

義足に活用した，新機構トランスミッション技術

New Transmission Mechanism Technology Utilized in Prosthetic Legs

小野 拓 洋¹
Hiromi ONO
小ノ澤 聖 二¹
Seiji ONOZAWA

島 田 圭¹
Kei SHIMADA
後 藤 文 人²
Fumihito GOTO

日 本 豊¹
Yutaka HIKI

要 旨

両方向の回転が可能なワンウェイクラッチを組み合わせ、そのクラッチの接続状態を切り替えることで変速可能なトランスミッション機構を開発した。

これにより電磁クラッチに対し小型軽量になるとともに、正転・反転両方向回転の駆動力を伝達できるようになった。また回転状態の維持に電力を使わず、切り替えのみに電力を消費し、速比段数の設定に制限がない特徴も備えた。

この技術をモータ駆動式義足に適用した場合、歩行速度がモータ性能に依存しないためモータの小型化が図れ、また省電力でもあることから義足の軽量化が可能となった。また歩行遊脚を省音化することもでき、義足装着者の生活の可能性を広げることができた。

ABSTRACT

The researchers developed a transmission mechanism that combines one-way clutches capable of rotating in both directions and can change speeds by switching the connection state of the clutch.

This makes the clutch smaller and lighter than an electromagnetic clutch and makes it possible to transmit driving force for both forward and reverse rotation. Other features of the mechanism are that it consumes power only for switching, not for maintaining the rotational state, and there is no limit to the number of speed ratio levels that can be set.

When this technology is applied to motor-driven prosthetic legs, the walking speed is independent of motor performance, which means that the motor can be made smaller and the prosthetic leg can be made lighter due to the power savings. In addition, the swinging of the leg while walking can be made quieter, which expands the life possibilities for users of prosthetic legs.

1. 開発の背景と狙い

1.1. 膝継手の種類と機能

Fig. 1 に示す通り、義足には身体の欠損箇所によって様々な種類がある⁽¹⁾。その中で、膝関節を欠損した方が使う義足の膝関節用部品として膝継手がある。

膝継手には、人の膝同様の機能が求められる。体重を支えること、膝を曲げ伸ばしできることなどである。中でも欠損した筋肉の役割に関しては現在も発展を続け、様々な手段で代替させるものがある。

本稿で紹介する機能は、主にダンパを用いた膝継手のイールディング機能である⁽²⁾。イールディング機能とは、適度な屈曲抵抗を与えながら膝を曲げることでできる機能である。義足に体重をかけた際に、意図しない急な膝折れを防止したり、自然な階段の交互下りが可能となったり、膝継

手の機能の中でも近年主要な機能となっている (Fig. 2)。また最近では筋肉の役割をモータで代替し、膝の曲げ伸ばしをおこなう膝継手も出てきている。どちらの膝継手も、近年では膝角度センサや荷重センサ、ジャイロセンサ等を活用し膝の状態を検知してダンパやモータなどを動作させている。

その中でもイールディング機能のあるダンパ式膝継手が近年主流となっているが、モータ駆動式膝継手も今後の拡大が期待されている。

1.2. 開発の背景

ダンパ式膝継手とモータ駆動式膝継手は、それぞれ長所と課題がある。

ダンパ式膝継手では、体重がかかっている間 (以降、立脚期) はダンパにより適切なイールディング機能を発揮して急な膝折れを回避できる。体重がかかっていない間 (以

¹ ソリューションシステム開発センター

E-mail: hiromi_ono@jp.honda

² 株式会社ラピッドエンジニアリング

降、遊脚期)には大腿の振り出しに合わせて受動的に膝の曲げ伸ばしがおこなわれるため、ユーザーが自在に操り歩行することができ、扱いやすい。しかし階段の昇りでは膝の伸ばす力を発揮しないので、両足で交互に昇ることは容易ではない。

モータ駆動式膝継手は、立脚期、遊脚期共にモータにより駆動される。遊脚期には膝の曲げ伸ばしをおこなってくれるため歩行が楽になる。立脚期では、階段の昇りや立ち上がりなどのパワーが必要な動作でダンパ式膝継手では難しかった場面も、モータのパワーにより可能になる。そのため、モータ駆動式膝継手の以下の3点の課題を解決することでより扱いやすくなると考えた。

まず1点目に、使用頻度が最も高い歩行中も常に膝関節を駆動するために、電力消費が大きい。そのためモータ駆動用のバッテリーは、日常で使用する頻度を配慮した容量が必要となり、大きさと質量が増すことが懸念される。

