ものづくり教育のための段ボール3D受動歩行機

—設計法, 歩行実験および授業の実践—

衣 笠 哲 也^{*1} 土 師 貴 史^{*2} 入 部 正 継^{*3}
 小 林 智 之^{*1} 藤 本 真 作^{*4} 吉 田 浩 治^{*1}

3-D Passive Dynamic Walker Made of Cardboard for Robot Education

—Design Strategy, Experiment and Manual Training—

Tetsuya Kinugasa^{*1}, Takafumi Haji^{*2}, Masatsugu Iribe^{*3},
 Tomoyuki Kobayashi^{*1}, Shinsaku Fujimoto^{*4} and Koji Yoshida^{*1}

Artificial biped walking has been invented since epoch of Greek mythology. There are a lot of reasons why human tries to invent a biped walker. For example, they want to have artificial labor or comprehend the mechanism of biped walking by synthesizing the artificial biped walker, etc. However the reason might come from a primitive motivation that they just want to make something which achieves what they can always do but what only they do, that is, biped walking. On the other hand, population of young Japanese people who are interested in science tends to decrease recently, and then lots of science (including robotics) education programs has been proposed in order to motivate them. The biped walking is one of attractive topics not only for academia but also for the science education even if it is for primary school children. The purpose of the paper is, hence, to propose a design strategy of three dimensional passive dynamic walker made of cardboard for science and robot education. In order to introduce the walker as a educational program, a precise design method of the walker is provided and is validated through some experiments. Moreover, the program is validated through some class for primary school children and university students.

Key Words: Passive Walking, Biped, Robot Education

1. は じ め に

2足歩行を人工物によって再現することは古くから試みられている。その動機は人になる労働力としてのロボットを創ることや、人に近い歩行動作を実現しこれを構成論的に理解することまで様々であるが、単純に2足歩行するものを創りたいという興味から始まっているのではないだろうか。生物の2足歩行は身体を持つ振動特性に基づいて極めて効率的に実現されており、固有振動が重力場における運動の重要な概念の一つという意味でも、これを理解することは非常に重要である。

一方、近年、日本の子供たちにみられる理科離れとその対策としての科学教育に対する取り組みが注目され、ロボット工学

分野においても様々な試みがなされている[1]~[6]。こうした取り組みの中で、小学生から大学生に至るまで、科学に(工学分野ではものづくりに)興味を持ってもらうための、また、基本的な概念を理解するための様々なロボット関連の教材が考案・改良されている[7]~[12]。こういった中で2足歩行は小学生でも十分興味を持つことができるテーマであり両者を巧く統合することができれば新たな教材として有望であると考えられる。

しかしながら、従来の2足歩行ロボットと呼ばれるものは一般に高価であるとともに、多くの関節自由度を有しているなど動作させるには高度な技術が必要となる。したがって、2足歩行ロボットをテーマにものづくり教育を実施する際、小学生でも製作可能で、かつ、安価な教材を準備することは難しい。これに対して、動力装置を持たず、緩斜面上を自然に歩行する受動歩行機がある[13]。受動歩行機は、構造が簡単で古くから玩具[14][15]として存在し、最近ではペーパークラフト[16]や針金による簡単な受動歩行機[17]など様々なものが実現されている。また、振り子の運動は小学校および高等学校の新学習指導要領[18]の項目(中学校は運動とエネルギー)としてあがっているため、理科教材としても導入することが容易であると考えられる。実際、受動歩行を導入した例として鈴木ら[19]や松永

原稿受付 2012年2月29日

^{*1}岡山理科大学工学部機械システム工学科

^{*2}松江工業高等専門学校機械工学科

^{*3}大阪電気通信大学工学部電子機械工学科

^{*4}岡山理科大学工学部知能機械工学科

^{*1}Dept. of Mechanical Systems Eng., Okayama Univ. of Science

^{*2}Dept. of Mechanical Eng., Matsue College of Technology

^{*3}Dept. of Mechanical Eng., Osaka Electro-Communication Univ.

^{*4}Dept. of Intelligent Mechanical Eng., Okayama Univ. of Science

■ 本論文は有用性で評価されました。

ら [20] の試みが挙げられる。さらに高専や大学においても、力学的な知識に基づいて受動歩行機を設計、製作し、実験を通して振動現象や歩行に関する考察を行うことができれば、基礎的な理論の深い理解につながるだけでなく、理論に基づく設計の重要性を認識するための教材となることが期待できる。

そこで、本報告では、100 年以上前からすでに存在する 2 足受動歩行玩具 [14] [15] をもとに、加工が簡単な段ボール板によって 3D 受動歩行機を製作する方法を提案する。また、大学などにおけるものづくり教育用教材として利用するために、歩行機のモデルと設計指針を与え、基本的な歩行実験を通してモデルの有効性を検証する。さらに、小学生を対象とした工作教室ならびに大学生を対象とした講義を実施することで教材としての有効性を検証する。

