

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：35302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760247

研究課題名(和文) 球面踵部，扁平足およびバネ足関節を持つ3次元受動歩行の安定解析とその実現

研究課題名(英文) Development and Stability Analysis of 3-D Passive Dynamic Walking with Spherical heels, flat feet and ankle springs

研究代表者

衣笠 哲也 (KINUGASA, Tetsuya)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：20321474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：この課題では，緩斜面を下り降りることで動力を用いず自然で効率的に歩行する受動歩行に注目し，踵が円弧で扁平な足と足首にバネを持つ3次元2足歩行機を実現し，さらに，モータにより伸縮する膝関節を導入することで水平面においても継続的な歩行を実現することに成功した．さらに，歩行機の歩容について足裏の圧力中心軌跡が人と同じ8の字を描くことを明らかにした．また，より効率的に歩行できる振動数が存在するとともに，歩行が継続する振動数が複数存在することを確認した．これは，マラソンにおけるストライドとピッチ2つの振動数の異なる走法などに見られるもので，興味深く意義のある結果と言える．

研究成果の概要(英文)：The purpose of the study is to realize a 3D dynamic biped with flat feet, ankle springs, and spherical or arc shaped heels, which is based on passive dynamic walking mechanism. First, we developed a 3D passive dynamic walker with flat feet and ankle springs, and analyzed its gait using various sensors. As a result, we found that ballast attached to the legs could stabilize 3D biped gait critically. Moreover, we observed that ZMP trajectory drew '8' shape, which was similar to that of human's gait. This result suggested that the shape of heel should be arc (i.e., did not need corners, such as a square), and therefore, we introduced an arced sole for the prototype biped. Secondly, we attempted to develop a 3D dynamic biped on the horizontal surface using oscillation of telescopic knees. As a result, we achieved 3D dynamic biped walking, and also revealed frequency response properties of the walking gait. Moreover, we observed two modes of the gait.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：2足歩行 受動歩行

1. 研究開始当初の背景

McGeer に始まる受動的歩行は、自然かつ効率的で Sagittal 平面運動では ZMP を支持多角形内に納める必要がないことを示しているが、安定性が低いという問題を抱えていた。3D 受動歩行機に関してはアンティークイの考察から始まり、最終的に Collins らが、円弧足と yaw 軸まわりのモーメント補償を用いることで滑らかな 3D 受動歩行を実現したが、他の報告例はほとんど見られず安定性に関する議論も見られなかった。一般的に足と路面との相互作用は歩行動作への影響が強く、最適な形状について考察することが求められる。しかしながら、受動歩行分野における研究は足底に取り扱いが容易である円弧や球面などによる幾何学的な拘束をもうけることで歩行を安定化していた。そのため、3D 受動歩行の場合、足形状の作り込みに依存するところが大きく、安定性が何によって支配されるのか明確に実証されていなかった。我々は研究開始当初までの研究で、扁平足とバネ足関節を持つ 3 次元 2 足受動歩行を実現していたが、踵部が方形で足関節より後方に大きく伸びている点は不自然であるだけでなく、路面との衝突点ともなるため歩幅の増加に対して不安定な挙動を誘発していた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、扁平足とバネ足関節および球面もしくは円弧踵部を持つ歩行機を用いて歩行を実現し、歩行解析を行うことを目的とする。また、一般的な人の歩行における圧力中心軌跡などと比較することで歩行の類似性を評価する。

3. 研究の方法

まず、3 次元受動歩行の歩容を解析するために、これまで開発してきた 3 次元 2 足受動歩行機 RW03 (図 1 左) の足裏圧力中心点および姿勢角度の検出をおこなった。足裏圧力中心点は 6 軸力覚センサを、姿勢角度は股関節にポテンショメータ、球面関節で構成される足関節には、研究支援者である赤木らの開発した柔軟変位センサを用いた (図 1 右)。これらの計測データ、特に足底圧力中心軌跡から、足裏の接地すべき領域を明らかにする。



図 1. 3 次元受動歩行機 RW03

さらに、歩行の安定化に重要な役割を果た

すことが明らかになっていたバラストによる重心位置の調整をおこなうと上記センサで検出される歩容データがどのように変化するか解析することで、受動歩行の安定性とバラストとの関係を明確にする。

