_D = 40.3$ [mm], $\theta_0 = 63.6$ [deg] となり, このとき $(\theta_1 - \theta_0)$ と $(\theta_2 - \theta_0)$ の角度誤差は ± 45 [deg] の屈曲範囲で最大でおよそ 3.5 [deg] と十分小さくなっており, ほとんど対称であることが確かめられる。

このように単純なリンク機構であっても実際の設計のためには三角関数や基本的な式変形など, 高校数学の知識が必須であることを示すことができる。また数値解析や近似など工学的手法の一端を紹介することができる点も意義深いと考えている。

3.2.2 力学

魚太郎 IIIa 号機は受動車輪が転がり方向 (接線方向 t) には滑りやすく, 軸方向 (法線方向 n) には滑りにくいという異方性のある摩擦特性を利用して推進する。ここでは簡単のため受動車輪の転がり方向が進行方向 x に対し ϕ だけ角度を成して固定されている場合を考える。力と速度のベクトルを Fig. 8 に示す。このとき以下の問題を考える。

問題

前リンクの回転により, 前輪に F_d の駆動力が作用している。 R_t , R_n をそれぞれ転がり方向, 軸方向の最大静止摩擦力とし, おおのこの摩擦係数を μ_{tmax} , μ_{nmax} とする。また受動車輪の地面からの垂直抗力を N とする。このとき

Q4: 転がり方向, 軸方向の力 F_t , F_n を F_d , ϕ を用いて表せ。

Q5: R_t , R_n を求めよ。

Q6: 受動車輪が転がり, かつ, 軸方向に滑らないための必要条件を求めよ。

F_t , F_n , R_t , R_n は以下のように求められる。

$$F_t = F_d \sin \phi \quad (6)$$

$$F_n = F_d \cos \phi \quad (7)$$

$$R_t = \mu_{tmax} N \quad (8)$$

$$R_n = \mu_{nmax} N \quad (9)$$

受動車輪が転がり, かつ, 軸方向に滑らない条件は,

$$F_t = F_d \sin \phi > \mu_{tmax} N \quad (10)$$

$$F_n = F_d \cos \phi \leq \mu_{nmax} N \quad (11)$$

よって ϕ が $\pi/2$ に近づくほど受動車輪が転がりやすく, 軸方向には滑りにくくなる。さらに式 (10), (11) のそれぞれの左

辺・右辺で比を取ると以下の必要条件が導かれる。

$$\phi \geq \tan^{-1} \left(\frac{\mu_{tmax}}{\mu_{nmax}} \right) \quad (12)$$

式 (12) より摩擦係数の比が大きい路面, 例えば滑らかな机の上などでは小さな ϕ で推進できるが, その比が小さい絨毯のような路面では大きな ϕ でなければ推進できないことが分かる。

次に速度の関係を考える。

問題

長さ R の前リンクが角速度 ω で回転し, 前輪に V_d の速度が与えられている。受動車輪は軸方向に滑らないと仮定する。このとき

Q7: V_d を R, ω を用いて表せ。

Q8: 進行方向速度 V_x を求めよ。

Q9: V_x を高くするためにはどのようにすればよいか, 考察せよ。

V_d , V_x はそれぞれ以下のように表される。

$$V_d = R\omega \quad (13)$$

$$V_x = \frac{V_d}{\tan \phi} \quad (14)$$

式 (13) (14) より, 進行方向速度 V_x を増加させるためには, R , ω を大きくし, ϕ をなるべく小さな値にすれば良いことが分かる。しかしながらあまりに大きい R , ω はサーボモータのトルク不足や追従の遅れを招くことから最適値が存在する。また ϕ は式 (12) で求められる摩擦係数比に依存した下限値が存在する。よって路面に応じてこれらを適切な値に選択しなければならない。

実際にはゴムで首振り軸周りにコンプライアンスを与えられた受動キャストであるため角度 ϕ は前リンクの運動に依存して逐次変化する。したがって上述の解析とは条件が異なるが, 各設計パラメータがどのように推進速度に寄与するのかを定性的に説明し, 理解するには十分であると思われる。

