T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title	
著者(和文)	遠藤玄, 山田浩也, 広瀬茂男
Authors	Gen Endo, Hiroya Yamada, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , , 2C2-4
Citation(English)	, , , 2C2-4
発行日 / Pub. date	2011, 9
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) 2011 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

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

○遠藤玄 (東京工業大学) 山田浩也 (東京工業大学) 広瀬茂男（東京工業大学)

1. はじめに

学生の理科離れが進む現在，ロボットを題材とした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通り組み立てるのみであり，理工系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．またこれらの活動の主なターゲットは小中学生といった低学年であり，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．

本報告ではヘビや魚の推進に着想を得て既に開発した 1 自由度グライド推進移動体 [2] を改良し，構造部材にアクリルを採用することにより低コスト化と改造・組立性を向上した “魚太郎 IIIa 号機” の開発と，高校の座学で習う数学・物理との関連性を直接的に示す教材を開発する．またこれを用いた高校生向けロボット教室を実施したので報告する．

2. 魚太郎 IIIa 号機の開発

2·1 基本構成

図 1 に開発した教材の基本構成を示す．推進原理の詳細な説明は前報 [2] に譲り，ここでは概要を述べる．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．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．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されている．RC サーボモータの回転角を正負均等に継続的に揺動させれば，受動キャスタが魚の鰭と同様の効果を発揮し直進する．また，揺動にオフセットを与え，中心値を変化させれば所望の方向に旋回も可能である．たった 1 自由度の RC サーボモータでありながら，推進の速さと向きを制御できる興味深い推進機構である．

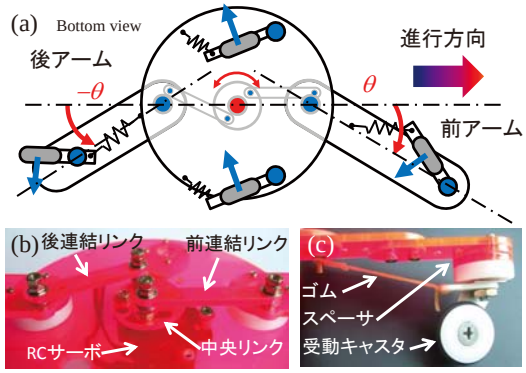

図 1 基本構成：(a) リンク構成（赤丸：能動回転軸，青丸：受動回転軸，サーボモータは図示していない），(b) 駆動リンク機構，(c) 受動キャスタ

図 2 魚太郎 IIIa 号機概観

2·2 改良点

2·2.1 アクリル板の採用

前報では構造部材として板厚 2[mm] の高力アルミニウム板（A5052）を用い，外部加工業者に依頼して部品製作を行っていた．本報では低コスト化と高校生自身による改造のしやすさを考え，汎用的な手動工具で加工可能な板厚 3[mm] のアクリル板に変更した．1 台の製作に必要な板材の大きさは縦 170[mm] ×横 310[mm] であり，その価格は 800 円弱である．この板材を学内のレーザ加工機により切断することで部品製作を行った．アクリル板は同価格帯で様々な色が販売されており，図 2 に示すように学生の好みの色で製作することが可能である．

一方，アルミニウムに比してアクリルは割れやすく摩耗に弱い材料である．このため前後連結リンクの穴部には真鍮製のハトメを入れ，また一部部材は応力集中を避ける形状に設計変更し，耐久性を向上させた．

2·2.2 組立分解性の向上

教材として考えると，部品点数はなるべく少なく，また左右の区別が必要な紛らわしい部品は少ない方が望ましい．これらに留意して受信機や電池ボックスの配置を本体上面から底面に変更し，さらに受動キャスタの左右ステーを共通化することで，部品点数・種類とも削減した．

一方，組立て後にアームの長さや 4 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，前後アームを敢えて 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．

さらに前報では締結部品の一部にカシメを用いていたが，繰り返し使用する教材として考えると，分解可能であることが望ましいため，ネジとナットによる締結に変更した．

また，組立の手順について詳細に記したマニュアル（図 3）を作成し，経験や技能に差がある生徒達でも，各々の作業進度で組立ができるよう配慮した．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．

2·2.3 低コスト化

前述のように機構部品をアクリル板で内製し，外注加工部品点数をなるべく減らすことで機械加工コストを大幅に抑えることができた．また，もっとも高価格であったラジオコントロール送受信機（6000 円程度）については，香港の製品（HobbyKing:GT-2 2.4Ghz 2ch Tx & Rx[1], 1800 円程度）を採用することで大幅にコスト削減した．これにより，前報の製作コスト 17500 円に比して 58%減の 7400 円で製作可能となった．

