SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

中学校技術・家庭科における段返り人形教材の開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-07-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松永, 泰弘, 佐津川, 華子 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00007874

中学校技術・家庭科における段返り人形教材の開発

Development of Karakuri Somersault Doll as a Teaching Material for Technology and Home Economics Classes in Junior High School

松　永　泰　弘*　　佐津川　華　子**
Yasuhiro MATSUNAGA and Hanako SATSUKAWA

（2013 年 10 月 3 日受理）

This paper deals with the development of Karakuri somersault doll as a teaching material for technology and home economics classes in junior high school. Karakuri somersault doll by use of gravity was developed in Edo period (1603-1868 CE). On the Karakuri somersault doll, the torque occurs when iron balls move in the body inside, and then, the doll performs somersault between steps. It is the teaching material which students can learn about the center of gravity, moments, and potential energy. In this study, we made experiments for the somersault and clarify the optimum for the wire's tension, the legs' length, the steps' height and width, and the number of iron balls.

1．緒言

新学習指導要領[1] では文化や伝統に関する教育の充実が求められており，中学校技術・家庭科[2] の技術分野では，「エネルギー変換」が必修となり，「ものづくりなどの実践的・体験的な活動を通して材料と加工に関する知識・技術などを習得するとともに，技術と社会や環境とのかかわりについて理解を深め，技術を適切に評価し活用する能力と態度を育てること」を目標としている。また，中学校理科[3] では，「原理や法則の理解を深めるためのものづくりを，各内容の特質に応じて適宜行うようにすること」とものづくりの推進が求められている。また，第１分野においては，「物体の運動やエネルギーに関する観察・実験を通して物体の運動の規則性やエネルギーの基礎について理解させるとともに，日常生活や社会と関連付けて初歩的な見方や考え方を養い，自然を総合的に観ることができるようにする」とし，エネルギー変換の効率が改訂により追加された。

また，「第3期，第4期科学技術基本計画」[4), 5)] では，ものづくりを担う子どもたちを継続的，体系的に育成していくために，幼い頃からものづくりの面白さに馴染み，創造的な教育を行い，こども自らが 知的好奇心や探究心を持って，科学技術に親しみ，目的意識を持ちながらものづくり，観察，実験，体験学習を行うことにより，ものづくりの能力，科学的に調べる能力，科学的なものの見方や考え方，科学技術の基本原理を体得できるようにすることが強調されている。

*技術教育講座　　**総合科学専攻

そこで，本研究において，技術のものづくり学習と理科の力学分野，そして日本古来の文化伝統に関する学習の融合教材として「段返り人形」を取り上げる。段返り人形は，重心の移動を利用した江戸時代のからくり人形である。胴体内部で重心が移動することにより回転モーメントが発生して段返りを行う構造になっており，重心の変化や回転運動・力のモーメントなどについて学習可能な教材である。著者ら[6]は，からくり指南書「機巧図彙[7]」で紹介された段返り人形を簡略化し，腕と脚が同じ形状で一段毎に段返りする特徴をもつ教材用段返り人形を製作し，段返りに適した胴・脚の長さと段の高さ・幅の関係について研究を行っている。本研究では，先行研究で階段の段の高さを同じにできなかった問題点を解決するために，糸の役割を明らかにし，糸の取り付け位置の改良を行った。また，簡易なからくり部の製作方法を提示し，糸の張り・脚と段の寸法・鉄球の数の4つの要素に対して最適な条件を実験から明らかにした。さらに，学習指導要領に追加されたエネルギー変換の効率を求め，動画による運動解析を行い，段返り運動を行うメカニズムについて考察・検討した。

2．日本古来のからくり段返り人形

段返り人形とは，寛政8年（1796年）にからくり師の細川半蔵によって書かれたからくり指南書「機巧図彙」において紹介されたからくり人形のひとつである。

2-1 「機巧図彙」段返り人形

細川半蔵が製作した段返り人形は，胴体，手脚とそれを繋ぐ糸，支えの杖で構成され，位置エネルギーを利用して，胴体内部の水銀が移動することで重心が移動し，段返りを繰り返す。水銀に粘性があるため往来に時間がかかり，その移動の間人形本体は停止する。そのため動いては止まる，動いては止まるという動きを繰り返すことによる「見る楽しさ」がある。

