

膝関節アシストロボットを用いた膝伸展不全リハビリテーション

Rehabilitation of an Extension Lag using a Knee Joint Motion Assistive Robot

○ 寺田英嗣 牧野浩二 川頭 匠 青木今日子 (山梨大)

Hidetsugu TERADA, Kohji MAKINO, Takumi KAWAGASHIRA, Kyoko AOKI, University of Yamanashi

Abstract: To improve the "extension lag" of a knee flexion after the knee arthroplasty surgery, a control algorithm of the rehabilitation using the wearable knee joint motion assistive robot has been developed. When the knee joint is bended to the angle to generate the extension lag, the knee motion assistive robot is driven by this algorithm. Then, this robot generates the assistive power to the extension direction until the aimed knee motion angle. Also, the posture of knee is maintained during some period of time. After that, the assistive power is reduced and the knee is bent by Gravity to the initial state. Furthermore, the proposed algorithm has been tested by the healthy persons. And it is confirmed that algorithm is useful to improve the "Extension lag".

Key Words: Rehabilitation, Wearable, Knee assist, Extension lag, integrated EMG

1. 緒言

人工膝関節置換術後の患者において、膝伸展不全 (Extension Lag) という症状が見られる場合がある。この膝伸展不全とは、他動的には完全伸展が可能であるものの、自動的には完全進展ができない症状のことであり、眞田ら⁽¹⁾によれば、歩行時に膝折れ感があるなど歩容の悪化や膝前面の疼痛の原因となるとしている。またこのときの他動可動域と自動可動域との差が大きいとその影響は深刻であり、また手術前にこの症状が見られなくても手術後に見られることがある⁽²⁾。この膝伸展不全の原因はいまだ明確には解明されておらず、阪本ら⁽³⁾によれば人工膝関節置換術後の膝伸展不全の原因は単なる手術による筋力低下だけでなく、縫工筋と大腿筋膜張筋の過活動が原因ではないかと推論しているが、推論の域を出ないとも結論付けている。しかしながら、この膝伸展不全の治療には手術による関節再建だけでは術前の異常な筋活動パターンはただちに改善せず、術後早期から理学療法的介入が必要とも述べており、更に前述した眞田らも大腿四頭筋の運動機能の再教育を始めとした膝伸展機構の機能改善を図る必要性があると指摘しており、膝伸展不全に対する有効なリハビリテーションや機器が望まれている。そこで歩行リハビリテーション用装着型膝関節アシストロボットを用いて、人工膝全置換手術後に発生する膝伸展不全を改善するためのリハビリテーション動作の制御アルゴリズムを提案する。

2. 対象装着型アシストロボット

対象とする装着型膝関節アシストロボット (KAI-R7) は、膝関節リハビリテーションを目的にしているため図 1 に示すような、膝関節アシスト駆動機構、股関節サポート部、制御システムおよび充電電池から構成されている。特に人間の膝関節のロールバック運動を考慮した膝駆動機構を用いている。これにより膝の屈曲角度が 90 度を超えても装置の動作は膝の動きに追従できる。更に装着者の状態に合わせてアシストパワーおよびリハビリテーションのための膝・股関節屈曲伸展タイミング角度を任意に設定できるようにしている。なお構造の見直しにより KAI-R6 号機⁽⁴⁾と比較して 1kgf 以上軽量化されており、充電電池を含んだ総重量は 6.0kgf である。また今回の膝伸展不全を改善するためのリハビリテーション動作においては、従来の歩行リハビリテーション時とは異なり、図 2 に示すように股関節角度や足裏接地状態を用いずに、膝関節角度のみを使用して制御