4. 教育プログラムの実施

本論文で提案する教育プログラムを 2 回実施した。第 1 回めは筆者らと大学受験予備校である早稲田塾が共同で実施している「スーパーロボティクスプログラム」受講中の高校生 14 名, 第 2 回めは筆者らと日本学術振興会が共同で実施した科研費研究成果の社会還元・普及事業「ひらめき☆ときめきサイエンス」受講者 20 名を対象に行った。いずれも高校生自らが自主的に参加申し込みを行っているため, 基本的には理工系を志望する学生が集まっている (なお, 第 1 回目の実施では時間的制約から 3.2 節で示した座学との関連性を持たせる講義は行うことができなかった)。

組立作業はマニュアルを見ながら各自で行った。想定した作業時間は 2 時間半であったが, 早い学生は 1 時間半, 遅い学生は 4 時間ほどかかり, 予想どおり大きな幅があった。しかしながら 3 人の指導者が基本的にはマニュアルの補足を行うだけで各自のペースで順調に組み立て作業を実施することができ, 受

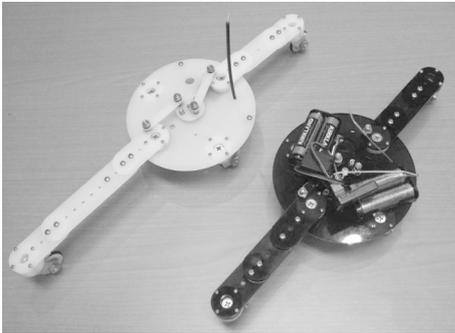


Fig. 9 The robot won the 1st place (right) and the 2nd place (left)



Fig. 10 Modification of the elastic elements



Fig. 11 Overview of the competition

講者全員が無事完成・動作させることができた。

Fig. 9, 10 に第 1 回の実施時に学生が製作した機体を示す。Fig. 9 は決勝のタイムトライアルで 1 位 2 位になった機体である。Fig. 9 左の機体はゴムの代わりにコイルスプリングを用いている (Fig. 10 右)。一方、Fig. 9 右は前リンクを延長し、ゴムの取り回し方も工夫を行っている。

第 1 回実施時の競技会の様子を Fig. 11 に示す。当日はキャンパス見学に訪れた 70 名ほどの観客が見守る中、レースが開催された。魚太郎 IIIa 号機は機体の改良のみならず、操作の良し悪しでも顕著に推進速度に差が見られ、競技会は白熱したものとなった。

5. 結果と考察

本章では特に第 2 回に実施したプログラムについて結果の詳細を示すと同時にプログラム終了後に学生から得られたアンケート調査について報告し考察する。

5.1 プログラムスケジュール

2011 年 7 月 25, 29 日に本教材を用いて「ひらめき☆ときめきサイエンス」の一環として開催した際のプログラムスケジュールを Table 1 に示す。「ひらめき☆ときめきサイエンス」は研究機関で行っている最先端の研究成果について小中高生が、直に見る・聞く・触れることで科学のおもしろさを感じてもら

Table 1 Program schedule

First Day (July 25th)

Time	Event
10:00–10:30	Introduction
10:30–11:30	Lecture about Robotics by Prof. Hirose “The World of State of the Art Robots 2011”
11:30–12:00	Hands-on Workshop (part I) Showing Assembled Robot and Outline Explanation
12:00–13:00	(Lunch Time)
13:00–14:00	Hands-on Workshop (part II) Assemble
14:00–15:00	Laboratory Tour Demonstrations of Prototype Robots for Research
15:00–15:30	Coffee Break Chat with Graduate School Students
15:30–16:30	Hands-on Workshop (part III) Finalizing Assemble, Setting and Adjustment
16:30–17:00	Explanation about the Contest on the 2nd Day

Second Day (July 29th)

Time	Event
13:00–14:00	Practice Run and Setting
14:00–15:15	Contest
15:15–16:00	Lecture about the Relation between Gyotaro and High school Mathematics/Physics Class
16:00–16:30	Award Ceremony and Closing Remarks

プログラムであり、実施時に対象年齢を高校生と指定して参加者を募集した。より魅力的なプログラムとなるよう研究室見学や研究用に開発されたロボットのデモンストレーション、学生との自由な会話などのイベントを本教材の組み立て作業に織り交ぜて構成した。

第 1 日めに標準機体の組み立てを完成させ、動作確認を行う。その後、機体を改造パーツとともに自宅に持ち帰り、各自なるべく推進速度が速くなるように改良してくるよう指示した。モチベーションを高めるため、上位 3 位に入賞すれば機体を賞品としてプレゼントすることも周知した (なお参加費は無料である)。3 日間の改良期間を経た後、競技会を開催し、その後、座学との関連を示す講義を行った。

