

運動機能障害者のための水中リハビリ装置の開発

~第 1 報 歩行様動作の再現~

Development of underwater rehabilitation device for persons with motor disability
~First: Reproduce the stepping kinematics~

○小松布美恵¹⁾, 三好扶¹⁾, 河島則天²⁾

Fumie KOMATSU, Tasuku MIYOSHI, Noritaka KAWASHIMA

1)岩手大学工学部, 2) 国立障害者リハビリテーションセンター研究所

1) Faculty of Engineering, Iwate University

2) Research Institute, National Rehabilitation Center for persons with Disabilities

キーワード：歩行訓練(gait training), 鉛直軸に対する角度(elevation angle), 回帰平面(regression surface), 法線ベクトル(normal vector), アクアエクササイズ (aqua-exercise)

連絡先：〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科
三好扶, Tel&Fax: 019-621-6357, E-mail: tmiyoshi@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

近年の歩行ニューロリハビリテーションでは、脊髄神経回路網の可塑性の性質を積極的に利用し、歩行運動を再び脊髄に学習させる方法がとられる。Wernig らは免荷式立位歩行トレーニング (BWSTT) を実施し、脳卒中片麻痺者らが自律歩行を再獲得すると報告したが⁽¹⁾、BWSTT では特に理学療法士の肉体的負担が大きいため、長時間の訓練には不向きであった。これに対し、Colombo らはロボット技術援用型免荷式立位歩行トレーニングシステム Lokomat を開発し⁽²⁾、長時間の繰り返し訓練を可能にした。

アクアエクササイズは、水の物理的性質を活用するため、浮力で関節への荷重が軽減でき、且つ流体抵抗に抗して推進力を発揮する⁽³⁾。しかしながら、運動強度は医師や療法士らの経験則にゆだねられており、またトレーニング中の転倒の危険性、歩行運動機能障害者や理学療法士の努力に比例する効果が正確に得られているかなどの疑問点も残る。

我々のグループでは、日常生活では車いすを使用する脊髄不全損傷者が、水中では立位保持が可能であることを観察している。これは、水中環境で使用できる簡便な歩行トレーニング機器が開発できれば、BWSTT の効果と水の物理的性質を積極的に融合した新たな歩行ニューロリハビリテーションが提案できることを示唆する。また、歩行リハビリテーションでは、4 節リンク機構を利用したステップング機構が有用であることが報告されている⁽⁴⁾。以上を鑑み、本研究ではアクアエクササイズとステップング機器を組み合わせた新たな水中立位歩行トレーニングを提案するよう、安全で歩行リハビリテーションに効果的な水中歩行様運動リハビリ装置の開発することを目的とした。

2. 水中歩行様運動リハビリ装置

2.1 開発コンセプト

歩行訓練の神経生理学的背景には CPG(中枢パターン発生器)と呼ばれる、脊

髄運動ニューロンプールの自律的な発火パターンが重要とされている。この CPG を活性化させる条件は、(1)立脚期と遊脚期を交互に周期的に繰り返すこと⁽⁴⁾、(2)股関節の屈曲伸展を引き出すこと⁽⁵⁾、および(3)足底に荷重を加えること⁽⁶⁾、の3要素が重要とされている。そこで、本研究で開発するリハビリ機器では股関節の屈曲・伸展運動が簡単に引き出すよう、図1のような4節リンク機構のステッピング運動機器をベースとする。

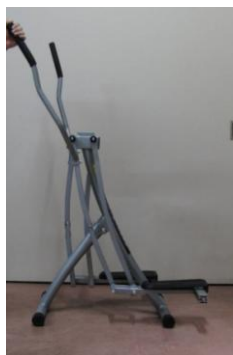


Fig.1 ステッピング運動機器

2.2 歩行様動作の定義

本研究において、歩行様動作とは以下の3項目：下肢関節角度変化パターンの再現性に着目した「歩行様 kinematics」、足底への荷重変化の再現性に着目した「歩行様 kinetics」、およびCPGの活動動態を表す「歩行様 EMG⁽⁴⁾」とする。