また、以上の方法によって得られる 3 次元受動歩行機の身体形状を引き継ぎつつ、水平面状で歩行できる 3 次元 2 足動歩行機 RW04 を実現する。具体的には、過去にその有効性が検証された直動膝関節を実装し、正弦波状に伸縮させるのみで歩行の実現を試みた。

この正弦波伸縮による歩行は、膝関節を入力、股関節角度 (歩幅) を出力と捉えると周波数応答解析を適用できる。したがって、膝の周波数を変化させながら歩行データを取得し、歩行の周波数応答特性を明らかにすることで歩行機の特性格解析をおこなう。

4. 研究成果

4. 1 3 次元受動歩行機の歩容解析

まず、円弧踵部と扁平足およびバネ足関節を持つ 3 次元 2 足受動歩行機 RW03 の足関節の屈曲角度および方向角度を図 2、3 に、また、両脚間の相対角度 (股関節角度) を図 4 に示す。

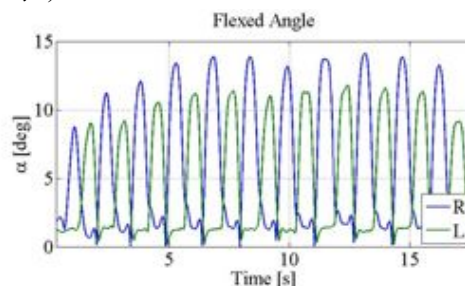


図 2. 足関節屈曲角度

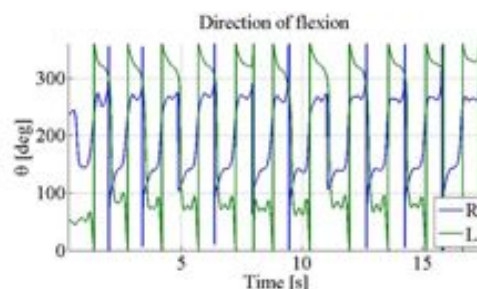


図 3. 足関節屈曲方向角度

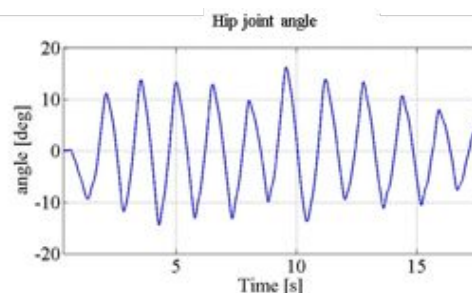


図 4. 両脚間の相対角度

これらのデータを用いると歩行中の姿勢が図 5 に示すようなスティック線図として

表現することができる。この図から、RW03は左右に大きく揺動しながら斜面を降っている(x軸正方向に進んでいる)ことがわかる。RW03は脚に膝関節を設けていないため、遊脚が地面と接触することを避けるには揺動の振幅をある程度大きくする必要がある。見方を変えると、膝を持たないRW03が身体形状に合わせた受動歩行を実現していると言える。

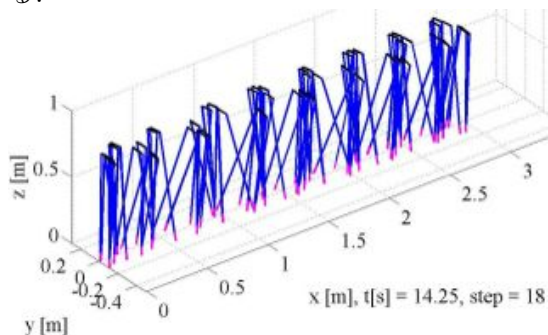


図5. 3次元受動歩行のスティック線図

以上の準備のもとで、歩行機のバラスト位置を変化させて股関節角度と足関節角度の変化を調べた結果を図6に示す。

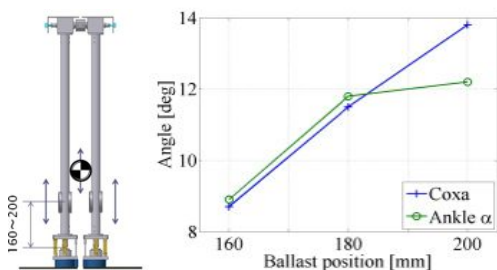


図6. バラスト位置と歩容の関係

この図から、この図から、バラスト位置が高くなると歩幅および左右の振幅が大きくなるのがわかる。各振幅は、小さいと歩行継続が困難となり、大きいと転倒することから、バラスト位置を調整することで自励振動の振幅が調整され、結果として安定な歩行が得られると言える。