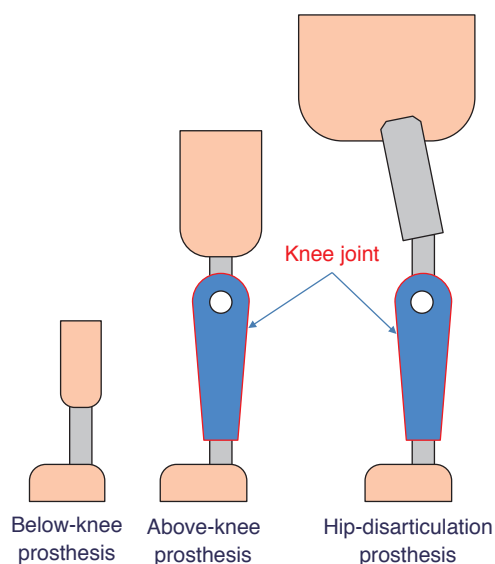


Fig. 1 Types of prosthetic leg

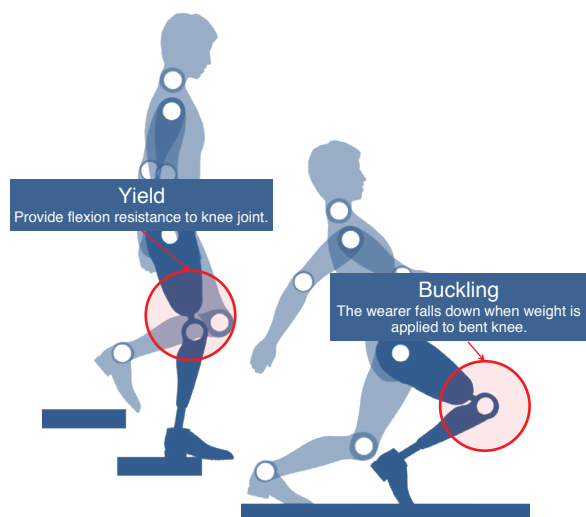


Fig. 2 Yielding and buckling

Table 1 Issues addressed by this research

No.	Issue
1	Power saving while walking on level ground (battery downsizing)
2	Reduction of motor drive noise while walking on level ground
3	Walking cadence independent of motor performance (motor downsizing)

2点目に、歩行中は常にモータ駆動であり、常にモータ駆動音が発生する。3点目に、歩行中の速度はモータの性能に依存する。これは、歩行速度が上がると遊脚の屈曲と伸展の速度が増すためである。歩行ケイデンス(歩数/分)に縛りなく動作させるためには、モータが大型化することも懸念の一つである。

そこで本稿では、モータ駆動式膝継手をベースに、Table 1と下記に挙げた三つの課題を解決するために、義足システム全体ではなく、技術要素となるトランスミッションを開発した。

- ・平地歩行時の電力消費を減らすこと。(バッテリー小型化)
- ・平地歩行時のモータ音を減らすこと。
- ・平地歩行時の歩行ケイデンスが、モータ性能に依存しないこと(モータ小型化)。

2. 狙い

2.1. 膝継手の理想的な挙動

モータ駆動式膝継手は、階段の昇りが可能になるといった、ユーザーの移動、活動の幅を広げる可能性があることが最大のメリットである。このメリットを活かすことは、「すべての人に、『生活の可能性が広がる喜び』を提供する」という、Hondaの掲げる2030年 visionに繋がると考えた⁽³⁾。

階段の昇りにおいては、膝関節に伸展する力を与える必要がある。一方で平地歩行などの動作については、パワー付与されなくても可能であり、パワー付与せずにダンパ式膝継手同様の挙動を狙うことがTable 1の課題1から3を解決することに繋がると考えた。

そこでまず、伸展する力を膝関節に与える必要性があるかないかの差により、平地歩行と階段の昇りで分けて考えた。

平地歩行においては、前述のとおりダンパ式膝継手の扱いやすさとイールディングの安心感を参考に、Fig. 3のような動作を目標とした。具体的には、遊脚期は、装着者が義足を自在に扱える状態にするため、膝軸を自由回転できるように、モータと膝軸の接続を切断する。また、立脚期にはイールディングによる屈曲抵抗を与えられるよう、モータと接続する。この際の屈曲抵抗として、モータのバックドライブトルクを使用する。これにより平地歩行での必要な電力は切替の動作のみとなり、電力消費を少なくすることができる。また、遊脚期はモータと接続しないため、

モータ音の発生を防ぐことができる。また、遊脚期の屈曲と伸展の動作はモータ駆動によるものではないため、歩行速度も制限されず、Table 1 の 1 から 3 全てを達成可能なコンセプトになる。なお、イールディングの機能はモータが担い、ダンパ式膝継手同等の安心感と扱いやすさを狙うことができる。