図1は，からくり指南書「機巧図彙」の一部であり，図1（a）は段返り人形の全体図，図1（b）は動作原理を示している。機巧図彙には，この他に水銀の入る胴体部分の構造や各種パーツ，衣装，段返り及び収納用の箱の詳細など，14ページに渡って紹介されている。

（a）全体図　　（b）動作原理

図１　段返り人形（からくり指南書「機巧図彙[7]」）

2-2 学研段返り人形[8]を用いたからくりの分析

学研から発売されているからくり段返り人形（図2）は機巧図彙を復元し，胴体内部には水銀ではなく鉄球を使用している。胴体の頭部取り付け位置から胴体内へ鉄球を入れられるようになっており，また肩・脚・支えとなる杖がそれぞれ動くようになっている。肩で固定された

ワイヤーが胴体に沿って伸び，脚のところで楔を使い調節可能な形で固定されている。また，脚のみでは回転が不安定になるため，脚および支えとなる杖で接地し，安定した段返りを維持する。

学研段返り人形を使用して，調整しなければならない2つの変数，鉄球の数とワイヤーの長さについて，段返り実験から最適な値とその役割について分析する。胴体内部の鉄球の個数を0～5の間で変化させ，ワイヤーの張り具合の微調整で段返り実験を行った。胴体内部に3個の鉄球を入れ，ワイヤーの張り具合とスタート地点の微調整を行い，足に滑り止めのセロハンテープを貼ることで安定して5回段返りさせることに成功した。

ワイヤーの張り具合に関しては，きつく張りすぎると脚が浮き上がり回転する途中で停止してしまう。これは，脚を強く引っ張りすぎることで回転の勢いを殺してしまうためである。逆に，緩すぎると脚が浮き上がり回転した後，脚が重力に従って降りるため勢いがつきすぎてしまう。着地の際に一瞬跳ね上がって再び着地することで位置にズレが生じ，その後，段から転がり落ちて失敗する。

このことから，鉄球は重心の移動と回転の勢いをつけるため，ワイヤーは段返りの勢いを制御するために重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

（a）手動による動作開始

（b）手の接地

（c）脚部の振り上げ

（d）脚の振り下ろし

（e）脚の下段への接地

図２　学研段返り人形の段返り

３．段返り人形教材の開発

からくり指南書「機巧図彙」で紹介された段返り人形は，図2に示すように，手と脚部の形状が異なり，杖を有し，同一の段に脚の次に手を着き，段返りを行う。本研究では，「機巧図彙」で紹介された段返り人形を簡略化し，腕と脚が同じ形状で一段毎に段返りする特徴をもつ教材用段返り人形を開発した。先行研究で階段の段の高さを同じにできなかった問題点を解決するために，糸の役割，糸の取り付け位置について考察・検討を行う。

また，より少ない鉄球で段返りを行うように，人形の材料にはバルサ材を用いた。段返り人形は胴体と脚，プーリーからなり，製作が簡単でシンプルな構造の教材用段返り人形（図3）を開発した。

（a）正面　　（b）側面

図３　教材用段返り人形

3-1　材料・道具

教材用段返り人形の材料・道具一覧を表１に示す。図4は，段返り人形の部品一覧の写真である。プーリーは円形だが，バルサ材の特徴として繊維方向に割れやすい。そのため形状通りに製作できないことがあるが，プーリーの精度は糸の長さ，鉄球の数，形状寸法に比較して段返りに大きな影響を与えない。

表１　材料・道具一覧

部品・材料		寸法･数（脚の長さ h ＝ 20mm の場合）
胴体	バルサ材	a．20mm × 50mm × 2mm × 2 枚
		b．　8mm × 46mm × 2mm × 2 枚
		c．　8mm × 20mm × 2mm × 2 枚
脚部		d．10mm × 26mm × 4mm × 4 枚
		e．10mm × 20mm × 2mm × 4 枚
プーリー		f．φ 8mm × 2mm の円盤× 4 枚
		g．φ14mm × 1mm の円盤× 8 枚
竹串		φ 2mm × 50mm × 2 本
ストロー		φ 4mm × 22mm × 2 本
鉄球		SR 2.5mm，0.44g × 3 ～ 20 個
糸　セロハンテープ　瞬間接着剤　はさみ　カッター　錐		