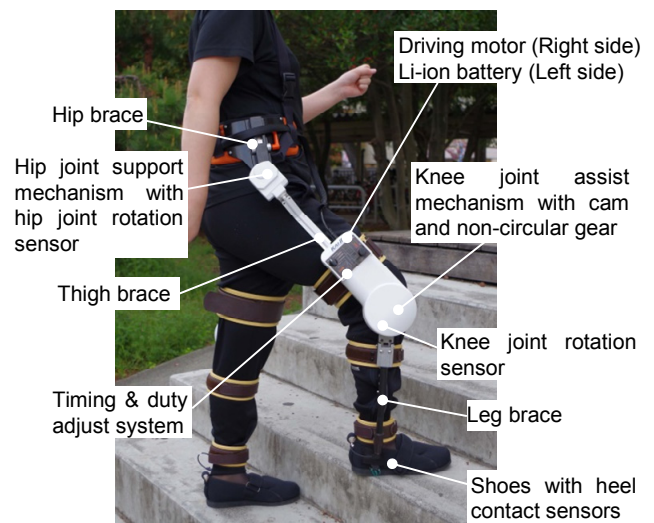


Figure 1 Wearable knee motion assist robot (KAI-R7)

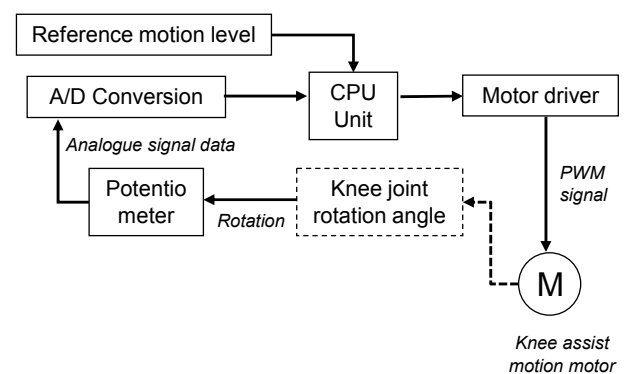


Figure 2 Block diagram of a control system

を行うものとする。

3. 制御アルゴリズムの提案

図 3a)に示すような座位における膝伸展不全を改善するため、まず装着型膝関節アシストロボットを用いた座位膝伸展リハビリテーション動作と動作アシストの状態を図 3b)-f)に示す。なお椅子等に足を垂らして座った状態を初期姿勢とする。まず初期姿勢から膝を一定角度まで自動運動