3. 座学との連携

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．本報では魚太郎 IIIa 号機の設計製作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．

3·1 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ず，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 [3]，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（図 4）．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することができる．

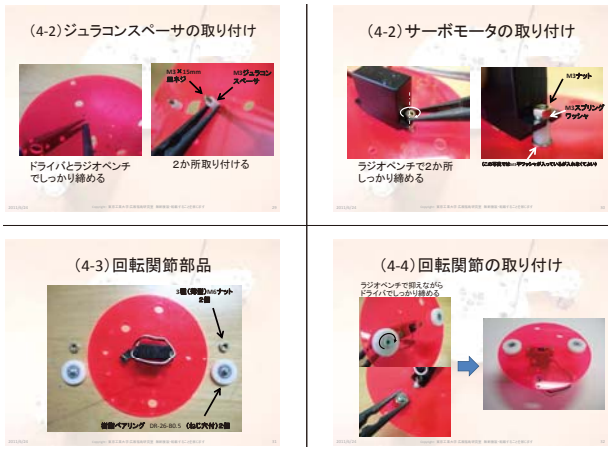

図 3 製作マニュアル（抜粋）

[1]本製品は 2.4GHz 帯を用いる新規格であり 20 台以上の同時操縦が可能である．

> リンク A, B, C, D が図 5 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．

$$l_D = \sqrt{1-4r^2} \tag{1}$$

また θ_0 は逆三角関数を用いて求められる．

$$\theta_0 = \cos^{-1} 2r \tag{2}$$

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．

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

この式を整理すると，次式が得られる．

$$3r + r\cos(\theta_1 - \theta_2) - (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) = 0 \tag{4}$$

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．

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

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) に具体的数字を入れて値を求めなければならず，計算

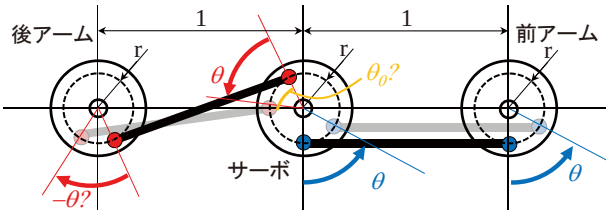

図 4 後リンク回転角度に関する設計上の問題

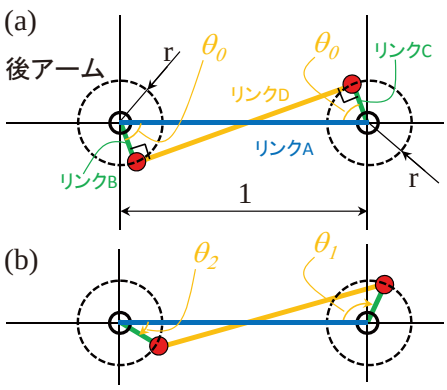

図 5 リンクの幾何学：(a) 基準姿勢, (b) 回転した場合

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 Excel を操作した経験があるとの回答であった．よって，Excel を用いて演算すれば関数電卓が無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$\pm$ 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．

3·2 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図 6 に示す．このとき以下の問題を考える．

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，各々の摩擦係数を 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．

$$F_t = F_d \sin\phi \tag{6}$$
$$F_n = F_d \cos\phi \tag{7}$$
$$R_t = \mu_{tmax} N \tag{8}$$
$$R_n = \mu_{nmax} N \tag{9}$$

受動車輪が転がり，かつ，軸方向に滑らない条件は，

$$F_t = F_d \sin\phi > \mu_{tmax} N \tag{10}$$
$$F_n = F_d \cos\phi \leq \mu_{nmax} N \tag{11}$$

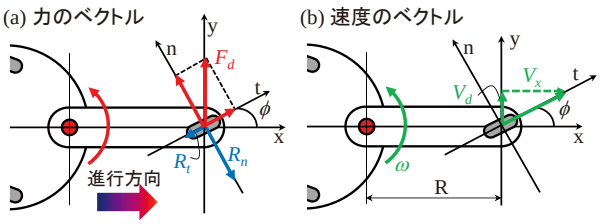

図 6 受動車輪に働く力 (a) と速度 (b)

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．

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

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．

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．

$$V_d = R\omega \tag{13}$$
$$V_x = \frac{V_d}{\tan\phi} \tag{14}$$

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 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適切な値を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タであるため角度 ϕ は前リンクの運動に依存して逐次変化する．従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. 製作実習の実施