次に、階段の昇りにおいては、膝軸の伸展と屈曲にモータの駆動力を使い、Fig. 4 のような動作を狙う。

具体的には、立脚期には体重を支えるために、モータにより膝を力強く伸展させる。遊脚期には、段差を避けるために、モータにより膝を素早く屈曲させる。

この時の立脚と遊脚の速比は約 1:2 に設定した。この理由としては、Fig. 5 に示す通り、人の歩行は遊脚の屈曲動作が約 2 倍速いことに基づいている⁽⁴⁾。

また、立脚期、遊脚期ともに膝関節の動きとして伸展、屈曲どちらの動きも可能であることが求められる。

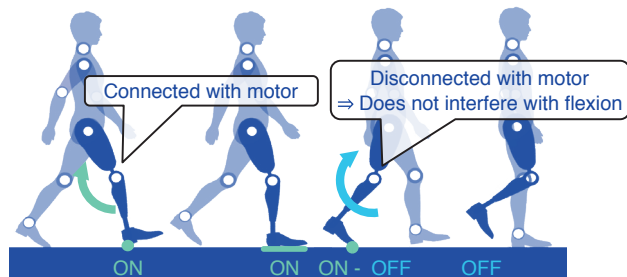


Fig. 3 Aim of walking on level ground and going downstairs

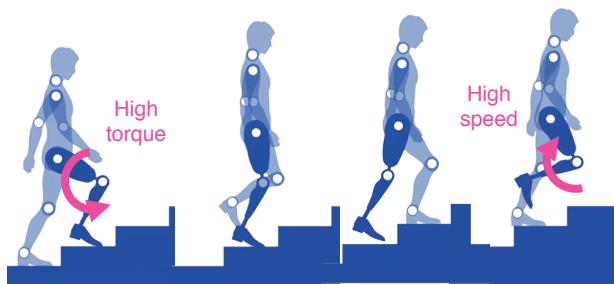


Fig. 4 Aim of going upstairs

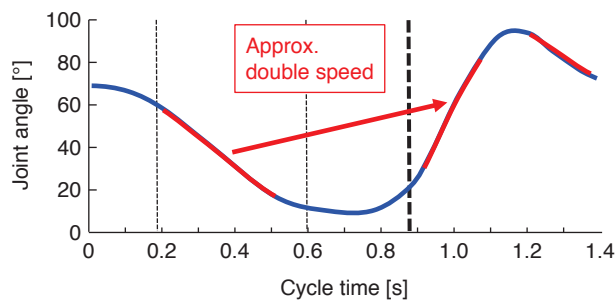


Fig. 5 Speed difference between stance phase and swing phase when going upstairs

2.2. 機能要件と制約条件

2.1. 節で定めた狙いを実現させるため、膝継手には下記の機能要件と制約条件を設けた。

(1) 機能要件

平地歩行において、

遊脚期は、ニュートラル状態であり、装着者は膝軸を自在回転できること。

立脚期には、モータとの接続ができ、装着者は膝軸に抵抗を与えられること。さらに

自在回転からイールディングへの切替えが瞬時に行われること。

電力消費が切り替え動作のみであること、とした。

階段昇りにおいて、

モータと 2 速比で接続ができ、立脚期は高トルク、遊脚期は高回転の特性を出しながらアシストパワーを装着者が享受できること。

膝軸の伸展と屈曲の両方向に駆動力を与えることができること、とした。

(2) 制約条件

膝シルエットに収まる小型サイズであることとした。

上記機能要件と制約条件を達成するためには、立脚期と遊脚期の状態遷移に合わせモータとの接続状態をニュートラル、速比 2 段階で瞬時に切り替えができる、小型なトランスミッション技術が必要であると考え、開発をおこなった。

3. トランスミッションの基本構造

3.1. トランスミッションの全体構成

トランスミッションの全体構成及び主な機能部品名称を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

動力の伝達は、ギア、シャフト、ローラーの 3 部品が担う。ローラーがシャフトとギアの間で噛みあうかどうかでギアとシャフト間の動力を伝えるかどうかを変化させた。リテーナーは、ローラーの位置を保持させた。ギア A とギア B は、速比により歯数等が異なるものであり、内側の構成は同じである。

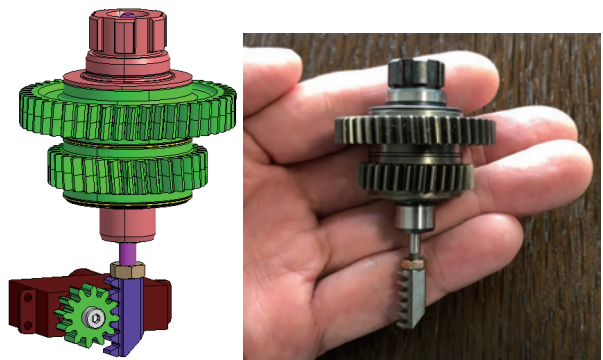


Fig. 6 Overall structure of transmission

動力伝達状態の切り替えは、ロッドアクチュエータが動作し、ラックアンドピニオン機構を介してロッドを上下に動かすことによりおこなった。ロッドはカム形状になっており、カムによりピンが動作する。ピンがピンガイドを押すことによりリテーナーを動かし、ローラーの状態を変えた。