本論文の構成は以下のとおり。まず、第 2 章で従来研究と提案する歩行機の概要について述べ、第 3 章で簡単な力学に基づく歩行機の数学モデルを導出し、設計指針を与える。第 4 章では受動歩行機 RW-P01 の製法と、小学生、大学生対象の授業について、第 5 章では RW-P01 の問題点を解消した新たな歩行機 RW-P02 の製法、基本特性を明らかにする実験、さらに、小学生、大学生対象の授業について述べ、第 6 章で結言を述べる。

2. 2 足 3D 受動歩行機 RW-P00

受動歩行機は、単純化して運動解析したり、容易に歩行を安定化するために脚を 4 本にして二次元平面に拘束する方法がよく用いられてきた。しかし、直感的に歩行を理解するために、それ以前に、教材としての興味を引くためには 2 本足で歩くことが望ましい。そこで、単純な膝のない 2 リンク系を 2 本足の三次元受動歩行機として用いることとする。この場合、遊脚を振り抜くために左右方向の振動を励起する必要がある。この問題を解消するためには、特許にある歩行玩具 [14] [15] のように円弧状の足底を導入することが考えられるが、木材など比較的高い材料を正確に削り出さなければならない。より簡単に三次元形状の足を実現する目的で針金を用いるもの [17] やペーパーラフトによる歩行機 [16] も提案されているが、立体的な足形状を作るためにはある程度の熟練が必要で、形状を維持することは難しい。さらに、得られる歩容も歩幅が極めて狭く 2 足歩行のイメージからは遠い場合が多い。そこで、球面など三次元形状の足底ではなく、ラテラル平面内の円弧を進行方向に延長した形状の足を用いた歩行機を実現することとした。提案する段ボール受動歩行機の試作機 RW-P00 [21] を Fig. 1 に示す。この歩行機は、段ボール紙を貼り合わせることで脚および足を構

Fig. 1 RW-P00 [21]

成し、ステンレス棒を軸とすることで実現されている。この受動歩行機は A5 サイズの本を斜面として約 10 歩、歩幅約 20 [mm] (脚長に対して 20%)、1 歩あたりの時間 [s/歩] が 0.5~1 秒弱の歩行を実現している。得られた歩容は、従来の歩行機に比べ歩行の周期と歩幅が長く比較的人の歩容 (約 1 [s/歩]、歩幅 50~80% [22]) に近いものであることを確認した。

3. 3D 受動歩行機の設計法

次に、試作機 RW-P00 を基本形とする歩行機の運動と設計指針について述べる。背景となる知識は、微分方程式、回転運動、剛体の力学、特に、重心位置、慣性モーメントなどであり、したがって、基本的な力学、数学の単位を取得した学生であれば理解できる内容となっている。歩行機は、軸が一樣な棒、脚が直方体、足が同心円弧を持つ立体で構成されるものとする。

3.1 歩行機の設計指針

歩行機の設計指針は、ラテラル平面運動の固有振動数 λ_L とサジタル平面内における遊脚運動の固有振動数 λ_S をなるべく近い値にとるように各部品形状を調整することである。これは、ロール軸回りの振動と遊脚の振動が同期することで遊脚が地面に接触することなくうまく振り抜かれ、結果として安定な歩行が得られることを期待するものである [23]。また、後述するように、歩行はラテラル平面内の振動に支配されるため、これを人の歩行に近い値、つまり、ステップ周期 (歩行周期は 2 歩あたりの時間とするのが一般的であるため、ここでは 1 歩あたりの時間をステップ周期として定義する) を 0.5~1 秒程度に設定することが (主観的に) 自然な歩容を実現するためのコツとなる。

3.2 歩行機の設計

したがって、設計手順は以下のようになる。

Step1: 各部品の形状を与える。

Step2: 各平面内で重心位置と慣性モーメントを計算する。

Step3: 慣性モーメントを計算する。

Step4: 運動方程式を導出しステップ周期を求める。

Step5: ステップ周期を比較し両者が 0.5~1 [s] (固有振動数で 3~7 [rad/s]) に近い値をとるまで Step1 に戻る。

[Step1: 歩行機の外形] 軸を質量 m_s 、長さ l_s の一樣な棒、脚を質量 m_l 、縦 l_l 、横 w_l 、奥行 d_l の一樣な直方体、足を質量 m_f 、外径 R 、内径 $R - w_f$ 、角度 α_f 、奥行 d_f の同心円弧を持つ一樣な立体とし、Fig. 2 に示すように組み立てられるものとする。