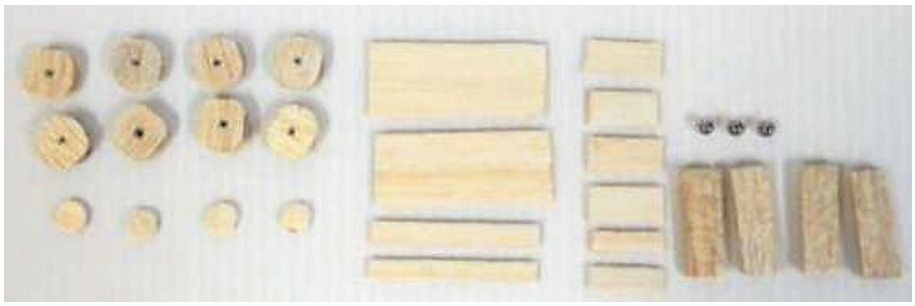


図４　段返り人形の部品

3-2　製作手順

段返り人形の製作手順を以下に示す。ここで，a～gは表1の材料に対応する。

＜胴体の製作＞

①　a，bは2枚ずつ，c 1枚を用いて直方体になるように接着剤で貼り合わせる。残りのc 1枚は，後に鉄球を入れるため開けておく。

＜脚の製作＞

② 脚の裏となるeに長辺から5mmの位置にしるしをつけ，dの10mm×4mmの面と貼り合わせる。

③ dの上部から6mmの位置に錐で穴を開ける。

④ fを両側から挟むようにgを貼りつけプーリーを製作する。このとき円盤の中心を合わせる。

⑤ プーリーの中心に錐で穴を開ける。

⑥ ③と⑤で開けた穴に，d，プーリー，ストロー，プーリー，dの順に竹串を通したものを2つつくる。プーリーとdは接着剤で固定する。

＜組み立て＞

① 胴体の20mm×50mmの両面に20mmの辺から10mmの位置にしるしをつける。

② ストローの部分を胴体の印に合わせてセロハンテープで貼りつける。

③ プーリーに糸を取り付ける。

④ 胴体に鉄球を入れ，cをセロハンテープで固定する。

⑤ 段返りをするように，糸の取り付け距離，張り具合，鉄球の個数を調節する。

図5に段返り人形の設計図を示す。

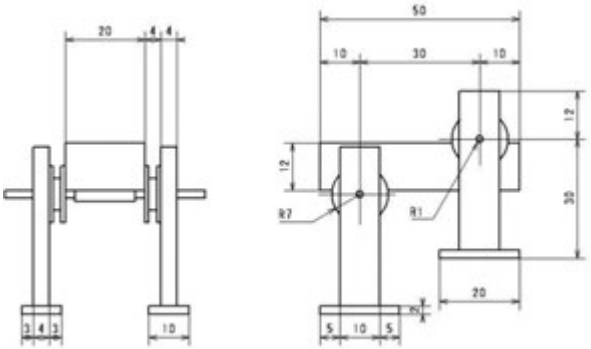


図５　設計図（JW-CAD）

４．教材用段返り人形の段返り実験

糸は，段返り運動において，脚を制御している重要な要素である。本実験では，段返り運動の動作原理を明らかにし，糸の取り付け位置，最適な糸の長さ，寸法条件（段の高さH，奥行きD，段返り人形の脚の長さh），鉄球の重さについての検討を行った。寸法パラメータの定義を図6に示す。ただし，胴体の寸法（50×20×12），軸間距離（30mm）などは図5に示す値で固定した。

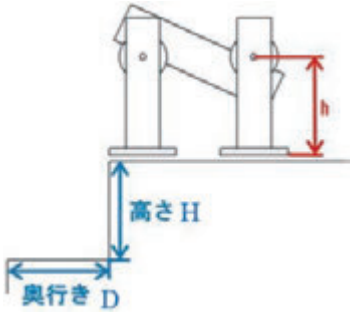
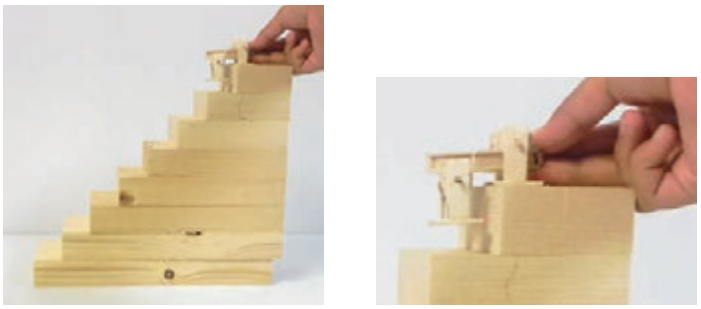