2.3 開発方針

本研究では、(1)歩行様動作のうち「歩行様 kinematics・kinetics」の再現と、(2)安全な運用(転倒防止)を達成目標とする。歩行様動作の再現性に関して、ステッピング運動機器の使用では、股関節の屈曲伸展が引き出され、足部の並進運動が実施される。⁽³⁾しかしながら、膝関節は伸展位が保持され、歩行様動作が再現されない。この問題を解決するため、図2に示す、足部蹴りだしにおいて膝が受動的に屈曲するために、ペダル部分が足先部を回転中心として跳ね上がるよう、バネ機構を搭載した。この機構はバネ取り付け部の長さを調節可能にし、初期張力を調節できる。改良後の装置を図3に示す。

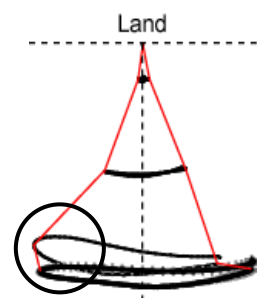


Fig.2 矢状面の下肢3関節中心軌跡⁽⁷⁾



Fig.3 完成図

3. 動作解析実験

本研究で開発する水中歩行様運動リハビリ装置の使用による歩行様動作の再現性、装置使用時のバネ張力変化による足底部荷重推定、初期張力変化による歩行様動作の再現性を確認するため、動作解析実験を実施する。被験者は健康男性8名(身長 172.5 ± 4.1 cm, 体重 64.6 ± 5.2 kg)を対象とし、被験者へは事前に本実験の趣旨を説明し、実験参加の同意を得た。

実験条件について、水深は下腹部(被験者のおよそ50%免荷)とし、水温は34°Cに調節した。ステッピング装置はバネ機構の初期張力が強/弱、および機構を搭載しない3条件とし、動作速度は0.6 Hzとした。計測時間は30秒とした。

動作解析は3次元動作解析システム(NaturalPoint, OptiTrack FLEX:100)で計測した。一般に、本システムを含めた赤外線反射式動作解析システムでは、カメラから赤外線光を照射し、マーカーから反射した赤外線を受光し計測する。一方、水中実験施設は側面アクリル板に赤外線が反射するためプール内の反射マー

カーを検出することが困難であった。そこで、本研究では特殊な水中用 LED 発光マーカー(アイエス・エンジニアリング)を開発し、ここからの発光を検出した。マーカーの貼付位置は、腸骨稜・大転子・仙骨・膝関節・足関節・つま先・バネ起始/停止部の 8ヶ所とした。フレームレートは 100Hz とした。

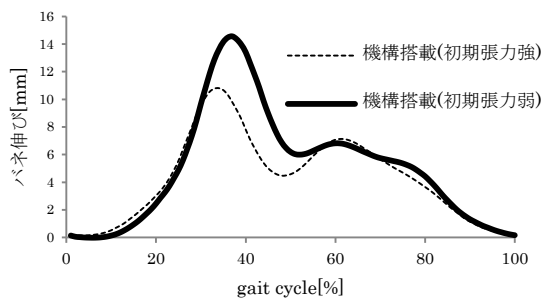
計測したマーカーの 3 次元座標を VENUS 3D(ノビテック)にて再構築し、股膝・足関節の elevation angle, バネ起始/停止間の 2 点間距離を算出した。得られた関節角度変化は 4 次バターワースフィルタ(遮断周波数 5 Hz)によってノイズ除去を実施した。

データ解析は、股関節最大屈曲時から再び最大屈曲位となる期間を 1 周期とし、各関節角度, およびバネ長変化を 10 周期分で加算平均した。

4. 実験結果と考察

被験者 2 名分のバネ長変化を図 4 に示す。バネ長変化は周期的変化を示し、かつ必ずゼロとなるフェーズが存在する。

(a)被験者 A



(b)被験者 B

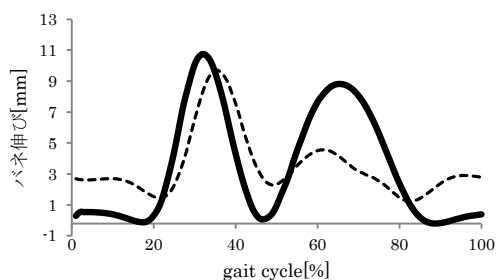
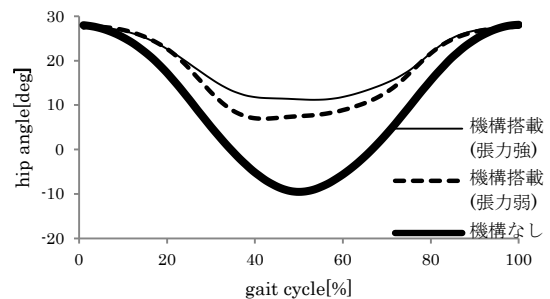