[Step2: 重心位置] グローバル座標系の原点を直立状態の接地点にとる。このとき重心位置ベクトルは軸が $\mathbf{r}_{G_s} = [x_{G_s}, y_{G_s}]^T = [0, w_f + l_l - d_s]^T$ 、脚 $\mathbf{r}_{G_l}$ と足 $\mathbf{r}_{G_f}$ が、

Fig. 2 A simplified model of 3D passive dynamic walker

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{G_l} &= \begin{bmatrix} \pm x_{G_l} \\ y_{G_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm(w_l + l_d)/2 \\ w_f + l_l/2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{r}_{G_f} &= \begin{bmatrix} \pm x_{G_f} \\ y_{G_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm(R - \frac{w_f}{2})\sin(\frac{\alpha_f}{2}) \\ R - (R - \frac{w_f}{2})\cos(\frac{\alpha_f}{2}) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\pm$ は $+$ が右脚、 $-$ が左脚を表す。したがって、ラテラル平面内における系全体の重心位置 $\mathbf{r}_{G_L}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{G_L} &= \begin{bmatrix} x_{G_L} \\ y_{G_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_{G_L} \end{bmatrix}, \\ y_{G_L} &= (m_s y_{G_s} + 2m_l y_{G_l} + 2m_f y_{G_f})/M \quad (1) \end{aligned}$$

となる。ただし $M = m_s + 2m_l + 2m_f$ は全質量である。

サジタル平面内において遊脚は前後対称構造をとるものと仮定すると、 y 軸上に各部品の重心が配置されることとなる。したがって、サジタル平面内の軸重心位置 $\mathbf{r}_{G_s} = y_{G_s}$ 、脚重心位置 $\mathbf{r}_{G_l} = y_{G_l}$ 、足重心位置 $\mathbf{r}_{G_f} = y_{G_f}$ となり、遊脚全体の重心位置は脚全質量を $M_l = m_l + m_f$ とすると次式で与えられる。

$$\mathbf{r}_{G_s} = \{m_l y_{G_l} + m_f y_{G_f}\}/M_l.$$

【慣性モーメント】まず、ラテラル平面内における全重心位置 (G_L とする) 回りの総慣性モーメント I_{G_L} を導出する。軸の重心 G_s 回りの慣性モーメントは ${}_L I_{G_s} = m_s l_s^2/12$ 、脚の重心 G_l 回りの慣性モーメントは ${}_L I_{G_l} = m_l(l_l^2 + w_l^2)/12$ である。足の重心 G_f 回りの慣性モーメント ${}_L I_{G_f}$ は G_f から回転中心 C_L までの位置ベクトルを $\mathbf{r}_{G_f C_L}$ とすると ${}_L I_{G_f} = {}_L I_{C_L} - m_f \mathbf{r}_{G_f C_L}^2$ で与えられる。ただし、 ${}_L I_{C_L}$ は円弧中心におけるロール軸回りの慣性モーメントで ${}_L I_{C_L} = m_f \{R^2 + (R - w_f)^2\}/2$ で与えられる。ここで、全重心位置 G_L から G_s 、 G_l 、 G_f までの位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_{G_L G_s}$ 、 $\mathbf{r}_{G_L G_l}$ 、 $\mathbf{r}_{G_L G_f}$ とすると、

$$\begin{aligned} I_{G_L} &= {}_L I_{G_s} + m_s \mathbf{r}_{G_L G_s}^2 \\ &\quad + 2({}_L I_{G_l} + m_l \mathbf{r}_{G_L G_l}^2) + 2({}_L I_{G_f} + m_f \mathbf{r}_{G_L G_f}^2). \end{aligned}$$

サジタル平面内において各部品の重心 ${}_S G_l$ 、 ${}_S G_s$ 回りの慣性モーメントはそれぞれ ${}_S I_{G_l} = m_l(l_l^2 + d_l^2)/12$ 、および、 ${}_S I_{G_f} = {}_S I_{C_L} - m_f(R - y_{G_f})^2$ となる。ただし、 ${}_S I_{C_L}$ は円弧中心 C_L におけるピッチ軸回りの慣性モーメントで

$${}_S I_{C_L} = m_f \{R^2 + (R - w_f)^2\}(\sin 2\alpha_f + 2\alpha_f)/8\alpha_f,$$

である。したがって、軸 C_s 回りの慣性モーメント $I_{C_s S}$ は

$$I_{C_s S} = {}_S I_{G_l} + m_l(y_{G_l} - y_{G_s})^2 + {}_S I_{G_f} + m_f(y_{G_f} - y_{G_s})^2.$$