シャフト内及びクラッチのしゅう動部にはグリスを塗布した。

ロッドの軸方向の断面を Fig. 7(a) に示す。シャフト内のロッドがシャフト軸方向にスライドすることにより、ギア A, B の接続状態が変わる。ロッドは、大径と小径 2 種類のカム形状を成しており、ギア A, B の中央に大径部が位置するとクラッチ OFF となり、小径部が位置するとクラッチ ON となる。詳細は 3.2. 節と 3.3. 節にて説明する。ロッドは Fig. 7(a) の下部にあるモータとラックピニオン機構によりスライドさせた。またロッド位置はモータのバックドライブトルクにより保持させた。

3.2. クラッチ OFF から ON への切り替え

切り替えの状態遷移について Fig. 8 に示す。ギア B の変化についてフォーカスして見る。Fig. 8 にて、Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 の拡大、断面の個所について示す。

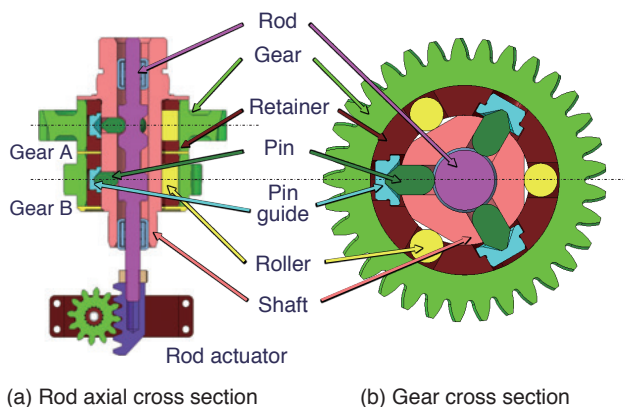


Fig. 7 Structure of transmission

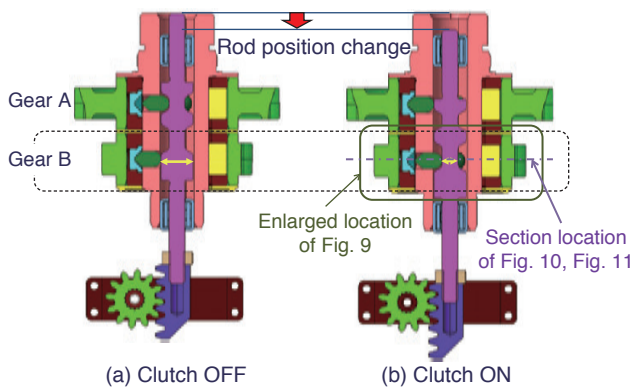


Fig. 8 Switching clutch from OFF to ON

クラッチ OFF の状態からロッドを下にスライドさせると、ピンとロッドの接触状態が変わり、隙間が生じる (Fig. 9)。Fig. 10 に示すように、この時、ギアに回転力を与えるとリテーナーはピンガイドのカムを介してピンを押し戻しながら回転する。その際、ギアとリテーナー間に塗布されたグリスの摩擦により、ギアとリテーナーは共回りする。ローラーはギアとシャフトの間に挟み込まれ、回転力をシャフトに伝達する (Fig. 11)。このような機構により、トルクを伝達した。また、ギアが反転してもギアとリテー