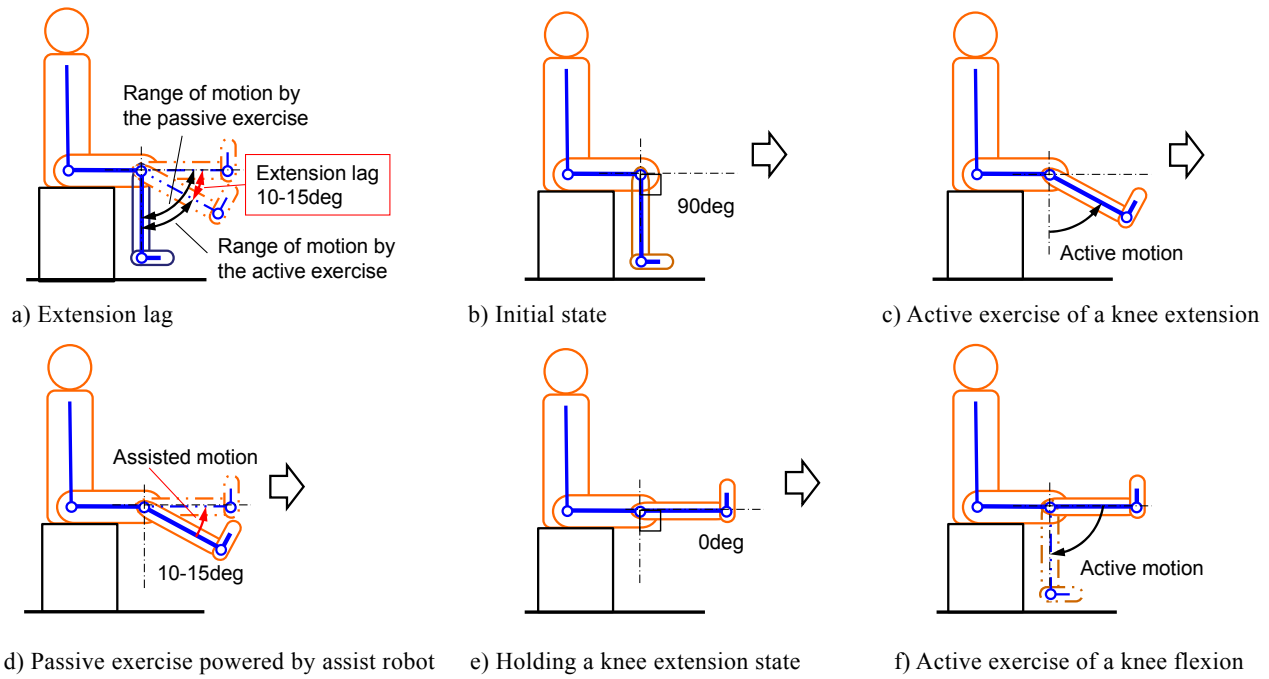


Figure 3 Rehabilitation procedure of an extension lag using an assistive robot

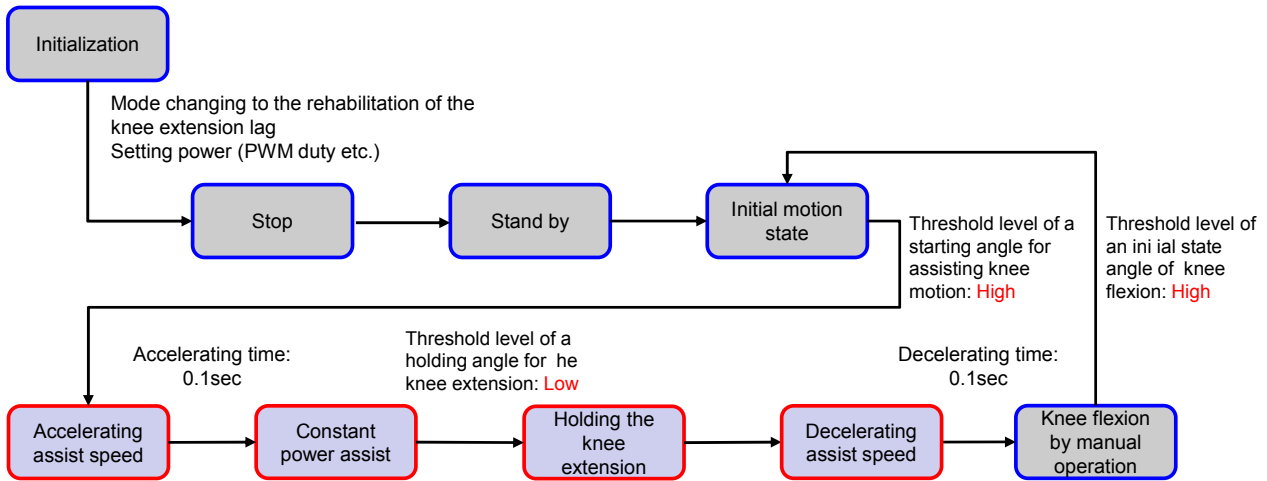


Figure 4 State transition diagram of a rehabilitation algorithm

で伸展する。この際に膝伸展不全の発生する膝関節角度 10～30° 付近に到達したら膝部のアシスト機構を駆動し、伸展方向へとアシスト力を発生させる。次に膝関節角度が伸展目標角度に到達したら、指定秒数姿勢を維持した後にアシスト力を停止する。その後、膝は重力および患者の筋力で屈曲して初期姿勢に戻る。これを繰り返すことで、座位膝伸展動作アシストを行う。これにより、自動運動で動く範囲までは患者自身が膝を伸展し、自動で動かすことのできない膝伸展不全の範囲は他動により動かすことで1回の動作で関節可動域訓練と筋力増加訓練を行うことができるものである。