【Step 4: 運動方程式とステップ周期】ロール角を鉛直下方を基準として q_L とする。 r を回転中心 C_L から全重心 G_L までの距離とするとラテラル平面内の運動方程式は次式で与えられる。

$$I_L(q_L)\ddot{q}_L + MRr \sin q_L \cdot \dot{q}_L^2 + Mgr \sin q_L = 0. \quad (2)$$

$I_L(q_L) = I_{G_L} + M(R^2 - 2Rr \cos q_L + r^2)$ は接地点回りの慣性モーメントに相当する。式 (2) を原点近傍で一次近似すると

$$\ddot{q}_L = -\lambda_L^2 q_L, \quad \lambda_L = \sqrt{\frac{Mgr}{I_{G_L} + M(R-r)^2}}, \quad (3)$$

となり、ラテラル平面内の固有振動数 λ_L からステップ周期 $T_L = \pi/\lambda_L$ が得られる。

サジタル平面内において鉛直下方からピッチ軸回りの脚回転角度を q_S とすると、遊脚の運動方程式と固有振動数は

$$\ddot{q}_S = -\lambda_S^2 \sin q_S, \quad \lambda_S = \sqrt{M_l g r_l / I_{C_s S}}, \quad (4)$$

となる。ただし、 M_l は脚全体の質量、 $I_{C_s S}$ は脚回転中心点 C_s 回りの慣性モーメント、 r_l は C_s と脚全重心点間距離である。遊脚の固有振動数 λ_S からステップ周期 $T_S = \pi/\lambda_S$ が得られる。

4. 段ボールを用いた 3D 受動歩行機 RW-P01

この設計法に基づいて RW-P01 を設計した [25]。RW-P01 の一例として組み立て正面図および完成品の写真を **Fig. 3** に示す。足は段ボール板を折り曲げることによって円筒形状とし、円弧状に加工された脚下端に接着している。製作のために必要なものを **Table 1** に示す。軸に用いたステンレス棒は、ラテラル平面内の振動を遊脚の固有振動数にあわせて遅くするために有効である。また、ストローは身近にある材料で軸受けとしての機能を持たせることを狙っている。ストローの内径は細めの 3.5 [mm] が最適で輪ゴムは軸の回転を妨げない程度にストローから若干離して取り付けるとよい。

4.1 大学生対象の講義

岡山理科大学工学部機械システム工学科 2009 年度後期のロボット工学 (3 年生対象) において RW-P01 を用いた講義と演習、実習を行った。講義では、第 3 章の内容を数回にわたって解説し、数名で構成される班毎に歩行機の設計、製作を行った。実現された歩行機の一部を **Fig. 4** に示す。設計において、径 6 [mm] のステンレス棒と段ボールを用いること以外に制約はないため、ある程度多様な形状の歩行機が実現されている。歩行機の設計結果 (ステップ周期) および実験結果の一部を **Table 2** に示す。この結果は学生のレポートからの引用であるため理論値は参考程度で、実験値の一部は計測データから再計算を行った。歩行機は、段ボール紙を曲げた足裏円弧の精度が悪い、形状の維持も容易ではない、軸受け部の強度不足で遊びが大きい

Fig. 3 RW-P01

Table 1 List of tools and materials

Tools			
Double stick tape	Utility knife	Cutting board	Scissors
Materials			
4 rubber bands (or 'o' rings)		Cardboard A3 size	
Stainless shaft	Slope (Board)	Drinking straw

Fig. 4 RW-P01 designed by university students

Table 2 Results of RW-P01 from reports by students

Group	Theory		Experiment			
	T_L [s]	T_S [s]	T [s]	n	s_t [mm]	D [mm]
A	0.54	0.55	0.24	100	17	1650
B	0.59	0.57	0.35	27	18	nodata
C	0.44	0.46	0.25	28	10	280

T : average step cycle, n : maximum number of steps, s_t : average stride, D : maximum travel distance

Fig. 5 Manual training for primary school children

などの問題があったが、最終的に最大歩行距離 1,650 [mm], 歩数 100 という結果であった。

4.2 小学生対象の工作教室

RW-P01 の有効性を検証するために小学生対象の工作教室を 3 回実施した。まず、第 1 回目は、2010 年 8 月 27 日の岡山理科大学附属中学校オープンスクールのイベントの一つとして実施された。そのときの様子を Fig. 5 左に示す。対象は小学校高学年、参加人数 40 名である。進行は、教員 1 名が説明しながら 40 名を 6, 7 名で構成される班に分け、班ごとに中学生 1, 2 名、大学生 1 名を配置し、作業を同時進行させる形式をとっている。また、進行が遅れ気味であった参加者には保護者が個別に作業を補助していた。その結果、実際の作業時間は約 1 時間要し、歩行実験にはイベントの都合から 10 分程度となっている。