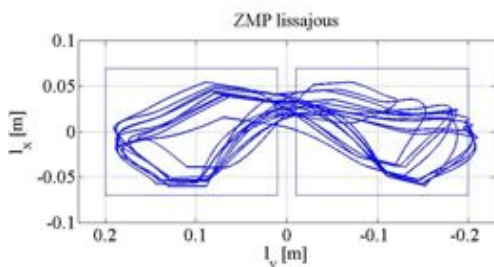


図7. 足裏圧力中心点軌跡

つぎに、足裏圧力中心点のリサージュ波形を図7に示す。図は、縦軸正方向が進行方向を表し、図内に描かれた2つの長方形は歩行機の足底範囲を表す。この図から、足裏圧力中心点が横長の8の字を描き、かつ、足底範囲内に収まりながら歩行していることがわかる。したがって、lateral方向に1

周期運動する間に、sagittal方向に2歩進むという振動の重ね合わせがなされていることを意味している。人の場合、縦長の足底形状に沿った8の字を描くことが知られており、得られた結果からRW03によってこの点を構成論的に示すことができたものとする。

また、足底圧力中心点の軌跡から、足部内側前後の角で重心を支えることはないことがわかる。歩行時、足裏の内側、特に後部の角が路面に接地するとき、この角まわりでヨー軸方向に回転し、歩行が不安定になる傾向が見られた。

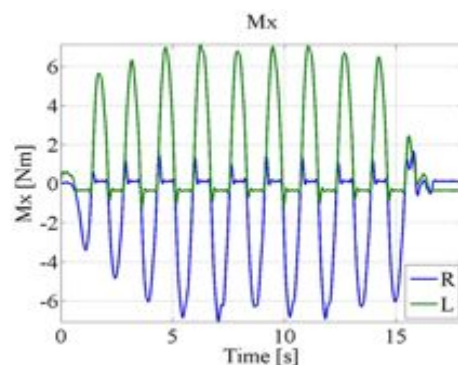


図8. ロール軸回りのモーメント

さらに、図8にロール軸回りのモーメントの時間応答を示す。この図からロール軸回りのモーメントは滑らかな単振動に近い時間応答を示していることがわかる。つまり、Lateral方向において重力によるバネマス系としての単振動が励起され、この運動に支配されながら歩行しているといえる。

4. 2 膝の伸縮による3次元2足歩行

次に、受動歩行の歩容解析の結果から、RW03の身体特性に基づいて水平面上における歩行を実現する3次元2足歩行機RW04(図9)を開発した。



図9. 3次元2足歩行機RW04

前述したように受動歩行機RW03の特徴として、ロール軸回りの振動が支配的であり、脚重心位置が高くなるとこの振幅が増大し、結果として歩幅が大きくなる。したがって、バラストによる脚重心位置の調整が左右の振動と歩幅を調節するために有効であった。RW04の直動膝関節の伸縮はロール軸回りの

振動を励起する役割を果たすものと考え、膝伸縮の振動数を調整することで共振させ足踏み運動を励起させる。また、前傾姿勢によって遊脚が振り出される効果を利用した。具体的には足関節のバネ部分にスペーサを取り付けることで脚、従って歩行機全体を前傾姿勢とし、水平面において直立姿勢を取っている場合でも遊脚が前方に振り出せるようにしている。前傾角度は鉛直姿勢から3.4度である。この遊脚の振り出し量つまり歩幅は、膝の振幅と振動数によって調整される。

また、受動歩行機において歩行を不安定化する要因であった足裏内側の角を円弧形状にし、より安定した接地をはかった。

以上の準備の下で歩行実験を行った。膝の伸縮は次式で与える正弦波を目標軌道として用いている。図10に歩行の様子を示す。



図10. 歩行の連続写真

図から、RW04は左右にゆれながら前進し、画面左から右まで歩行していることがわかる。膝の伸縮は周期2秒（1歩あたり1秒、 π rad/s）から徐々に増加させ、振幅は5 mmとしている。角振動数5.34 rad/sとしたと

