

---

# 下肢切断者等の歩行訓練支援システムに関する研究

## An Analysis of Gait with Lower Limb Prosthesis

原 良昭 赤澤康史 中村俊哉 松原裕幸

HARA Yoshiaki, AKAZAWA Yasushi, NAKAMURA Toshiya, MATSUBARA Yukihiro

陳 隆明 高瀬 泉 町田勝弘 東 祐二 加藤真澄 手塚勇輔

(兵庫県立総合リハビリテーションセンター)

CHIN Takaaki, TAKASE Izumi, MACHIDA Katsushi, AZUMA yuji, KATO Masumi, TEZUKA Yusuke  
(Hyogo Rehabilitation Center)

前田慶明 (兵庫県立西播磨総合リハビリテーションセンター)

MAEDA Noriaki (Hyogo Prefectural Rehabilitation Center at Nishi-harima)

---

### キーワード：

大腿義足、歩行分析、時間因子、習熟度、根拠に基づく医療

### Keyword:

Trans-femoral prosthesis, Gait analysis, Time factor, Proficiency, Evidence based medicine

### Abstract:

The purpose of this paper was to reveal characteristic of time factor on gait with trans-femoral prosthesis to evaluate an ability of the gait.

Last year, we established technique to estimate a period from full extension of knee joint of trans-femoral prosthesis at the end of the swing phase to the initial contact using acceleration on prosthesis. Then, two amputees participated in experiments. Level gait with trans-femoral prosthesis on treadmill were subjectively evaluated by some physical therapists, and the period measured at the same time. Better subjective assessments of the gait by physical therapist were inversely proportional to the period.

Current year, we conducted two experiments. In one of experiments, an amputee, who was admitted in hospital to improve gait with trans-femoral prosthesis, was participated in this study. During the hospital stay, average of the period decreased gradually with physical therapy. In another experiment, we measured the period about amputee who has been done gait

training by physical therapist. Four amputees who had been done gait training by physical therapist were participated in. Median of the period is 88.5 [ms]. Median ratio of the period to gait cycle is 8%.

These results raise the possibility that the period will be one of index to evaluate an ability of gait with trans-femoral prosthesis.

## 1 はじめに

大腿切断によって生じた移動能力の低下を補う道具の1つに大腿義足(以下、義足)がある。義足を処方された切断者は義足を用いた歩行(以下、義足歩行)の仕方を歩行練習によって学習する必要があり、理学療法士は、義足歩行の学習が効率よく行われるために、義足歩行を評価し、その評価に基づいた指導を義足歩行者に対して行う。

理学療法士による義足歩行の評価は、歩行周期や歩行速度といった客観的な指標に加え、理学療法士の臨床経験に基づく経験知といった主観的な指標によっても行われている。臨床経験に基づく経験知といった主観的な指標によって義足歩行を適切に評価するには、通常、ある程度の臨床経験が必要となる。しかし、近年における理学療法士の養成校の急増により、平成20年5月における理学療法士の約20%が免許取得2年未満と、臨床経験が浅く経験知による評価が困難な理学療法士の割合が増加していることや<sup>1)2)</sup>、臨床経験に基づく経験知を指標とした評価は評価者間で結果が異なることがある主観的なものであり、その評価内容が結果として妥当であったと

しても、評価内容の科学的根拠を示すには十分とはいえないことなどから、臨床経験に基づく経験知によって評価している内容を定量的・客観的に評価する指標の確立が求められている。

大腿義足において膝関節の屈曲・伸展機能を代償する部位を膝継手という。不随意的な膝継手の屈曲を膝折れと呼び、義足歩行者が転倒する原因の1つである。

義足歩行者は、義足歩行の練習初期に着床時の膝折れを避けるために膝継手を完全に伸展させた状態で着床するように指導される<sup>3)</sup>。そのため、通常、義足歩行者は膝継手の完全伸展後に着床している。この遊脚相終期に生じる膝継手の完全伸展では、膝継手の過伸展防止装置に義足下腿部が衝突し、衝突音や衝撃が義足に生じる。この衝突音や衝撃が大きい歩行はターミナルインパクトと呼ばれる異常歩行と見なされているが、膝継手の完全伸展を確認するために大きな衝突音や衝撃を故意に発生させながら歩く義足歩行者もいる<sup>4)</sup>。