第 2 回目は、2010 年 11 月 20 日、岡山市立高島小学校高島フェスタ内の企画として行った。対象は小学校高学年の児童を中心とし、低学年は保護者の補助の下で児童 45 名の参加を得た。第 1 回目とは異なり、個別に工作を行う形式で、学生数名と 1 時間ごとに地元ボランティアの方々（高島小学校 PTA 役員および高島中学校生徒の皆様）2~3 名に交代で補助に入っていた。工作風景を Fig. 5 右に示す。作業時間は 45 分程度で、個別に進行したことで補助員がほぼマンツーマンで配置することが可能であったため時間が短縮されている。実験は、参加者の時間が許す限り行った。

第 3 回目は、岡山理科大学博物館わくわく科学の広場の 1 企画として 2010 年 11 月 21 日に実施した。対象は主に小学生で、

中には就学前児童も含み参加人数は 20 名、作業時間は約 45 分で、実験時間は参加者の時間が許す限りであった。第 2 回目と同様に個別に入れ替わり立ち替わり工作を行ってもらった。また、時間の余裕がない場合は、あらかじめ材料を切り出したものを組み立てるのみで約 20 分程度の作業時間となっている。

工作教室の参加児童はのべ百余名で、大半の児童が数歩歩行させることに成功し、なかには、10 歩程度の歩行を成功させるものもいた。しかし、段ボールの切り出し精度が悪くほとんど歩かないものも少なからず見られた。特に、円弧足の形状と取り付け部分の切断精度が求められること、軸受けに用いたストローの取り付け部分の強度不足で固定されないことが歩行の実現に大きく影響していた。また、部品切り出しに用いたカッターナイフは非常に危険で、実際、軽い切り傷などをする児童が若干名発生するという問題があった。さらに、参加児童の達成度（歩数や歩行距離など）や満足度などを定量的に評価するために全参加者対象のアンケートなどを行う必要があった。

5. 段ボールを用いた 3D 受動歩行機 RW-P02

RW-P01 の問題点を解消するために円弧足を板を貼り合わせることで製作し、段ボール板を紙からプラスチックに変更し、新たな歩行機 RW-P02 を設計、製作した。歩行機の外観を Fig. 6 に示す。歩行機の各パラメータを Table 3 に示す。両平面内の固有振動数は $\lambda_L = 6.40$, $\lambda_S = 8.67$ とある程度近い値をとっている。軸は径 3 [mm] のステンレス（密度 $\rho_s = 7,930$ [kg/m³]）棒を、脚と足の部品は厚さ 4 [mm] のプラスチック段ボール板（密度 $\rho_{t,f} = 150$ [kg/m³]）を用いた。材料費の合計は歩行機 1 体 200 円程度である。プラスチック段ボール板はレーザ加工機で容易に切断可能である。また、RW-P01 と同様に各部品は両面テープで張り合わされており、輪ゴムや o リングを用いて脚の位置決めを行っている。したがって、歩行機の製作後、形状の変更はできないが、軸の位置 d_s および両脚間の距離 l_f を変更することが可能である。これらの変更は、以下に述べるように歩容、特に、ステップ周期に影響を及ぼすため、専門的な知識がない小学生でも条件を変えた実験を簡単に行える。

5.1 歩行実験

設計した RW-P02 を用いて歩行実験を行った。実験では長さ 1.2 [m], 傾斜 6 [deg] の斜面 (Fig. 7) を用い、軸の位置 d_s を 16.3, 28.3, 43.3 [mm] と変化させた場合の歩容の変化を調べた。まず、脚間距離を当初の設計に近い形状である 2.2 [mm] とした場合における理論値と実験値の比較を行った結果を Fig. 8 に示す。左図は実験結果を軸の位置に対するステップ周期の試行 10 回の最小、最大、平均値として、また、理論値をラテラル平面内の振動の半周期 T_L として描画したものである。この図から、軸位置が下がると理論値、実験値ともに低下する傾向が見られる。また、ステップ周期とラテラル平面内の半周期がほぼ一致していることから、歩行はラテラル平面内の運動に支配されていることが分かる。右図は、軸位置に対する遊脚半周期の理論値と実験値を描画したものである。この図から、遊脚半周期の理論値に対して実験値は 110% 強の値をとっている。減衰率を考慮してこれを ζ とすると周期は $2\pi/\lambda_S\sqrt{1-\zeta^2}$ である。したがって、この場合減衰率にして 0.4 程度に相当する軸