5.2 競技成績

競技会はベニヤ板を敷いた床面上で行い、直線 8 [m] の距離を往復するスプリント競技と、1 [m] 間隔で置かれたパイロンを交互にすり抜け 8 [m] を走行するスラローム競技の 2 種目を行い、その合計タイムにより順位を決めた。

競技結果の度数分布を Fig. 12 に示す。スプリント競技の平均速度は 0.40 [m/s]、最大速度は 0.93 [m/s]、最小速度は 0.09 [m/s] であった。同様にスラローム競技の平均速度は 0.33 [m/s]、最大速度は 0.84 [m/s]、最小速度は 0.04 [m/s] であった。

スプリント競技の全員の平均速度は、筆者らが標準仕様で組み立てた場合の最大速度 0.5 [m/s] を 20% 下回っている。これは標準仕様であってもその組み立て方によって摺動摩擦が過大であったり、リンク関節軸が同軸でなかったりしたために、改造前の機体のそもそもの性能が低かったことによるものと想像される。このことから半数以上の学生は一つ一つの組立工程できちんと動作確認をするなどの基本的な手順が取られていなかっ

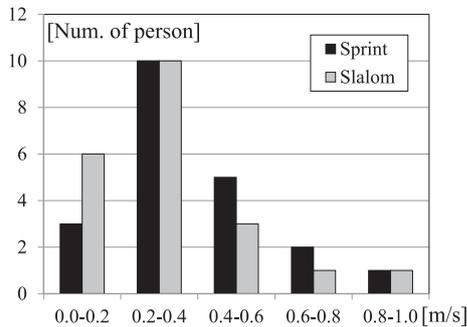


Fig. 12 Histogram of the achieved velocity

たり、そもその組立技量が不足していたものと考えられる。

一方でスプリント競技で標準仕様の最大速度を上回った学生は5人おり、中でも優勝した機体は標準状態のほぼ2倍にあたる0.93 [m/s]と著しい速度向上を達成していた。事前に筆者らの研究室の大学院生に同様の課題を出した際には最高速度はおおよそ0.8 [m/s]であったため、この値は筆者らの予測を大きく上回るものであった。優勝した機体は前後アームリンクを延長し、小さな振幅かつ速い周期で小刻みにアームを振動させることで非常に高速かつ滑らかな推進を実現していた。このような改良・操縦法が望ましいことは3.2.2項での定性的考察に合致している。好成績の学生がどのような視点から改良を重ねたのか、後述のアンケートによりさらに考察する。

5.3 競技後の講義

前節に示したように学生の製作した機体は改造した結果必ずしも速くなっていない（むしろ遅くなっている）機体も多い。また改造の内容を見てみると、ゴムの取り回し方法や取り付け位置を変更しているが、物理的にはまったく無意味であるものも多く見られる。そこで本来どのように改良すれば速くなるのか、優勝した機体を手本として、競技会終了直後に3.2節の内容をおおよそ45分間講義を行った。特に本ロボットの設計には高校数学Iで習う三角関数の知識が必須であること、具体的数値を入れて近似を行うことが工学では重要であること、物理の摩擦を扱う式にも三角関数が現れ、それを理解すればロボットは高速化できることに重点を置いて解説した。

本講義は第1日目の組立実習が終わったあとで、学生各自が改良を施す前に実施する案もあったが、そうであると学生たちに先に答えを与えてしまうことになり、改良の結果が画一化する危惧がある。また自らの手を動かし、自由に試行錯誤する機会を奪ってしまう可能性がある。これに対して競技会直後に講義を行えば、たった今日の前で見た結果について、言わば正解の種明かしを知ることができることから、数学・物理の座学の知識がより実感を持って体験できると考えている。このことは次節のアンケート結果でさらに議論する。なお講義に用いたスライドは配布資料として印刷し、学生が持ち帰り各自復習できるよう配慮した。