Fig.4 水中ステップング運動時のバネ長変化

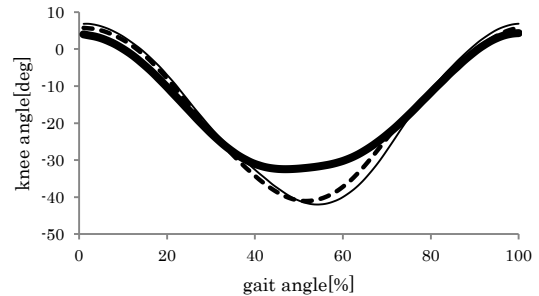
これは張力の On/Off が存在することから、歩行時の立脚相/遊脚相を再現することを意味し、歩行様 kinetics が再現されたと示唆される。

図 5 に各条件での 1 周期中の各関節角度変化を示した。バネ機構を搭載することで股関節の伸展は減少し、膝関節は屈曲が増加した。また初期張力が強いほど膝関節屈曲が増大した。足関節はバネ機構を搭載することで蹴りだし時の底屈が増大することが分かる。

(a)股関節角度変化



(b)膝関節角度変化



(c)足関節角度変化

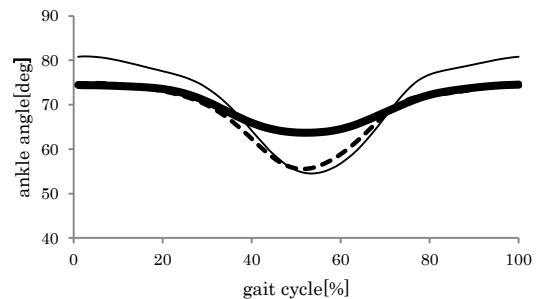


Fig.5 下肢 3 関節角度変化

股関節において正が屈曲, 負が伸展であり, 膝関節において, 正が伸展, 負が屈曲, 足関節は正が背屈, 負が底屈である。

図6は、各条件下における1周期中の下肢3関節角度変化を3次元プロット及び回帰平面として示した。Elevation angle は、陸上歩行時は一意な平面に収束する。一方、キック動作などではこの平面上には乗らないことが報告⁽⁸⁾されている。本実験より、ステップング運動機器使用時においてバネ機構を用いると回帰平面の法線ベクトルが陸上歩行の法線ベクトルと近似しており、この結果は装置使用時において歩行様 kinematics が再現されたと示唆され、本研究での開発目標である水中環境下での歩行様運動リハビリ装置の開発が達成された。しかしながら、バネの初期張力によっては回帰平面の傾きが急峻となる、また股関節可動域が減少しており、これらの点はバネ初期張力の調整がさらに必要であろう。

5. まとめと展望

水中歩行様運動リハビリ装置の開発について、バネ機構を搭載することで、下肢3関節の Elevation angle 変化パターンと足底にかかる荷重変化それぞれが歩行様動作に関連付けられ、総じて陸上歩行様動作の再現性が確認された。

股関節可動域の減少は、特に伸展位の減少として表出した。ここで股関節筋群の活動動態を予備的に調べたところ、大腿直筋と大腿二頭筋の活動増大が見られた。今後の課題として、本バネ機構を搭載したステップング運動装置を水中で使用した際の筋活動電位を計測・評価することで、水中環境ならではの歩行リハビリ装置の開発を進めていく。