Fig. 6 3D passive dynamic walker RW-P02

Table 3 Parameter value for RW-P02

l_s [mm]	ϕ [mm]	d_s [mm]	$L I_{G_s}$ [kgm ²]	m_s [g]
200	3	16.3	3.74×10^{-5}	11.2
l_l [mm]	w_l [mm]	d_l [mm]	$L I_{G_l}$	m_l [g]
160	25	12	1.57×10^{-5}	7.2
α_f [rad]	w_f [mm]	d_f [mm]	$L I_{C_L}$	m_f [g]
0.93	20	40	1.49×10^{-4}	12.2
ρ_s [kg/m ³]	$\rho_{l,f}$	R [m]	$S I_{G_l}$	$S I_{G_f}$
7930	150	0.12	1.54×10^{-5}	4.07×10^{-7}
M [g]	r [mm]	T_L [s]	I_{G_L}	λ_L [rad/s]
50	44.0	0.49	2.38×10^{-4}	6.40
M_l [g]	r_l [mm]	T_S [s]	I_{C_S}	λ_S
19.4	11.3	0.36	2.86×10^{-4}	8.67

Fig. 7 Slope (variable inclination, made from medium-density fiberboard strengthened by an aluminium frame)

Fig. 8 Step cycle and half cycle of the swing leg

の粘性抵抗と空気抵抗の影響があることが考えられる。

注意：脚の干渉を避けるために脚間距離を 2.2 [mm] より小さくできない。しかし、歩行において支配的なラテラル平面内の振動数を両脚を固定して計測したところ 0 [mm] と 2.2 [mm] で明確な差は見られなかった。したがって、脚長等と比較して十分小さく、歩行への影響は無視できる程度とみなせる。

次に、脚間距離を 2.2, 10, 20, 30 [mm] と変化させて歩行距離、歩数、歩行時間を計測し、ステップ周期 T 、歩幅を計算した。それぞれの条件で 10 回試行し、その平均をとった結果を Fig. 9 に示す。この図から、軸位置 16.3 [mm]、脚間距離 2.2 [mm] で最も長距離歩行（右上図）していることが分かる。この条件における 10 回の試行のうち 5 回は斜面 1.2 [m] を完走した。また、ステップ周期（左下図）と歩幅（右下図）を見ると、どちらも

Fig. 9 Step cycle and stride

Fig. 10 RW-P02 designed by university students

Table 4 Results of RW-P02 from reports by students

Group	Theory		Experiment				
	T_L [s]	T_S [s]	T [s]	T_S	n	s_t [mm]	D [mm]
A	0.49	0.33	0.42	0.35	40	20	800
B	0.32	0.37	0.34	0.36	24	21	510
C	0.60	0.35	0.44	0.36	16	38	600

T : average step cycle, n : maximum number of steps, s_t : average stride, D : maximum travel distance

軸位置が下がるにつれて小さくなっている。つまり、軸位置が下るとステップ周期が短くなり、歩幅も小さくなる。

5.2 大学生対象の講義

2011 年度、4.1 節と同じ科目で RW-P02 を用いた講義、演習、実習を行った。前回同様、数回の講義で設計法を講述し、数名の班に分かれて設計、製作を行った。今回は、我々の研究室と岡山理科大学工作センターに導入されているレーザ加工機を用いてプラスチック段ボール板から部品切り出しを行った。Fig. 10 に製作した歩行機を、Table 4 に各班の理論値と実験値を示す。Fig. 10 内の歩行機は右から表内の group A, B, C に対応している。学生のレポートおよび製作した歩行機から、外形、計測データを引用し理論値および実験値を再計算している。この表から、A, C 班のステップ周期は理論値よりも小さい傾向がある。前節の結果より、脚間距離が 20 [mm] を超えるとステップ周期が理論値よりも大幅に減少することから、実験時に脚間距離が大きかったことが原因 [24] と考えられる。また、遊脚の半周期は理論値より若干大きい値をとっているため粘性を考慮する必要がある。B 班について、ステップ周期が理論値よりも若干長めとなっていることから脚間距離が狭い状態で実験が行わ

Fig. 11 Results using RW-P02 by primary school children

れたものとする。また、足質量が大きく軸の取り付け位置が高いという脚全体の重心が低い構造のためほかに比べて遊脚の軸回りの慣性モーメントが大きく、摩擦の影響が比較的小さかったことが考えられる。今回は、加工精度が向上したため、実験の再現性は高く、各班ごとの歩行到達距離に大きな差は見られなかったが、最大到達距離 800 [mm]、歩数 40 と前回の結果には及ばなかった。しかし、時間的な制約（設計、製作、実験に講義 1 回 1.5 [h] ずつ）もあり、前節で得られた結果（軸の取り付け位置や脚間距離を変更することで歩容が変化し歩行性能に影響を与えること）まで理解してもらうことはできなかった。