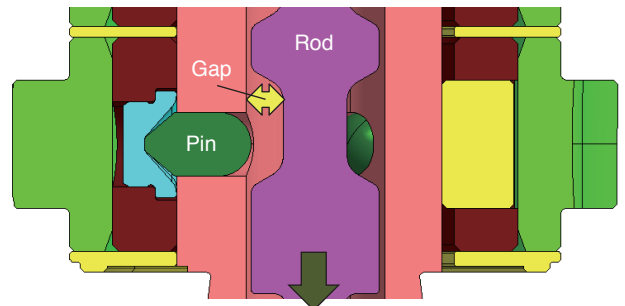


Fig. 9 Rod state when switching clutch from OFF to ON

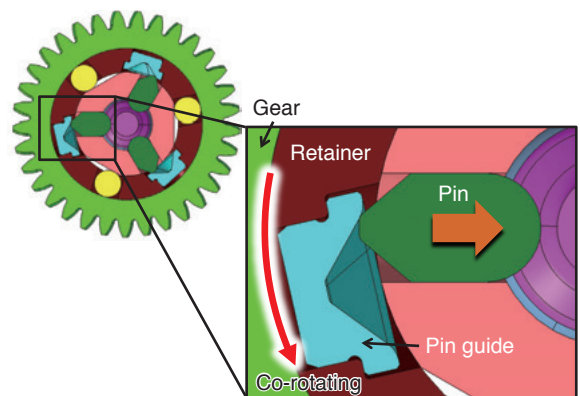


Fig. 10 Pin state when switching clutch from OFF to ON

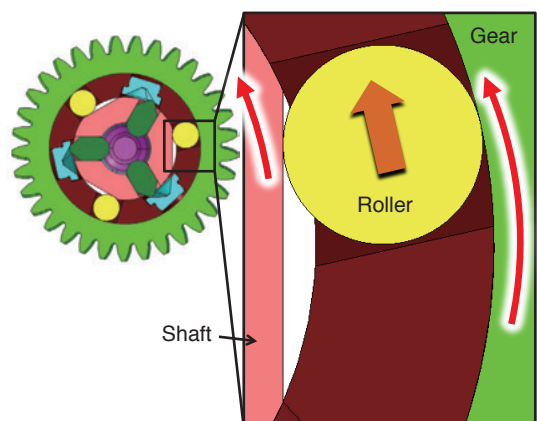


Fig. 11 Roller state when switching clutch from OFF to ON

ナーが共回りするため、再びローラーがシャフトの反対側に挟み込まれ回転力をシャフトに伝達する。

3.3. クラッチ ON から OFF への切り替え

クラッチ ON の状態から再びロッドを上スライドさせると、ロッドのカムを介してピンが外側に押し出される (Fig. 12)。その際ピンがピンガイドを押し上げ、リテーナーとローラーが固定される (Fig. 13)。その位置ではギアとシャフトがローラーと同時に接触することがないため空転する (Fig. 14)。

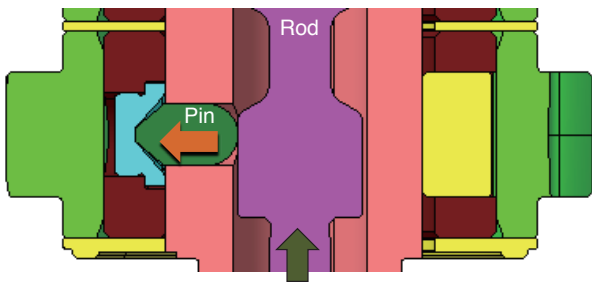


Fig. 12 Rod and pin state when switching clutch from ON to OFF

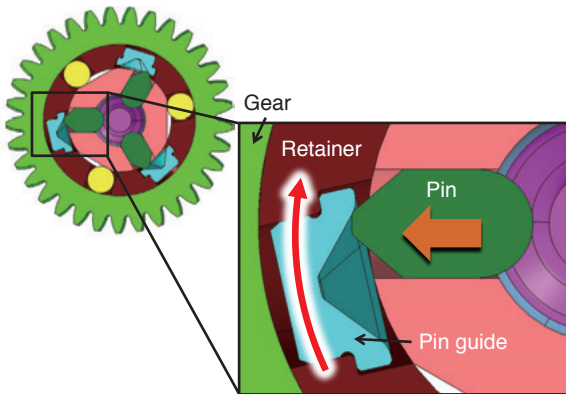


Fig. 13 Pin and retainer state when switching clutch from ON to OFF

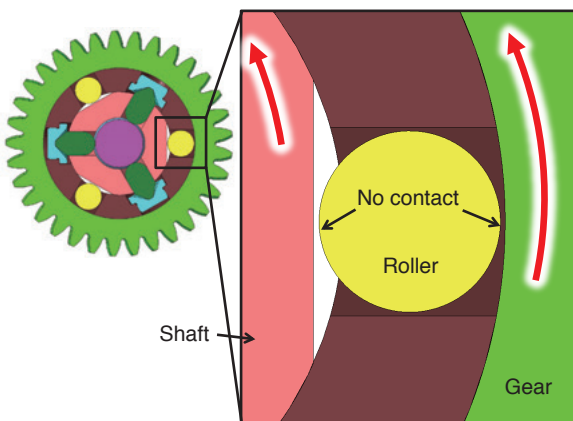


Fig. 14 Roller state when switching clutch from ON to OFF

4. 義足での動作

4.1. 義足への組み込み

本トランスミッションを、義足へ組み込んだ際のシステム構成の1例を Fig. 15 に、メカニカル部品構成図の1例を Fig. 16 に示す。モータのトルクは、トランスミッションを介して膝関節に入る。また、膝関節側から人が発揮するトルクも同様にトランスミッションを介し、モータに入る。膝の状態は、この構成では三つのセンサにより計測した。荷重センサは体重の荷重と抜重を、IMU センサは膝継手の姿勢を、膝角度センサは大腿側部品と下腿側部品のなす角を計測した。