謝辞

本研究は株式会社ノビテックの技術提供ならびに同社佐藤眞平氏の情報提供により実施した。記して謝意を示す。

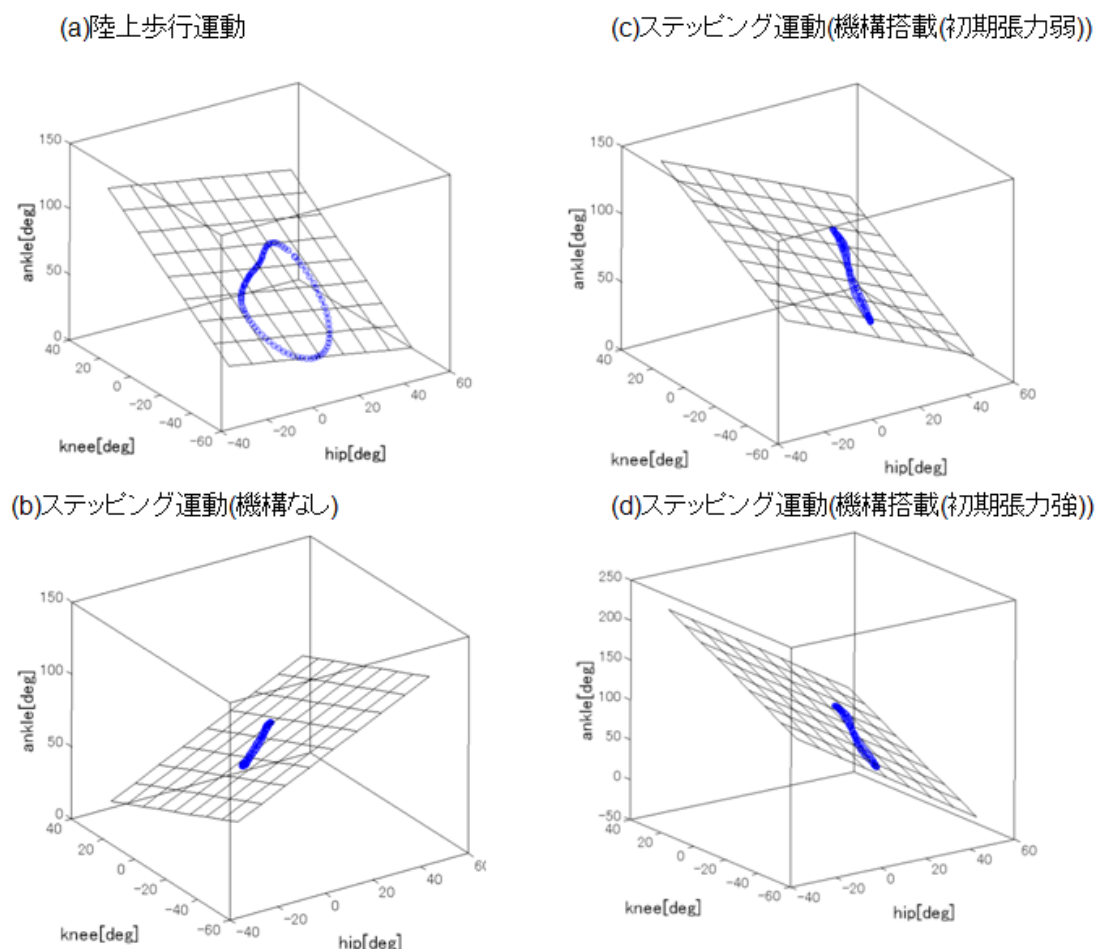


Fig.6 下肢3関節角度の3次元プロットと回帰平面

参考文献

- 1) Wernig A, Muller S, Nanassy A, Cagol E: Laufband therapy based on 'rules of spinal locomotion' is effective in spinal cord injured persons. *Eur J Neurosci*, 17-4, 823/829 (1995)
- 2) Colombo G, Joerg M, Schreier R, Dietz V: Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis. *J Rehabil Res Dev*, 37-6, 693/700 (2000)
- 3) Miyoshi T, Shirota T, Yamamoto S, Nakazawa K, Akai M: Effect of the walking speed to the lower limb joint angular displacements, joint moments and ground reaction forces during walking in water. *Disabil Rehabil*, 26-12, 724/732 (2004)
- 4) Kawashima N, Nozaki D, Abe OM, Akai M, Nakazawa K: Alternate Leg Movement Amplifies Locomotor-Like Muscle Activity in Spinal Cord Injured Persons. *J Neurophysiol* 93, 777/785 (2005)
- 5) Dietz V: Proprioception and locomotor disorders. *Nat Rev Neurosci*, 3-10, 781/790 (2002)
- 6) Harkema SJ, Hurley SL, Patel UK, Requejo PS, Dobkin BH, Edgerton VR: Human lumbosacral spinal cord interprets loading during stepping. *J Neurophysiol*, 77-2, 797/811 (1997)
- 7) 三好扶, 中澤公孝, 赤居正美: 水中歩行のバイオメカニクス, *リハ医学* 24-2, 138/147 (2005)
- 8) Grasso R, Bianchi L, Lacquaniti F: Motor Patterns for Human Gait: Backward Versus Forward Locomotion. *J Neurophysiol*, 80, 1868/1885 (1998)