5.3 小学生対象の工作教室

さらに、RW-P02 を用いて小学生対象の工作教室を 2 回行った。歩行機の基本設計は 5.1 節で用いたものと同じで、あらかじめレーザ加工機により部品を切り出しており、教室では両面テープで貼り合わせるのみで工作を行っている。したがって、RW-P01 の場合よりも事前の準備時間が短縮され、カッターナイフによる怪我の心配も解消されている。工作教室は、2010 年と同様に、2011 年 11 月 19 日の岡山市立高島小学校「たかしまフェスタ」および、20 日の岡山理科大学の大学祭期間中に行われた理大博物館における企画として実施された。参加者は延べ 87 名で、所要時間は工作に 30 分、実験に 30 分合計 1 時間程度であった。今回は、積極的に協力してくれた 37 名分の実験結果として最大歩数、最大到達距離を記録した。その結果を人数分布として Fig. 11 に示す。この図から分かるように、RW-P01 では 10 歩程度であったものが最大で 37 歩、700 [mm] 以上と大幅に歩行性能が向上していることが分かる。また、最大歩数の平均は 13.3 歩、最大到達距離の平均は 419 [mm] で、2/3 以上の生徒が 10 歩以上の歩行に成功している。次に、熱心に取り組んでいた生徒に軸の位置と脚間距離を変化させて実験を行ってもらった。その結果の一例を Fig. 12 に示す。この実験結果について 3 択形式で考察してもらった。歩行距離と歩数は軸位置が高くなると大きく、脚間距離が大きくなると小さくなるとの回答を得た。このことから、提案する教材を用いることで一部ではあるが小学生でも歩行機の特長について理解可能であると言える。

最後に、工作教室についてアンケートを行った結果を Fig. 13 に示す。左は工作教室の楽しさ、右が工作の難易度に関するものである。左図から「楽しかった」と回答した生徒の割合が 94% であり、工作教室が小学生の興味に合致していることを示している。また、難易度については「かなり難しかった」を除いてほぼ一様に分布しており、適切な内容であったと考えられる。

Fig. 12 An experimental result by a primary school child

Fig. 13 Questionnaire results on primary school children

6. おわりに

本報告では、ロボティクスを応用した科学教育の一つのテーマとして段ボールによる 3D 受動歩行機の設計、製作手法を提案した。また、歩行機の実験によって明らかにし、設計方法の有効性を検証した。さらに、小学生と大学生を対象とした授業を行ったことについて述べた。設計法は学部生の習得する知識の範囲内で理解可能なもので、実験結果ともよく一致しており実験、実習を伴う教育プログラムとして有効であると考えられる。小学生に対しても、歩行機をつくるだけでなく、軸の位置や脚間距離を変化させることで歩容が変化する、つまり、「機構の一部の寸法を変更することで所望する動的な性能が変化する」[11] ことを経験的に学べる内容となっている点が重要である。また、授業を受けた小学生、大学生の反応はよく、小学生に付き添っていた保護者にも楽しんでいただけたという意味でも提案する教材は有効であるといえる。

しかしながら、本論文の主な目的は教材開発であり、得られた結果は教材の物理的な性質の評価と教材としての魅力を確認するものでしかない。したがって、今後はさらに教育プログラムとしての充実を図り、この教材によって得られる教育効果をより細かいアンケートや成績評価等を通して検証する必要がある。

謝辞 2004 年度の工学卒業生であり本歩行機の基本形状を考案した山橋亘君、工作教室を手伝っていただいた六車徹君をはじめとする 2010 年度、2011 年度の卒業生諸君、および、工作教室を実施する機会を与えていただいた岡山理科大学附属中

学校と岡山市立高島小学校の関係者の皆様に感謝の意を表します。また、本研究の一部は戦略的大学連携支援事業「科学 try アングル岡山」および科研費（23760247）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 平成8年版 環境白書, 第1章2節1. 環境省, 1996.
- [2] 吉川弘之: テクノロジーと教育のゆくえ, 岩波書店, 2001.
- [3] 日本学会会議自動制御研究連絡委員会: 自動制御研究連絡委員会報告—メカトロニクス教育と研究への提言—, pp.412–454, 1997.
- [4] 人工物設計・生産研究連絡委員会メカトロニクス専門委員会: 人工物設計・生産研究連絡委員会メカトロニクス専門委員会報告—メカトロニクス教育・研究に関する提言—, pp.95–117, 2000.
- [5] 三平: “制御教育雑感—理論, 実学, ハンズ・オン”, 計測と制御, vol.46, no.9, pp.681–682, 2007.
- [6] 日本ロボット学会ロボット教育専門委員会報告書, 2011.
- [7] 入間, 金田, 蛭: “段階的なプログラミング学習が可能な自律型ロボットキットの開発”, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1D3-2, 2007.
- [8] 久保田, 他: “ライントレースロボットを題材としたメカトロニクス・カリキュラムの開発—ロータリーエンコーダを用いたDCモータの速度制御—”, ROBOMEC2008 講演論文集, 2A1-I17, 2008.
- [9] 遠藤, 山田, 青木: “任意節数連結可能な教育用ヘビ型ロボットの開発”, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, J1-06, 2009.
- [10] 藤田, 他: “レゴ・マインドストームを用いたメカトロニクス体験学習の検討 (第3報: プログラムの流れの理解を主とした学習方法の開発)”, ROBOMEC2002 講演論文集, 1P1-K08, 2002.
- [11] 入部, 他: “4輪移動体設計によるメカトロニクス設計教育プログラム”, 計測自動制御学会論文集, vol.3, no.47, pp.173–179, 2011.
- [12] M. Iribe and H. Tanaka: “An integrated hands-on Mechatronics education program,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.23, no.5, pp.701–708, 2011.