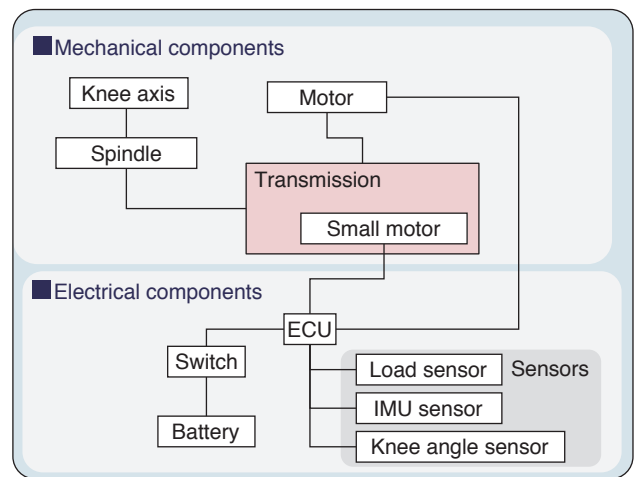


Fig. 15 System structure of knee joint

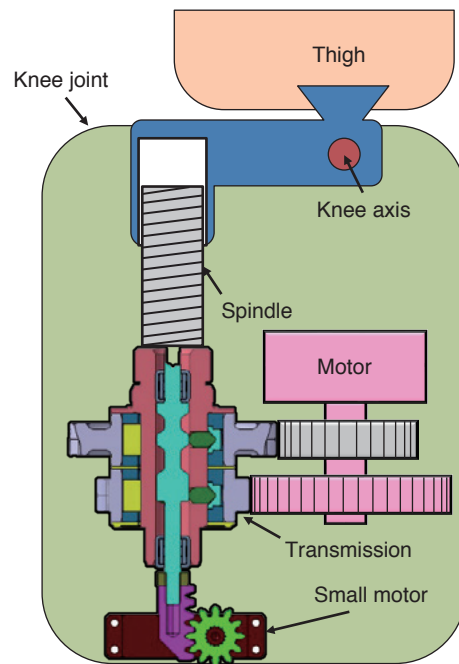


Fig. 16 Mechanical system structure of knee joint without electrical parts

4.2. 義足での動作

義足での動作は、Fig. 17, Fig. 18 のように機能させた。

平地歩行の遊脚期については、Fig. 17(a) に示すように両方のギアをニュートラルとした。これは、ギア A、ギア B ともにクラッチ OFF の状態であり、装着者の大腿の振り出しにより自由な屈曲、伸展動作が可能である。

立脚期については、Fig. 17(b) に示すようにギア A をクラッチ OFF に、ギア B (高回転ギア) をクラッチ ON とした。膝関節の回転をモータに伝え、モータのバックドライブトルクを利用することで適切なイールディングを機能させた。それにより立脚期の意図しない急な膝折れを防止し、装着者に安心感を与えることが可能となった。

次に、階段の昇りについて説明する。立脚期では、装着者の体重を支えるため高いトルクを必要とするが、回転速度は遅い。しかし遊脚期の屈曲と伸展は膝下の慣性力のため、トルクは必要ないが速い回転速度が要求される。この相反する要求に対して 2 段のギア比を持つ Transmission 機構で有効に作用させた。

遊脚期については、Fig. 18(a) に示すようにギア B (高回転ギア) のクラッチを ON にし、ギア A のクラッチを OFF とした。モータによる膝関節の屈曲と伸展を速い速度でおこなうことで、階段に接触することなく次の段に踏み込め

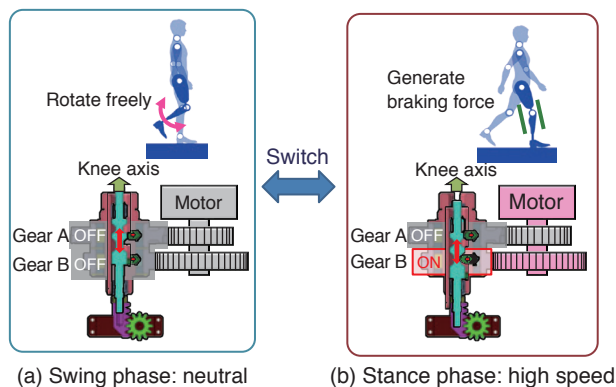


Fig.17 Transmission switching when walking on level ground or going downstairs

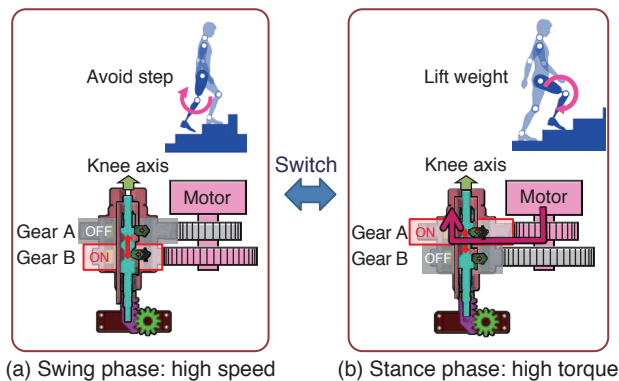


Fig. 18 Transmission switching when going upstairs

Table 2 Phases, modes, and their goals

Situation	Phase	Transmission mode	Aim
Walking on level ground/going downstairs	Swing	Neutral	Easy to handle
	Stance	High speed	Yielding
Going upstairs	Swing	High speed	Avoid steps
	Stance	High torque	Lift weight