図６　実験における寸法パラメータ

実験では，図7（a）に示す9段の階段を使用し，段返り人形の初期状態として，図7（b）に示すように胴体が水平な状態から段返りを開始する。同一条件で10回段返り実験を行い，その成功率を用い，最適条件を明らかにする。



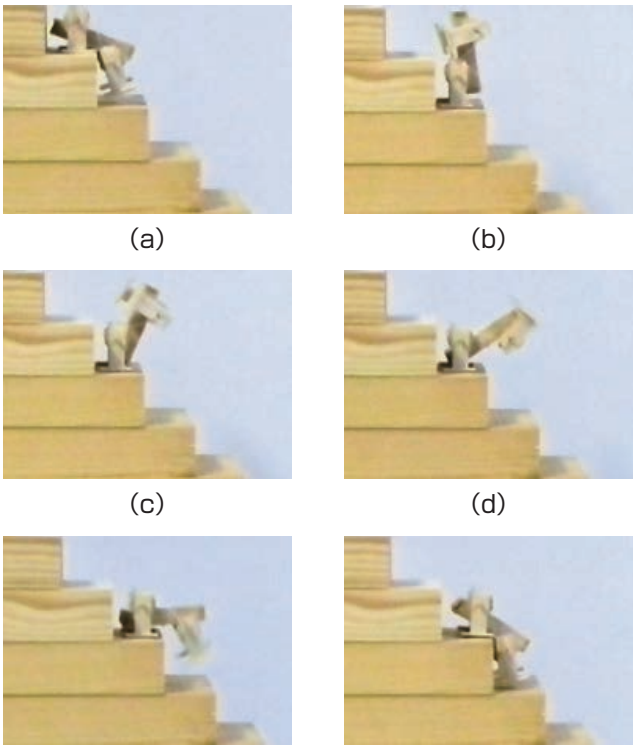
（a）９段の階段　　（b）段返り人形の初期状態

図７　段返りの階段と段返り人形

4-1　動画分析による動作原理の解明

製作した人形の段返り運動を30fps（1/30秒）の動画で撮影し，コマ送り画像で段返りの様子を調べた（図8）。段返り運動を以下の4段階で分類する。

第一段階：胴体内部の鉄球が前方に転がり，重心の移動が発生する（図8（a））。
第二段階：前方の脚の回転軸を中心に胴体が回転する（図8（b））。
第三段階：糸が張りつめ，後方の脚が引っ張られて振り出される（図8（c），（d），（e））。
第四段階：振り出された脚が下の段に接地，再び胴体が傾き重心の移動が発生する（図8（f））。



（a）　（b）
（c）　（d）
（e）　（f）

図８　段返りの様子

4-2　糸の取り付け位置の改良と最適な糸の長さ

糸の取り付け位置については，改良前，図9（a）に示す位置で取り付けていた。このとき，奇数段，偶数段で糸の巻き方が異なり，安定した段返りを行うためには，段の高さを変化させる必要があった。そこで，図9（b）に示すプーリーの最下部に糸を取り付けることで，段返りしても糸の巻き方に変化はなく，段の高さが一定のもとで段返りが安定した。

また，つくりやすさの観点から，最適な糸の長さを図10で定義される糸の取り付け距離で与える。脚の一方は立てた状態，もう一方は寝かした状態のときの端と端の間の距離である。ただし，胴体を取り付けていない状態において糸を取り付ける。

糸の取り付け距離を2mmずつ変化させ，各条件で10回ずつ段返り実験を行い，最適な距離を求める。実験結果を表2に示す。実験は，段の高さH＝30mm，段の奥行きD＝30mmの段で行い，糸の取り付け距離12mmのときが最適であった。改良後の段返り運動と糸の動きの模式図を図11に示す。