実際の動作においては患者が自動運動として膝を伸展させ、10～30° に設定された膝伸展開始角に到達した場合に、トリガ信号が High level になるように設定されている。その信号によりアシスト力を発生させている。更に伸展状態になると伸展保持トリガ信号が Low level になるように設定されており、指定した秒数の間姿勢を保持するようにアシスト力を維持した後、アシスト力を減少させ、自動運動

により膝関節を初期状態まで屈曲する。図4に本アルゴリズムの状態遷移図を示す。なおアシスト用モータトルクはPWM制御におけるDuty比を変更することにより調節可能であり、リハビリテーションの進行に応じたアシスト力を発生することができる。なお河内ら⁽⁵⁾の60歳以上高齢者男女各50名、計100名の座位膝関節高と体重の計測結果を用いて座位膝完全伸展時に膝回転中心にかかるトルクを推定すると5.1～11.5Nmとなることから、使用する膝関節アシストロボットの駆動トルク範囲をこれらの値の1/3ないし1/2程度まで発生できるようにPWM制御のDuty比を調整している。

4. 動作検証

座位膝伸展動作アシスト機能が正常に動作しているか確かめるため、膝角度の変化について高速度カメラによる画像解析を行うとともに各部トリガ信号タイミングについて、健常者に装着し動作確認を行った。このときの各トリガ信号閾値、PWM信号および膝屈曲角度の状態変化を図5に

示す。このとき初期姿勢として座位であるため、膝の屈曲角度を90度、完全伸展状態を0度と定義している。また、アシスト開始角度、伸展姿勢保持開始角度、アシスト力、伸展姿勢保持時間については理学療法士により指示できるように設定されている。なお、PWM信号のDuty比の立ち上がり・立ち下がり時間は0.1秒に固定されており、更にモータ系の内部トルクスの影響を考慮して、Duty比は30%以上で設定されている。

これらを踏まえ、健常者に装着して動作確認を行った結果を図6に示す。これにより指示通りの完全伸展が可能になるとともに、積分筋電位計測により大腿直筋、内側広筋の筋活動量が装着型歩行アシストロボットを使用することにより25%~45%軽減されていることが確認された。従って本提案におけるアシストロボットは、膝伸展不全リハビリテーションの際に伸展動作のアシストを実現できていると判断できる。

5. 結論

人工膝全置換手術後に発生する膝伸展不全に着目し、この症状を改善するための一つの手法として、膝関節アシストロボットを用いたリハビリテーション動作の制御アルゴリズムを提案し、健常者により有効に動作していることを確認した。今後は、術後患者による統計的検証を行うことが必要である。

参考文献

- (1) 眞田祐太郎ほか：人工膝関節全置換術施行前の膝伸展制限が術後の膝伸展不全に及ぼす影響，第49回日本理学療法学会，ID:1248，2014.
- (2) 杉田勇ほか：人工膝関節置換術後の膝伸展不全角度について，日本理学療法学会，C0388，2006.
- (3) 阪本良太，武政誠一，中川法一：変形性膝関節症に対する人工膝関節全置換術後の膝伸展について，神戸大学大学院保健学研究科紀要，24: pp29-39，2008.
- (4) 寺田英嗣ほか：膝関節運動補助装置，日本国特許，特許第5713388，2015.
- (5) 河内まき子ほか：AIST人体寸法データベース，産総研H16PRO 287，<https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/>