き最も歩幅の大きい歩行が実現された。また、膝の振幅と周期は励起されるロール軸回りの振幅を制御する役割があり、これは、受動歩行機におけるバラストの位置調整と同様の効果を持つと言える。

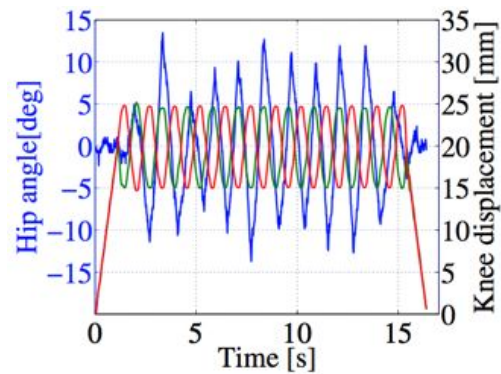


図11. 5.03[rad/s]における股関節角度

図11に最大平均歩幅となった膝角振動数5.03[rad/s]における歩行実験結果の両脚相対角度および左右膝変位を示す。この図からわかるように、平均歩幅角（青線）10度で22歩、歩行していることがわかる。歩数はケーブルの長さに依存しているため、トレッドミルを用いるなどすることで増加させることが期待できる。また、膝の変位から膝の角振動数5.03[rad/s]となっていること、および、目標の振幅5[mm]を達成できていることが確認できる。歩行角振動数（1周期を2歩に要する時間として定義）はばらつきを持つが平均するとほぼ膝の伸縮周期と一致している。これは前章で述べた受動歩行機RW03のロール軸回りのモーメントの角振動数5.24 rad/sともほぼ一致している。したがって、RW04は受動歩行機RW03の歩行振動特性を受け継いでいると言える。

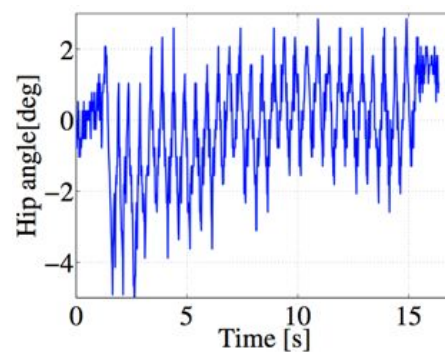


図12. 12.6[rad/s]における股関節角度

次に、膝の角振動数を12.6[rad/s]とした場合における歩幅の時間応答波形を図12に示す。次節で述べるように、8~10[rad/s]の入力を与えると歩行機は途中で転倒する。しかし、この振動数では転倒することなく歩行を継続することが可能であった。このとき1歩あたりの時間は約0.25[s]、歩行角振動数で12.6[rad/s]となっており、膝の角振動

数と一致している．5.03[rad/s]と比較すると振動数が2.5倍となり，歩幅は1/3程度と小さくなっている．これは，歩行の振動モードにおいて1次と2次のモードが励起されているものと考えられる．

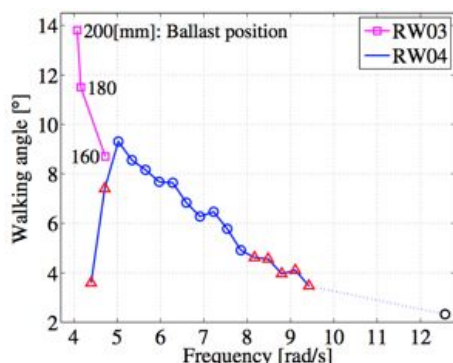


図1.3. 歩行の周波数特性（ゲイン）

つぎに，膝の伸縮周波数を変化させて歩容がどのように変化するか，いわゆる周波数応答解析を行う．具体的には，膝の振幅を5[mm]で一定とし角振動数を変化させ，歩行する範囲における歩幅[rad]をゲインとして歩行の周波数応答特性（ゲイン特性）を調べた．実験は各周波数毎に5回ずつ15秒間歩行させ，各実験における平均歩幅を算出している．その結果を図1.3に示す．図中の青○印は5回の試行の半数以上で転倒しなかったことを示し，赤色△印は5回の試行のうち3回以上途中で転倒したことを意味している．転倒した場合は正常なステップにおける歩幅のみを用いてゲインを得ている．また，後述する12.6[rad/s]の場合を黒○印，受動歩行機RW03のバラスト位置の変化に対する歩行振動数と歩幅角の関係をマゼンダ□印で示している．遊脚の固有振動数は3.9[rad/s]であったので，膝の振動数は遊脚の振動数の2倍前後を取るとき歩行している．また，約5[rad/s]付近に共振点があるものと考えられることから，この5[rad/s]がRW04の歩行における固有振動数であると見なすことができる．我々は以前の研究においてラテラル方向の自由度を拘束した2次元歩行機を用いた実験および数値解析によって歩行の周波数応答特性を明らかにしてきた．しかし，数値解析によって示されたゲイン特性のピーク（共振点）が実験においては確認できなかった．今回の実験によって歩行のゲイン特性に共振点が存在することが確認された．