（a）改良前

（b）改良後

図９　糸の取り付け位置の改良

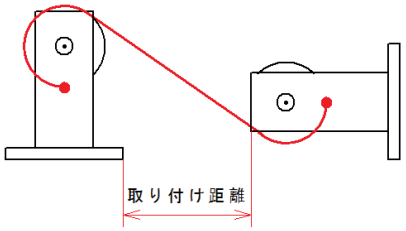


図10　糸の取り付け位置の定義

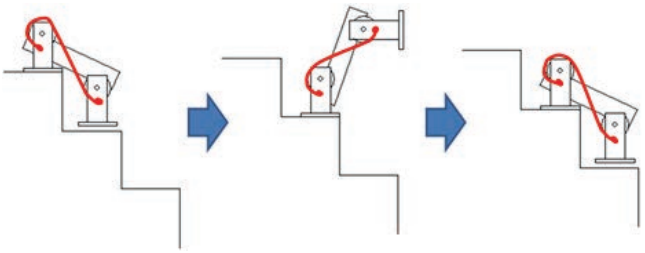


図11　段返りと糸の動き（模式図）

表2　糸の取り付け距離による段返りの様子

糸の取り付け距離[mm]	段返りの様子
8	逆立ちした状態で停止
10	脚を振り落とすことが不可能
12	1段ずつ段返りする
14	次の段に脚が振り落とされない
16	次の段に脚が振り落とされない

4-3　脚と段の最適寸法

脚の長さh，段の高さH，奥行きDの3条件をパラメータとし最適な条件を検討した。胴体内部に10個（4.4g）の鉄球を入れ9段の階段を用い，各条件につき10回段返り実験を行い，9段すべてを段返りした割合を成功率として求めた。

実験結果を表3に示す。h＝18～20mm，H＝30mm，D＝25～40mmの条件で成功率100%をえた。段の奥行きより高さの影響に左右されることがわかる。脚の長さh＝25mmでは，胴体の傾きが小さくなるため成功率も小さくなる。

表3　脚の長さ，段の高さ・奥行きに対する段返り成功率

(a)　h = 18 mm

成功確率[%]		奥行きD [mm] 20	25	30	35	40
高さH [mm]	20	0	0	0	0	0
	30	0	100	100	100	100
	40	0	0	80	10	70

(b)　h = 20 mm

成功確率[%]		奥行きD [mm] 20	25	30	35	40
高さH [mm]	20	0	0	0	0	0
	30	0	100	100	100	100
	40	0	0	30	60	0

(c)　h = 25 mm

成功確率[%]		奥行きD [mm] 20	25	30	35	40
高さH [mm]	20	0	0	0	0	0
	30	0	70	60	0	0
	40	0	0	0	0	0

4-4　段返りに必要な鉄球の数

胴体内部には，鉄球が入っており，鉄球が移動することで重心の移動がおこり段返り運動が行われる。段返りが可能な鉄球の最小個数を明らかにする。

脚の長さh＝20mm，段の高さH＝30mm，奥行きD＝30mmで固定して実験を行った。胴体内部の鉄球の個数をパラメータとし，10回段返り実験を行った。成功率および平均段返り時間を求める。

実験結果を表4に示す。鉄球0個では，成功率は0%であったが，1個で40%，4個からは100%であった。鉄球に対する平均段返り時間は，3個のときに最もゆっくり段返りを行い，個数の増加とともに段返り時間は短くなることがわかる。鉄球が4個（1.76g）あれば段返りを行う。

人形の段返りにおいて，単位質量（段返り人形の質量）単位長さあたり（水平方向の移動距離）のエネルギー消費量uは

$$u=\frac{(m+m')gH}{mL}=15.55\mathrm{J/kg\cdot m} \qquad (1)$$

で与えられる。ただし，m＝3.0gは人形の質量，m'＝1.76gは鉄球の質量，gは重力加速度である。

表4　鉄球の個数に対する成功率と平均段返り時間

鉄球［個］	成功率	平均段返り時間［s］
0	0%	−
1	40%	2.90
2	70%	2.94
3	90%	3.01
4	100%	2.89
5	100%	2.77
6	100%	2.65
7	100%	2.64
8	100%	2.54
9	100%	2.42
10	100%	2.39

4-5　階段途中における静止状態の回転モーメント

段返り運動において，鉄球が移動し胴体が傾き，脚が段について回転運動を行う。このときの鉄球および人形の重量による回転モーメントを算出することで，段返りにおける鉄球の運動の影響について検討した。階段途中における静止状態で，下段に着いた脚部回転軸まわりの回転モーメントを求める。鉄球に作用する重力による回転モーメントM_Fは鉄球の重量と回転軸からの距離の積で与えられる（図12）。鉄球1個の質量は0.44gであり，回転軸からの距離は，JW-CAD上で計測した。脚の長さh＝20mmの人形は，鉄球が3個で90％，4個からは100％成功するという結果から，3個以上でモーメントを求めた。