魚太郎 IIIa 号機を用いて高校生 14 名を対象に製作実習を実施した．実習は 2 日間の構成とし，1 日目はマニュアルに沿って既定の組み立て作業のみを行う．そして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，1 週間の間，各自工夫をするよう指示した．実習 2 日目には 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した．(なお，今回は時間の制約から 3 節で示した座学との関連性を持たせる講義は行わなかった．)

図 7-9 に学生が製作した機体の一部を示す．図 7 は一部の部品を仲間と交換し合い，カラフルな色合いに変更している．図 8 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．図 8 左の緑色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（図 9 右）．一方，図 8 右は前リンクを延長し，ゴムの引き回し方も工夫を行っている．

競技会の様子を図 10 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ることから，競技会はなかなか盛り上がった．

学生の製作した機体を見ると，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）機体も多く見られた．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た．正直な感想を言えば,「手当たり次第に適当に」改良しているようである．本教材の意図としては，論理的に思考し改良を重ねてもらうことであったが，残念ながら今回の実習ではその目的は達せられなかった．

これは推進原理など本論文３節で示した内容を講義することで，かなり改善されるのではないかと考える．また，競技会の後に筆者らが調整・改良したものを見せ，解説することでいわば正解の種あかしをして，その礎には論理的思考と数学・物理の知識があることを伝えるのことも良い経験になると考えている．

5. まとめ

本報では先に提案した１自由度グライド推進移動体を改良し，低コスト化・改造のしやすさなどを考慮した “魚太郎 IIIa 号機” の開発について報告した．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．さらに高校生向けの実習を開催し，結果を報告・考察した．

今後は日本学術振興会「ひらめき☆ときめきサイエンス」のプログラムとして本教材を用いた実習講義を行う予定である．講演会ではその様子も発表する予定である．また教材の製品化など，より広く社会に還元できる方法も模索してゆく予定である．

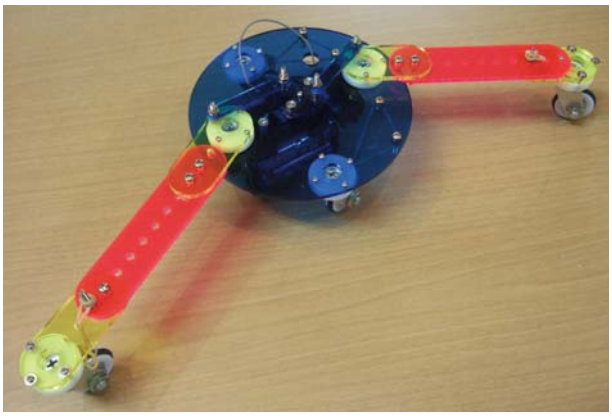

図 7 色のバリエーション

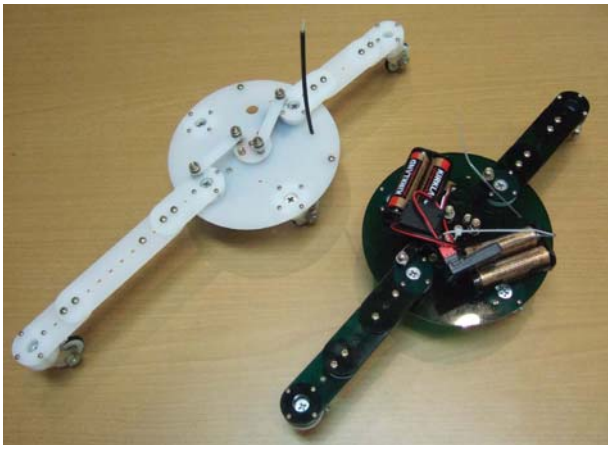

図 8 好成績だったの機体：第一位右，第二位左

謝辞

本教材は早稲田塾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」プログラムの一部として開発されました．

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 年度実施報告書プラン A ”, http://spp.jst.go.jp/jisshi/22/22n_plan_A.html

[2] 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, 1L2-5 (2010)

[3] 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

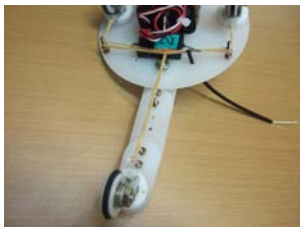

図 9 バネ部分の工夫

図 10 競技会の様子（決勝は上位３台で行われた）