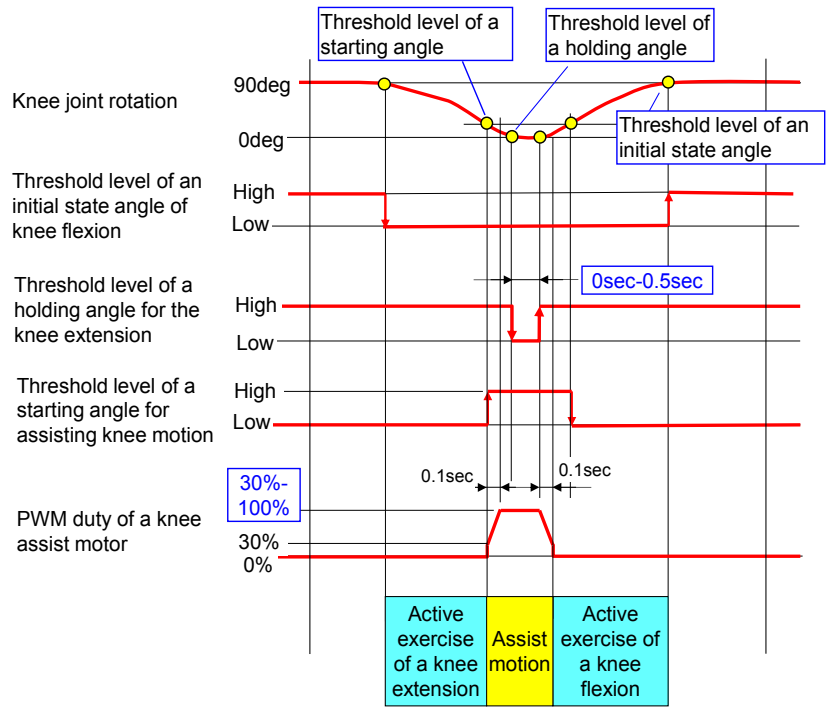


Figure 5 Timing chart of an extension lag using the knee joint motion assistive robot

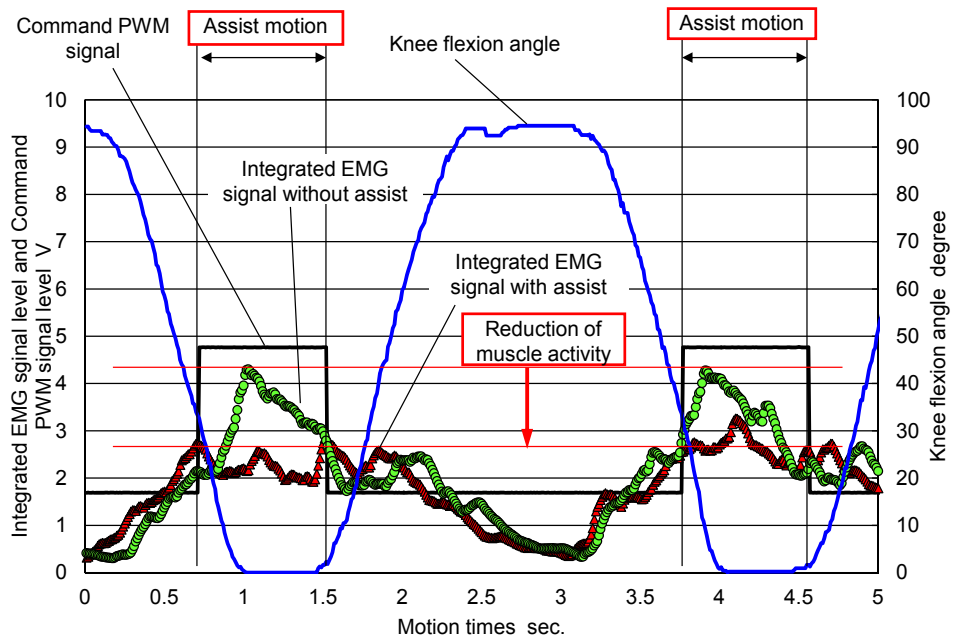


Figure 6 Evaluation using the integrated EMG signal and the knee flexion angle