5.4 アンケート結果

アンケートは以下の項目について行った。

- (1) 学年
- (2) モノづくり経験の有無

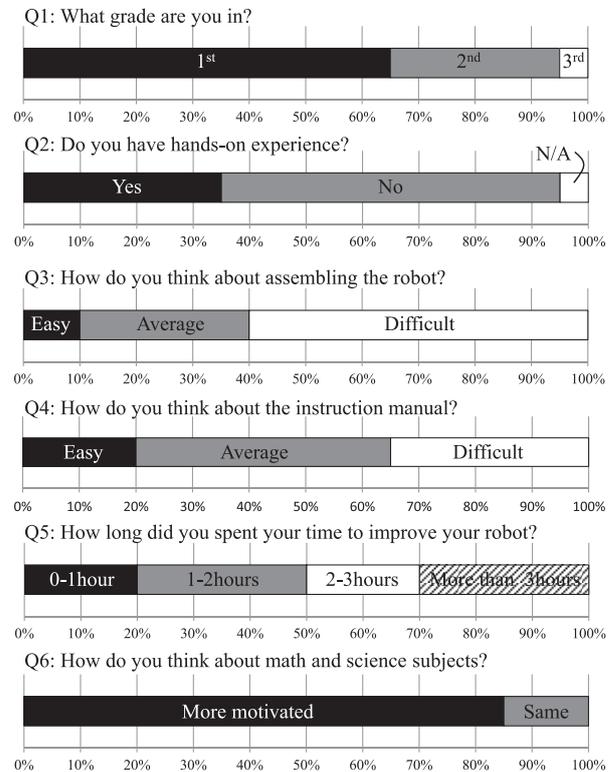


Fig. 13 Results of questionnaire

- (3) 組立難易度
- (4) マニュアル難易度
- (5) 自宅での調整時間
- (6) 改良した点
- (7) 理系授業への興味
- (8) 自由記述

結果をFig. 13に示す。受講した学年の内訳は高校1年生13名、2年生6名、3年生1名であった。三角関数が初出する数学Iは、標準的な教育課程の場合高校1年の2学期であり、本プログラムを実施したのは夏休み期間中の7月末であったことから、一部の学生には理解が難しかったと思われる。しかしながらまさに今習っていると回答した学生もおり、たとえ現在分からなかったとしても数か月後には学習する内容であるので、動機づけという観点でも本プログラムの内容は適切であると思われる。

次にモノづくりの経験の有無と組立・マニュアルの難易度であるが、モノづくりの経験は60%の学生がないと答えている。またあると答えた学生もキットを製作するなどが主であり、主体的に自ら考えて設計製作する経験に乏しいことが伺われる。組立の難易度は全体の60%が難しかったと回答し、特にモノづくり経験のないものの75%が難しかったと回答している。筆者らは当初この程度の組立は高校生には簡単すぎると危惧していたのであるが、本結果を見る限り予想以上に現代の高校生は手を動かして物を作る経験に乏しく、むしろ難しい課題であることが明らかとなった。一方、マニュアルの難易度は普通が最も多く、適切な内容となっていることが伺える。

自宅での調整時間を見ると、最短ではゼロ、最長では5時間との回答であり、平均値は108 [min]となった。このことから、多くの学生が時間をかけて調整したことが伺え、本課題が学生たちの興味を惹いていることが分かる。

改良した点について自由記述を見ると、成績の芳しくなかった学生の多くは「ゴムがピンとなるように張った」「腕の長さを長くした」など、自分が行ったことのみを記述であった。これとは対照的に1位の学生の回答を見ると「車輪の抵抗をなくなるように潤滑油をさした。車輪が浮くようになったので錘をして浮かないようにした。スリッパしない最大角度を探した。」となっており、どのような意図をもってどのような工夫をしたかが記述されていた。また2位の学生の回答は「ゴムはゆるめ。足は長め。後輪の接地を強くした。後輪の方が短い。振れ幅は大きめ。」と箇条書きで回答しており、明らかに各調整パラメータを振ってテストしたことが分かる内容であった。さらに3位の学生の回答は「重くする長くする工夫は他の人が行うと思ったので、四つの車輪に均等に力をかける。特に前後の車輪が等しく接地することを意識し、ワッシャをはさんで調整しました。また電池BOXにより重心が中心になかったので、後リンクを短くして重心位置を調整しました。」と回答しており、改良の意図と工夫だけでなく、さらに勝負に勝つための戦略まで見据えて工夫していることが分かる内容であった。

改良の際、意図をもつということは、その改良がどのような結果を生むのか論理的に考え事前に予測することであろう。このような思考プロセスは工学的探求に必須であり、またこの思考過程を経た学生が上位の成績を得られるということは、提案する教育プログラムが工学教育に有効であることを示唆している。