長倉は義足歩行者への指導に関して「義足歩行の練習者に対して膝継手が伸展したらすぐに着床するように指導するが、膝継手が伸展してからすぐに着床できるようになるにはかなりの熟練を要する」という主旨の内容を述べており<sup>5)</sup>、このことは、理学療法士が膝継手の完全伸展から着床までの時間を義足歩行の評価指標の1つとして用いていることを示している。しかし、膝継手の完全伸展から着床までの時間の目標値は定量的には示されておらず、理学療法士の臨床経験によって評価が異なることが示唆される。

本研究では、大腿義足歩行練習に携わる医療従事者の支援を目的として、大腿義足歩行者における遊脚期終期の膝継手完全伸展から着床までの時間と理学療法士の評価との関係を明らかにすることを試みた。

本研究は平成19年度から平成20年度にかけて行われており、平成20年度の成果は平成19年度の成果をふまえたものである。そのため、第2章は平成19年度の実施内容の概要説明にあて、第3章で平成20年度の実施内容について説明する。

また、本報告書では4つの検定を行っているが、本報告書全体の有意水準が1%となるように各検定の有意水準は0.25%とした<sup>6)</sup>。

## 2 平成19年度の成果

### 2.1 実施内容

膝継手が完全伸展した時刻や着床の時刻を測定するには様々な方法があるが、安価で測定への準備が簡単で、膝継手の伸展と着床の時刻が1つのセンサで測定できるものとして加速度信号が考えられる<sup>7)</sup>。加速度センサを義足下腿部に取り付けることで、膝継手の完全伸展時の衝撃加速度や着床時に生じる衝撃加速度から膝継手の完全伸展や着床の時刻を推定できると考えられる。

平成19年度では、膝継手の完全伸展と着床の時刻を義足下腿部の加速度から推定できるかどうかを確認し、2名の大腿義足歩行者の加速度から求めた膝継手の完全伸展から着床までの時間と理学療法士の義足歩行評価との比較を行った。

### 2.2 加速度と接触スイッチの同時計測

#### 測定内容

義足下腿部の加速度から膝継手の完全伸展および着床の時刻が推定可能かどうかを確認するために、膝継手と義足足部の踵部に設置した接触スイッチと義足下腿部に添付した加速度センサの同時計測を行った。

被験者は膝継手の伸展時に衝突し合う箇所が露出している膝継手Total Knee 2000 (Össur社)を使用している片側大腿切断者1名である。なお、インフォームド・コンセントを行い被験者の同意を得てから実験を行った。

3軸圧電容量型加速度センサ (S&ME社製、計測可能範囲 $\pm 98[m/s^2]$ ) は、センサの各感度方向が静止立位時の上下方向、前後方向、側方方向と一致するように義足下腿部に取り付けた。なお、上方向と前方向および左方向への加速度が正值を、逆方向への加速度が負値となるようにした。膝継手の伸展時に衝突しあう部位に厚さ1[mm]の導電性ゴム製スイッチを取り付け、膝継手の完全伸展でスイッチがOnになることを確認した (図1)。同様のスイッチを義足足部の踵部に取り付け、踵部が着床するとスイッチがOnになることも確認した。膝継手に取り付けしたスイッチをSwA、踵部に取り付けたスイッチをSwBとする。

トレッドミル歩行 (3.5[km/h]) 時の義足下腿部の加速度および各スイッチの信号をサンプリング周波数1[kHz]で携帯型データロガーBioLog2000 (S&ME社)に取り込んだ。なお、歩行時に転倒す