ることが可能となった。

立脚期については、Fig. 18(b) に示すようにギア A (高トルクギア) のクラッチを ON にし、ギア B のクラッチを OFF とした。モータの出力を高いトルクで膝関節に伝達し、膝の伸展をアシストすることで階段の昇りが可能となった。

以上の、歩行周期における Transmission のモードと狙いを、Table 2 にまとめる。

4.3. 義足適用時の動作確認

平地歩行におけるログデータを Fig. 19 に示す。立脚 / 遊脚の判定は義足に搭載された力覚センサや IMU センサを使っておこなった。立脚期においては、荷重が掛かる前にロッドの位置が切り替わりモータの抵抗により、膝折れ防止を可能とした。また遊脚期においては、膝角度が増える前にニュートラルに切り替わることで、モータの抵抗が邪魔をせず、膝角度が素早く屈曲できていることが認識できた。

階段の昇りにおけるログデータを Fig. 20 に示す。階段の昇りでは、体重が義足にかかるかどうかを力覚センサで

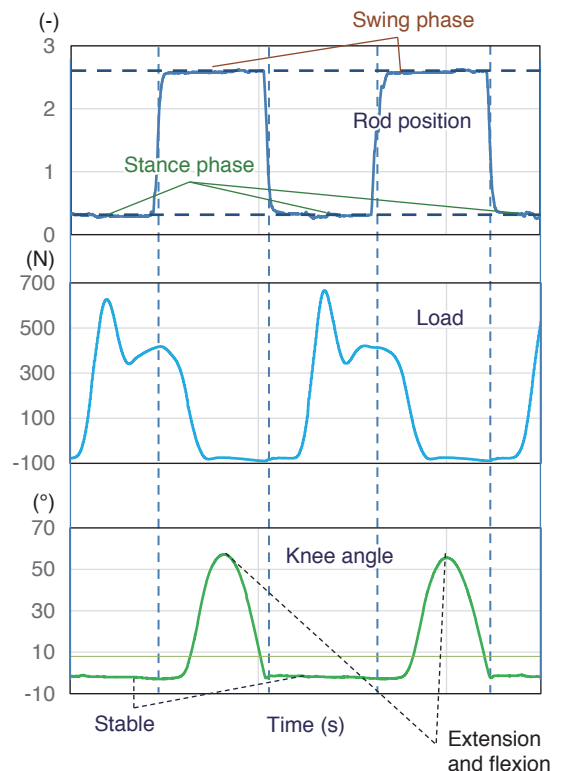


Fig. 19 Log data of walking on level ground

捉えることによって立脚期と遊脚期を切り替えた。水色のロッドの数値は、体重による荷重の推移である。体重がかからないとロッドの位置が立脚から遊脚へ切り替わり、体重がかかると遊脚から立脚に切り替わっていることを示している。

4.4. モータ駆動式膝継手に対する課題と対応手段、結果のまとめ

Table 1 に示した三つの課題に対して、Table 3 にまとめた。

まず1点目の、義足の使用時間の多くを占める平地歩行での電力消費を抑え、バッテリーを小型化することについて、本トランスミッションは遊脚期のニュートラル状態にすることで消費電力を抑えた。立脚期のモータのバックドライブトルクを利用したイーリングでも電力を消費しない。電力を消費するのは切替え時のみで、その消費電力もロッドの上下動のみの電力で済むため、搭載するバッテリーの容量を少なくすることができる。また、摩擦式のクラッチのように、どちらかの状態における状態維持のための電力を消費することもないというメリットがある。

2点目に、平地歩行でのモータにより発生する音を小さくすることについて、本トランスミッションを活用した際は遊脚期、モータとの接続がないため、音が生じない。立脚期では、イーリングを活用するシーンではモータと接続されるため音が生じる。ただし、平地歩行中でイーリングを使用するのは、転倒しかけて膝折れが起きるときのみであり、基本的には立脚期も無音である。切り替え