本プログラムのまとめの質問として、高校での理科系授業についてより興味を持ったとの回答は85%となり、変わらない15%を大きく上回った。第2回目の実施ではTable 1に示すように、本プログラムだけではなくロボット研究に関する講義や研究室見学、ロボットデモンストレーションなども行っているため、本論文で提案するプログラムだけの成果ではないことに注意が必要であるが、自由記述で半数以上がロボットの組立について触れており、参加した学生に大変好評であったことが伺われる。

最後に自由記述を見ると、70%以上の学生が「楽しかった」「もっとこのような講座を開いて欲しい」という肯定的な意見であった。一方30%の学生は「ハンダごてを使いたかった」「マニュアルが分かりにくかった」などの具体的要望や改善点を述べており今後の課題と考えられる。筆者らの印象に残った自由記述としては、「成績はよくなかったけれど楽しかったです。(中略)今やっている三角関数とか力学がすごく重要だということがよく分かりました。」「実際にロボットを組み立てて、進路を機械系に決めようという気持ちが強くなりました。」「ものづくりへの興味が強くなっただけでなく考え方も少し変わりました。東工大目指して頑張ります!!」といった感想もあり、本プログラムが普段の学習意欲の向上に貢献できることを示唆している。

6. おわりに

本論文では1自由度グライド推進ロボット“魚太郎 IIIa 号機”



Fig. 14 “Gyotaro-III” race for primary school children

を提案し開発した。また高校生向けの教材として組立マニュアルを準備するとともに座学との関連性を例示した。さらに本移動体を用いた教育プログラムを2回実施し、結果を報告・考察した。アンケートの結果から、本プログラムが高校生の理工系科目への興味をさらに喚起し、論理的思考を培う非常に有効な教材となり得ることが示唆された。

今回は学年が異なる高校生に対し、数日間の限られた時間の中で行うことを制約条件としてプログラムを構成・実施した。そのため高校座学との関連性については講師から一方的に解説するのみで高校生が主体的に考える時間を十分に取ることはできなかった。また講義を受講した後に、さらに機体を改良したいとの学生からの要望もあったが、実現することはできなかった。

もし仮に普通科の授業の一環として教育プログラムを構成するのであれば、授業進度も同一で時間もある程度確保できると考えられるので、3.2節で提示した問題を宿題などにするだけで、時間をかけて学生自ら数学・物理の知識を用いて考えることができるであろう。また座学で得た知識を元にさらに機体の改良を進めれば、それはまさに学問としての工学の実践であり、モノづくりの実体験と座学がより強固に結びつく魅力的な工学教育プログラムになり得ると筆者らは考えている。

なお本論文では高校生向けとして教材開発を行ったが、他の学年向けの教育プログラムも作成可能と考えている。例えば小学生対象であれば操縦して遊ぶことと、推進原理を魚に例えて解説することにより理工系への興味を喚起することができる。また中学生向けであれば新しく技術・家庭科の分野に加わった「計測と制御」の課題としてサーボモータを取り上げ、ポテンシオメータで計測し、PID制御により関節角度を位置制御していることを講義することができるであろう。

実際、開発した移動体は小中学生向けの体験型デモンストレーション機として、科学技術館「生き物から学ぶロボット展」、文部科学省情報ひろば等で展示を行い好評を博している。特に2009年12月、2011年1月の2回にわたり、東京工業大学学生支援GP [15]と筆者らの研究室が共催した小学生向けロボット教室 [16] [17] では、講義の一環として本移動体の構造を説明するとともに、レース競技を行った (Fig. 14)。子供たちは単にレースを楽しむだけでなく、アームの動かし方と推進速度の関係を模索するなど、なぜ進めるか、どのように進むのか、理解を深める努力もしていた。また中には操作に夢中になり時間になっ

でも手放さない子や、レースで上手く動かせなかったことで泣き出す子もいた。このことから低学年の子供たちの興味も引き出すことができる教材であると考えられる。

今後は教材をキットとして商品化するなど、より広く社会に還元できる方法も模索していく予定である。また教育機関により本プログラムを実施する場合には積極的に詳細な情報提供をするのでご興味のある方は連絡いただきたい。