- [13] T. McGeer: “Passive Dynamic Walking,” CSS-IS TR 88-02, 1988.
- [14] G.T. Fallis: Walking toy, U.S. Patent No.376588, 1888.
- [15] J.E. Wilson: Walking toy, U.S. Patent No.2140275, 1938.
- [16] <http://pepamax.web.fc2.com/peparobo-ninjya.html>
- [17] 静岡大学受動歩行教材開発チーム: 人型受動歩行模型「はりがねくん」, 1回技術教育創造の世界 (大学生版) 発明・工夫作品コンテスト教材開発部門特別賞, 2006.
- [18] 文部科学省: “新学習指導要領・生きる力”, 小学校学習指導要領第2章第4節理科第1分野, 中学校学習指導要領第2章第4節理科第1分野, 高等学校学習指導要領第2章第5節第3物理, 2009.
- [19] 宮田剛志, 大島まり, 鈴木高宏: 受動歩行を題材としたインタラクティブ教育支援コンテンツの開発, 日本理科教育学会全国大会要項, no.59, p.350, 2009.
- [20] 松永泰弘, 中村玄輝: “教材用2足前後型受動歩行模型の歩行に関する研究”, 静岡大学教育学部研究報告, 人文・社会・自然科学編, vol.60, pp.225–235, 2010.
- [21] 山橋巨, 塚本真: 3D 受動歩行ロボットの製作, 岡山理科大学工学部機械システム工学科平成16年度卒業論文, 2004.
- [22] D.A. Winter: Biomechanics and Motor Control of Human Gait. Univ. of Waterloo Press, 1991.
- [23] 衣笠, 他: “バネ足首と扁平足による三次元受動歩行機”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.10, pp.1169–1172, 2009.
- [24] T. Kinugasa and K. Yoshida: “Lateral Motion Analysis of Passive Dynamic Walking with Flat Feet: Analytic Solution and Stability for One DOF System,” Proc. of Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots 2009, pp.631–638, 2009.
- [25] 衣笠, 他: “教育のための段ボール紙を用いた三次元受動歩行機製作方法について”, ROBOMEC2011 講演会予稿集, 2A2-G08, 2011.

衣笠哲也 (Tetsuya Kinugasa)

1999年大阪府立大学大学院工学研究科機械系機械システム工学専攻博士後期課程修了。同年津山工業高等専門学校助手をへて, 2002年岡山理科大学工学部機械システム工学科講師, 2008年同准教授となり現在に至る。ロボティクス, 制御工学の研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

入部正継 (Masatsugu Iribe)

1993年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年ソニー (株) 入社。2007年神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年大阪電気通信大学講師, 2012年同准教授となり現在に至る。ロボティクス, メカトロニクスに関する研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

藤本真作 (Shinsaku Fujimoto)

1995年岡山理科大学大学院工学研究科システム科学専攻博士後期課程修了。同年岡山理科大学工学部機械工学科助手, 1998年同講師, 2001年岡山理科大学工学部福祉システム工学科講師, 2005年岡山理科大学工学部知能機械工学科講師を経て, 2008年同准教授となり現在に至る。ロボティクス, 制御工学, 計測工学の研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

土師貴史 (Takafumi Haji)

2011年9月岡山理科大学大学院工学研究科博士課程修了後, 同大学研究生を経て, 2012年4月松江工業高等専門学校機械工学科助教となり現在に至る。レスキューロボットに関する研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

小林智之 (Tomoyuki Kobayashi)

2011年3月岡山理科大学工学部機械システム工学科卒業後, 同4月岡山理科大学大学院工学研究科機械システム工学専攻に入学し現在に至る。受動歩行機に関する研究に従事。

吉田浩治 (Koji Yoshida)

1993年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程単位取得認定退学。同年大阪府立大学工学部助手, 1997年岡山県立大学情報工学部講師, 助教授, 2006年岡山理科大学工学部助教授, 2008年同教授となり現在に至る。制御工学やロボティクスの研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)