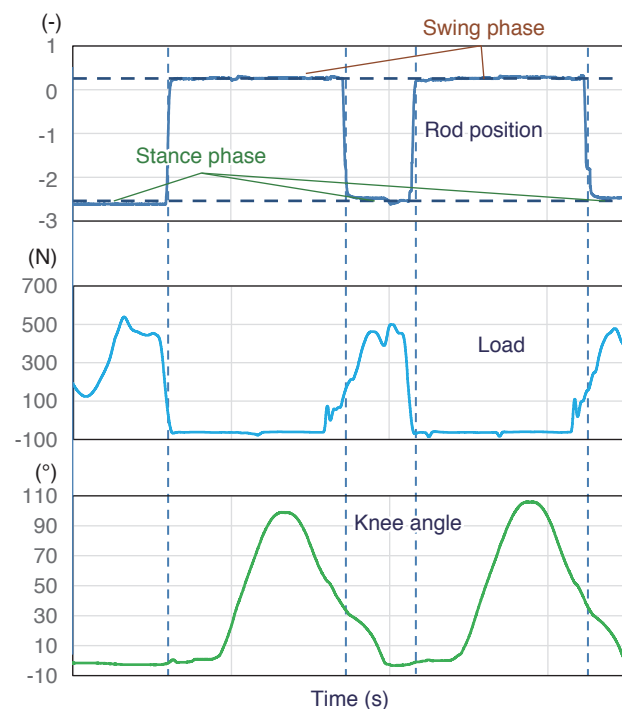


Fig. 20 Log data of going upstairs

Table 3 Issues addressed, countermeasures, and results of this research

No.	Issue	Countermeasure	Result
1	Power saving while walking on level ground (battery downsizing)	During the swing phase while walking on level ground, do not perform extension and flexion by the motor, only switch the state of the knee joint.	Power consumption only for switching, except for activities that require power (e.g. going upstairs)
2	Reduction of motor drive noise while walking on level ground		No motor noise except for activities that require power (e.g. going upstairs)
3	Walking speed independent of motor performance (motor downsizing)		Walking speed independent of motor performance because knees are not moved by motors during walking

Table 4 Performance comparison of roller friction and electromagnetic clutch

Features	Roller friction type	Electromagnetic clutch type		
		Company A	Company B	Company C
Outside shape (mm)	$\phi 25$	$\phi 106$	$\phi 75$	$\phi 90$
Mass (kg)	0.2	1.5	1	1
Static friction torque (N·m)	15-20			

時には切り替えのための小型モータの音が微小であり、これは他の電子制御式膝継手と同程度である。以上より、平地歩行では作動音の出ない構造と制御を実現させた。

3点目に、歩行速度がモータ性能に依存しない。これは、本トランスミッションではニュートラル機能によって、ダンパ式膝継手のように自身の断端（切断され残った大腿）により動かすことができるためである。

上記3点の課題解決に加えてさらに、本技術を義足に適用した場合、下記の機能を追加することができる。

- ・扱いやすく、自由な平地歩行である。

両方のギアのローラークラッチ接続状態をニュートラルとすることで、装着者の大腿により下腿を振り出すことができる。歩行速度や歩行ケイデンスに対し制約を受けることなく、自由な歩行が可能となる。

- ・両方向回転駆動できることで安心感に繋がる。

両方向に回転駆動力を伝えることができるため、切替えを行わなくても屈曲と伸展といった反対方向への駆動が可能である。これは装着者にとっては安心感にも繋がる。理由としては不意に逆方向に回転が入った時にもクラッチが抜ける心配がなく、体重を支え続けることができるためである。

- ・複数の減速比を切替え可能

複数の減速比を持つことが可能で、一つのモータで異なる出力特性を実現できるため、立脚期や遊脚期に最適な特性を出せる。効率のいいポイントや電流量を調整することにより、モータの小型化やバッテリーの小型化に寄与することが見込まれる。

4.5. 電磁クラッチに対する優位性

本技術は、Table 4 に示す通り電磁クラッチに対して小型且つ軽量な特徴を持つことを達成した。このことは、義

足のみならず他の製品に対しても有効に活用可能であると考える。

5. まとめ

本開発は、モータ式膝継手のメリットを活かす要素技術を開発することを狙いスタートし、新機構のトランスミッションを組み込んだ膝継手を試作確認した。

平地歩行では、遊脚期はモータと接続をせず、立脚期はモータと接続する。切り替えのみに電力を消費するため、省電力化が達成できた。また、遊脚期にはモータとの接続がないため省音での歩行が可能となるとともに、モータと切り離し大腿で動かすことができるため、モータの性能に依存しない歩行が可能となった。

立脚期はダンパ式膝継手のようにイールディングが機能するため、安心感のある歩行が可能である。

また、階段昇りでは立脚と遊脚の求められる特性に応じて速比を切り替えることができ、モータの小型化に繋がる。

本トランスミッションは電磁クラッチに対して小型且つ軽量にトルク伝達可能な機構であり、両方向回転駆動が可能、速比数に制限がない、トルク伝達中に状態維持の電力消費がない、といった多くのメリットを持ち、膝継手搭載の目標達成のための有効な手段となった。

この技術の特徴は他の機器でも有効に機能すると考えられるため、独自のメリットを生かすことができる機器に活かしていきたい。

参考文献

- (1) https://www.ottobock.com/ja-jp/prosthetic_le/info/structure/, (参照 2024/7/10)
- (2) https://www.ottobock.com/ja-jp/prosthetic_le/joint/knee/3r80/, (参照 2024/7/10)
- (3) <https://www.honda.co.jp/guide/vision/>, (参照 2024/7/10)
- (4) Riener, R., Rabuffetti, M., Frigo, C.: Stair ascent and descent at different inclinations, Gait & Posture, Vol. 15, Issue 1, p. 32-44, (2002), doi: 10.1016/S0966-6362(01)00162-X

■ 著 者 ■



小野 拓 洋



島 田 圭



日 本 豊



小ノ澤聖二



後 藤 文 人