以上の結果として，膝伸縮の周期を調整することで足踏みおよび歩行が励起され，また，振幅を調整することで歩幅が調整されるため，水平面上における継続的な3次元2足歩行が実現できた．これは，「要素が相互作用したとき，全体として要素の性質や振舞いの総和でない新たな性質や振舞いが発生」しているという創発とらえた場合，足裏の接地感覚のフィードバックに基づく引き込みさえ必要としない非常に原始的な3次元2足

歩行の創発の一例と考えられる．さらに，膝入力に対する歩行の周波数応答特性を解析した結果，5[rad/s]付近で共振点をもつゲイン特性が明らかになった．また，この共振点付近で歩行が継続されることが確認されるとともに，この振動数の2倍付近においても継続歩行が確認された．これは，この歩行機が2つのモードで歩行可能であることを示唆している．歩行モードについては不明であるが，走行モードとしては長距離走におけるストライド走法とピッチ走法のようにモードの異なる走行が知られており，人間の移動手段である2足直立歩行における2つのモードの存在を歩行機により示したという意味で興味深い結果と言える．

4. 3 教材としての3次元2足歩行機

3次元受動歩行機の派生的な成果としてプラスチック段ボールを用いた教材（図1.4）を開発した．

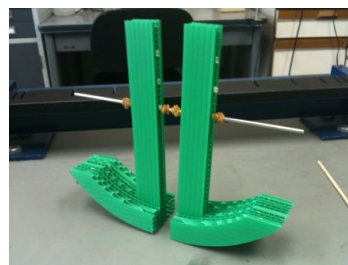


図1.4. 教材としてのプラスチック段ボールを用いた2足歩行機

この教材に対し，学部で履修する基本的な力学と数学に基づいた設計手法を提案し，講義において設計，製作，実験をおこない教材としての有効性を検証した．さらに，小学生対象の工作実験教室を実施し，好評を得ている．

4. 4 胴体を持つ受動歩行機の安定化領域拡大に関する研究

さらに，受動歩行を水平面上の歩行に拡張するために胴体の傾斜を利用する歩行手法（図1.5）について検討した．両脚間に配置された胴体は，その姿勢を維持するために支持脚側でトルクを発生する必要がある．胴体が前傾するとこのトルクは脚側に対して歩行機全体を前進させるための推力として作用する．これを利用することで水平面上に受動歩行を拡張した準受動歩行が可能となる．しかし，この歩行は非常に安定化領域が狭いため（図1.6），幾何学的拘束制御を導入することで問題を解決する方策を検討した．図1.6は準受動歩行と幾何学的拘束制御による安定化領域の比較である．この図からわかるように，準受動歩行の安定化領域（濃い市松模様部分）は非常に狭く，実験装置などを実現するのは難しいことが予想される．一方，機が学的拘束制御を導入することでその領

域は大幅に拡大される。したがって、幾何学的拘束制御によって歩行を安定化した後、準受動歩行に切り替えることでより自然で効率的、かつロバストな歩行が実現できるものとする。