段返りと逆回転方向に作用する人形の胴体と脚の重力による回転モーメントは，M_B＝46.14gf・mmとなる。全体の回転モーメント$M = M_F + M_B$を表5に示す。

段返りと逆回転方向に作用する回転モーメントの方が大きいことがわかる。段返りは，鉄球が転がり落ちる速度による慣性の力を利用して段返りを行っているためである。鉄球の転がり落ちる速度は，全体の回転モーメントMを考慮して決定する必要がある。今回の実験では実施していないが，胴体内部に障壁を設けて，鉄球の速度を制御することも可能である。また，鉄球が6個以上になると，回転軸と鉄球までの距離が短くなり，鉄球の数の増加に対する回転

モーメントの影響は小さくなる。

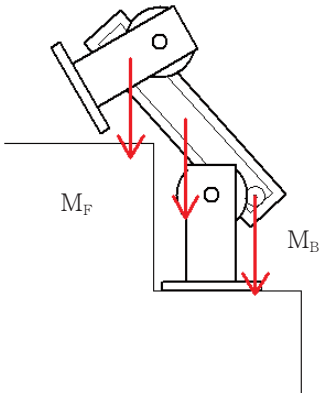


図12　階段途中における静止状態の回転モーメント
（矢印は左から脚・胴体・おもりの重力を表す）

表５　鉄球の個数と回転モーメント

鉄球［個］	M_F ［gf・mm］	M ［gf・mm］
3	10.01	-36.13
4	11.79	-34.35
5	13.56	-32.58
6	15.35	-30.79
7	15.57	-30.57
8	15.80	-30.34
9	16.03	-30.11

4-6　段返り運動の解析

動画分析により段返りの様子を明らかにする。動画をフレームに分割し，初期状態からの胴体の回転角度を計測した（図13）。本実験では，1秒間を30フレームに分割した。段返り人形の条件は，胴体の長さを50mm，軸間距離を30mm，脚の長さh＝20mm，段の高さH＝30mm，段の奥行きD＝25 mmと固定した。また胴体内部には10個の鉄球を入れ，9段の階段を用いた。

図14に，胴体の回転角度の時間変化を示す。図には段返りの周期性がみられ，段を降りる際に角度の変化が大きくなることがわかった。

測定した回転角度θから求めた胴体の角速度ωの時間変化を，図15に示す。ただし，時間きざみ$\Delta t=1/30$sとし，時間$t=n\Delta t$のときの角速度ω_nは次式で与えられる。

$$\omega_n=\frac{(\theta_{n+1}-\theta_n)}{\Delta t} \qquad (2)$$

図15において7－10，14－17，22－26，30－34，40－43，47－50フレームの速度変化は，糸のはたらきによって脚を引っ張るときである。糸の張力により，脚の回転が起こり，胴体の回転速度は減少する（図16）。17－20，51－54フレームで速度がマイナスになったのは，段返りした際に脚が壁面にあたり，リバウンドするためである（図17）。