謝辞 本教材は早稲田塾「2011年度スーパーロボティクスプログラム」の一部、日本学術振興会「ひらめき☆ときめきサイエンス」の一部として開発されました。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 科学技術振興機構サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト平成22年度実績報告書プランA, <http://spp.jst.go.jp/jisshi/22/22n-plan-A.html>
- [2] (株)イーケイジャパン メカ工作ロボットキット, <http://www.elekit.co.jp/product/search.php?sub%5B0%5D=00001&start=1>
- [3] (株)タミヤ ロボクラフトシリーズ, <http://www.tamiya.com/japan/products/robocraft/index.htm>
- [4] ロボット教育研究専門委員会 (Robot Education) 報告書, <http://www.rsj.or.jp/activities/doc/07201111/00houkoku.pdf>
- [5] ロボットハイスクール (高校生のための産業用ロボット講習会), <http://www.rsj.or.jp/news/entry111112.html>
- [6] スーパーサイエンスハイスクール研究開発実施報告書, https://ssh.jst.go.jp/ssh/public/pdf/h19_pdf/1505.pdf
- [7] 遠藤玄, 広瀬茂男, 外川圭司: “グライド推進の提案”, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.731-732, 1998.
- [8] 広瀬茂男: 生物機械工学, 工業調査会, 1987.
- [9] トックベアリング株式会社 ベアリング D シリーズ, <http://www.tok-bearing.co.jp/products/bearing/d.html>
- [10] 広瀬茂男, 遠藤玄, 高岡峻一: “教育用1自由度グライド推進移動体“魚太郎 III 号機”の開発”, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 1L2-5, 2010.
- [11] 遠藤玄, 山田浩也, 広瀬茂男: “1自由度グライド推進移動体“魚太郎 IIIa 号機”を用いた高校生向けロボット教材の開発”, 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 2C2-4, 2011.
- [12] GWS サーボ MICRO/2BBMG/F, <http://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-01908>
- [13] FUTABA プロポ ATTACK-2ER, レシーバ R122JE(AM), <http://www.rc.futaba.co.jp/hobby>
- [14] 山田浩也: 索状能動体の3次元運動解析に基づく機構と制御の研究, 東京工業大学学位論文, 甲第7129号, 2008. <http://tdl.libra.titech.ac.jp/z3950/hkshi/maindsp.html>
- [15] 東京工業大学 学生支援 GP ウェブサイト, <http://www.siengp.titech.ac.jp/news/091219.html>
- [16] 高岡峻一: “小学生向けロボット教室「人に役立つ新しいロボットを作ろう」”, 東工大クロニクル, no.425, pp.16-18, 2010. http://www.titech.ac.jp/about/introduction/magazine_chronicle.html
- [17] 石田悠朗: “小学生向けロボット教室「人に役立つ新しいロボットを作ろう」”, 東工大クロニクル, no.463, pp.17-19, 2011. http://www.titech.ac.jp/about/introduction/magazine_chronicle.html



遠藤 玄 (Gen Endo)

2000年東京工業大学機械物理学専攻博士課程修了。博士(工学)。2000年ソニー(株)入社。2002年～2006年(株)ATR 脳情報研究所客員研究員。2007年東京工業大学理工学研究科特任助教を経て、2008年同大学機械宇宙システム専攻助教。追従型福祉車両、ヘビ型移動ロボット、脚車輪型移動ロボット、軽作業用マニピュレータの研究開発に従事。第16回日本ロボット学会論文賞(2002)、計測自動制御学会論文賞(2012)受賞。
(日本ロボット学会正会員)



広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1976年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了(工学博士)。同大学助手、助教授を経て1992年東京工業大学機械物理学専攻(2000年以降機械宇宙システム専攻)教授。2011年同大学卓越教授。ロボット創造学の研究に従事。第1回 Pioneer in Robotics and Automation Award (IEEE 1999)、第1回 Award of Merit (IFToMM 2004)、紫綬褒章(2006)、Engelberger賞(2009)など受賞。日本機械学会、IEEE各フェロー、日本学術会議連携会員。
(日本ロボット学会正会員)



山田浩也 (Hiroya Yamada)

2008年東京工業大学大学院機械宇宙システム専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同大学スーパーメカノシステム創造開発センター特任助教を経て2009年同大学グローバルエッジ研究院テニユア・トラック助教。ヘビ型移動ロボット、軽作業用マニピュレータ、無段変速機構の研究開発に従事。IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (2006)、計測自動制御学会論文賞(2012)受賞。
(日本ロボット学会正会員)