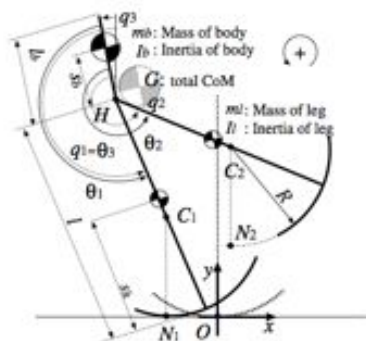


図 1 5. 胴体傾斜による歩行機

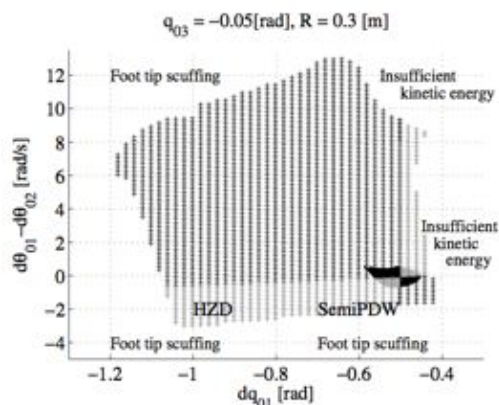


図 1 6. 準受動歩行と幾何学的拘束制御による歩行の安定化領域

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 胴体の傾きによる推力を利用した 2 足歩行について, 衣笠哲也, 吉田浩治, 藤本真作, 日本ロボット学会誌, 査読有, 32(2), pp.183-189, 2014
2. 3D Quasi-passive Walking of Bipedal Robot with Flat Feet, S. Fujimoto, T. Kinugasa, K. Yoshida and H. Watanabe, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 査読有, Vol. 5, No. 2, 95-104, 2013.
3. 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, 土師貴史, 入部正継, 小林智之, 藤本真作, 吉田浩治, 日本ロボット学会誌, 査読有, 31(2), 154-160, 2013

[学会発表] (計 1 1 件)

1. Measurement of walking gait for 3D passive dynamic biped walker, T. Ito, T. Kinugasa, T. Akagi, S. Fujimoto, K.

Yoshida, M. Iribe, Proc. of XX IMEKO World Congress, 査読有, TC17-0-2, 11, Sep., 2012, Busan, Korea.

2. Legged Robot Design Applying the Behavior of Passive Dynamic Walking, M. Iribe, H. Hirose, T. Kinugasa, K. Osuka, Proc. of 2012 Intl., Symposium on Nonlinear Theory and its Application, 査読有, 23, Oct., 2012, Palma, Majorca, Spain.

3. Passive dynamic quadruped walker with at feet and ankle springs, T. Kinugasa, H. Komatsubara, K. Yoshida, 他 3 名, Proc. of Climbing and Walking Robots, 査読有, 517-524, 7, Sep., 2011, Paris, France.

4. 受動的動歩行の性質を利用した脚歩行ロボットの設計手法, 伊藤, 衣笠, 他 3 名, SI2013, 1H2-5, 2013 年 12 月 19 日, 神戸.

5. バネ足首と扁平足を持つ 3 次元 2 足準受動歩行機 : 膝の伸縮による水平面への拡張, 伊藤, 衣笠, 吉田, 藤本, 入部, ROBOMECH2013, 2A2-E07, 2013 年 5 月 24 日, つくば.

6. 教育のための段ボール受動歩行機: 小学生対象の工作教室と大学生対象の講義の実践, 衣笠, 小林, 土師, 吉田, 藤本, 入部, 第 1 3 回 SICE-SI 部門講演会, 2F3-6, 2012 年 12 月 18 日, 博多.

7. 胴体の傾きを利用した準受動歩行と HZD 制御, 衣笠哲也, 吉田浩治, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I2-3, 2012.

8. 3 次元 2 足受動歩行機 RW03 の設計とその歩容について, 伊藤, 横川, 衣笠, 土師, 吉田, 赤木, 藤本, 入部, ROBOMECH2012, 1A1-Q08, 2012 年 5 月 28 日, 浜松.

9. 段ボールを用いた 3 次元受動歩行機 RW-P02 の設計について, 小林, 衣笠, 土師, 吉田, 藤本, 入部, ROBOMECH2012, 1A1-Q09, 2012 年 5 月 28 日, 浜松

10. 3 次元 2 足受動歩行機 RW03 の歩容計測, 伊藤, 横川, 衣笠, 他 3 名, SCI' 12, pp. 289-290, 2012 年 5 月 22 日, 京都

11. 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, 衣笠, 小林, 土師, 吉田, 入部, ROBOMECH2011, 2A2-G08, 2011 年 5 月 28 日, 岡山

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] ○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

www.mech.ous.ac.jp/robotics/index_pdw.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

衣笠 哲也 (KINUGASA, Tetsuya)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 20321474