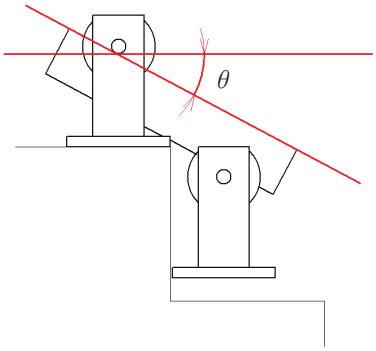


図13　初期状態からの胴体の回転角度

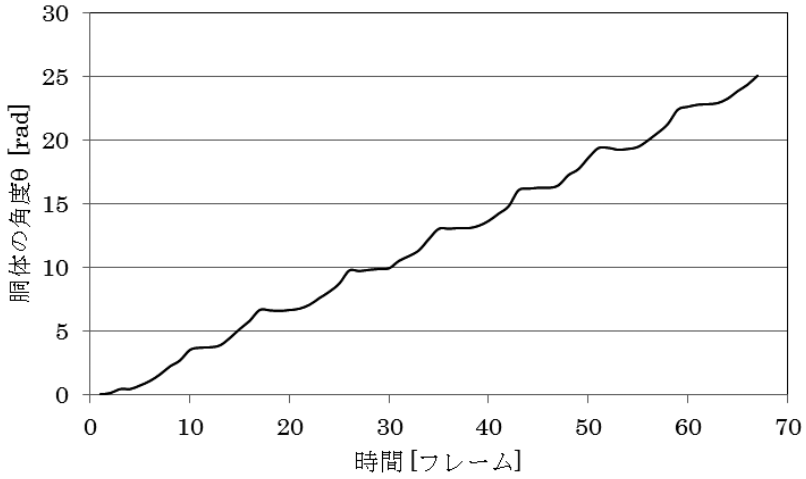


図14　胴体の回転角度θの時間変化

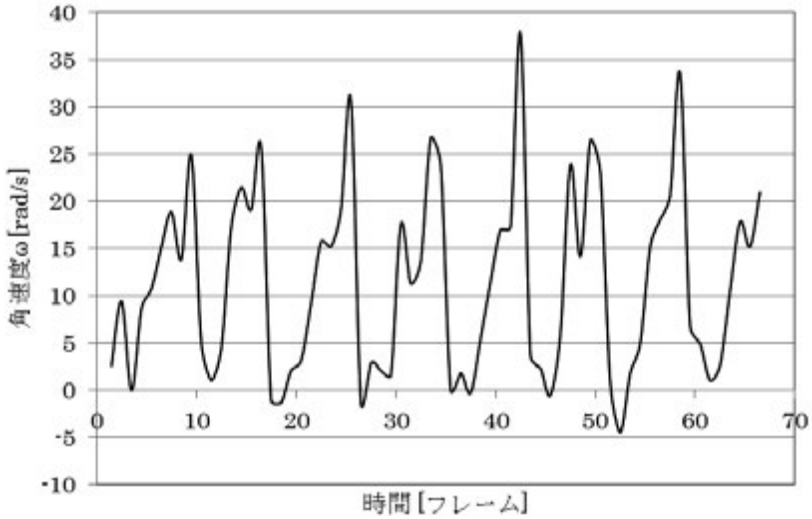


図15　胴体の角速度ωの時間変化

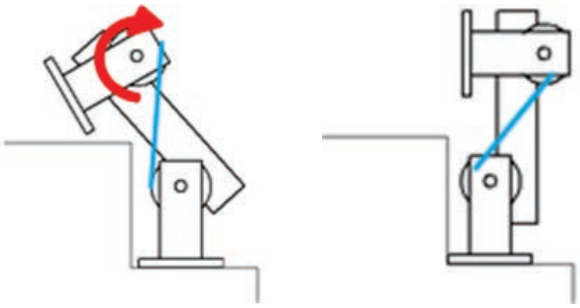


図16　段返り中の脚の回転における糸の役割

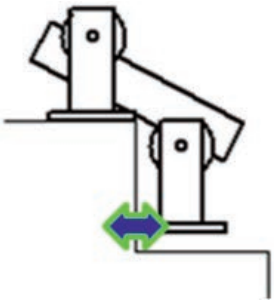


図17　脚の壁面でのリバウンド

５．結言

本研究では，日本古来のからくり人形を取り上げ，中学校技術・家庭科における段返り人形教材の開発を行った。バルサ材を用いた段返り人形を製作し，段返り実験を行い，以下の結論を得た。

糸の果たす役割を明らかにし，取り付け位置を改良することで，すべての段で同一の段返り動作を行い，安定した段返り運動を行うことが可能になった。

段返り運動の動作原理を明らかにし，寸法パラメータ（段の高さ，奥行き，段返り人形の脚の長さ），鉄球の重さの条件，段返りのエネルギー消費量を示した。

本研究は，平成25年度科学研究費補助金（課題番号：24501095）の援助による。

参考文献

１）文部科学省：中学校学習指導要領解説（2008）
２）文部科学省：中学校学習指導要領解説 技術・家庭科編（2008）
３）文部科学省：中学校学習指導要領解説 理科編（2008）
４）文部科学省：第3期科学技術基本計画（2006）
５）文部科学省：第4期科学技術基本計画（2011）
６）松永泰弘，大石美由紀：段返り人形の教材化に関する研究，第27回日本産業技術教育学会東海支部大会講演論文集pp.129－132（2009）
７）細川半蔵：機巧図彙（1796）
８）大人の科学.net：からくり段返り人形
http://otonanokagaku.net/products/karakuri/somersault/detail.html（2013.9.17確認）