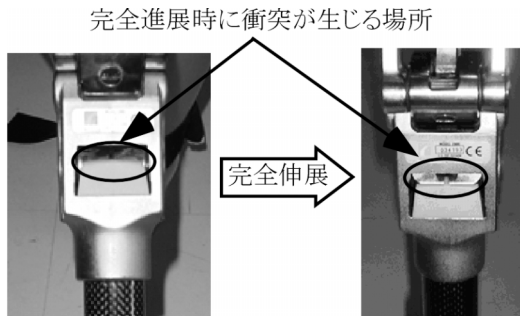


図1 膝継手 (Total Knee2000) に設置したスイッチの設置部の拡大図  
Fig.1 knee joint

る危険性を避けるため、被験者にはトレッドミルの両側にある支持バーを把持しながら歩行するように指示し、1名以上の理学療法士の立ち会いの下に測定を行った。

### 結果

図2に定常状態に達した義足歩行時の加速度と各スイッチの信号を示す。図2より加速度3軸全てで、スイッチから判別できる膝継手完全伸展と着床時刻に特徴的なピークが確認できる。このピークは、それぞれ、膝継手の完全伸展と着床によって生じたと考えられる。加速度のピークであるため、このピークの時刻がそれぞれの事象が生じた時刻ではないことは明らかであるが、本研究では信号処理の簡便性

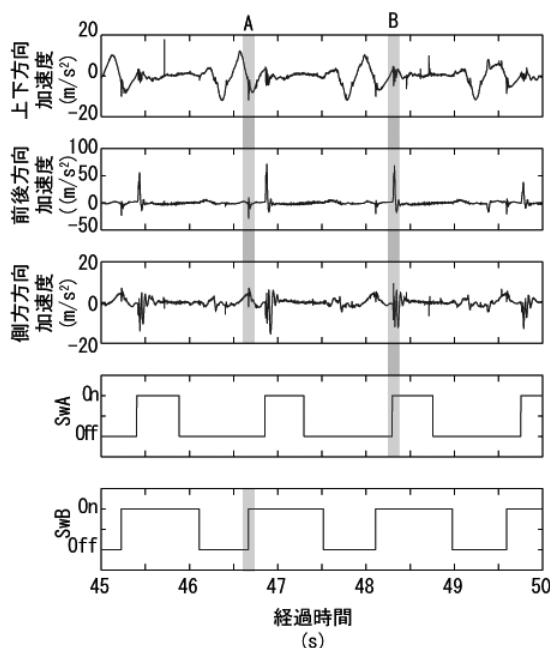


図2 加速度信号と各スイッチの測定例  
A: 膝継手完全伸展、B: 初期接地  
Fig.2 An example of measured data  
A: Full extension of knee joint  
B: Initial contact

を優先し、各加速度のピークから推測した時刻を膝継手の伸展と着床の時刻とした。

### 2.3 理学療法士の主観的評価との比較

#### 測定内容

被験者は片側大腿切断者Sub1 (膝継手: Total Knee 2000) とSub2 (膝継手: 4軸インテリジェント膝継手) の2名である。

定常状態に達したトレッドミル歩行 (3.5[km/h]) 時の義足下腿部の加速度を測定し、同時に被験者の矢状面を秒間30フレームで撮影した。被験者には転倒を避けるため、歩行時にはトレッドミルの両側にある支持バーを把持させた。

加速度信号は、「2.2加速度と接触スイッチの同時計測」と同じ条件で測定した。

### 結果

図2に垂直軸加速度のピークから求めた各被験者の膝継手完全伸展から着床までの時間を示す。各被験者の時間は、Sub1は $210 \pm 10$  (平均±標準偏差) [msec]、Sub2は $140 \pm 10$  [msec]であり、等分散を仮定しないt検定により検定し、その平均は有意に異なっていた。

各被験者の義足歩行を撮影した動画をみた理学療法士5名に対して、「義足下腿部の動態に違和感をより覚えるのはどちらの動画ですか」という質問を行った結果、理学療法士5名ともSub1の動画が「違和感をより覚える動画」と述べた。

これらの結果より、膝継手完全伸展から着床までの時間と理学療法士による義足下腿部の動態の評価には関係性がみられ、膝継手完全伸展から着床までの時間が義足歩行の習熟を評価する指標となると考えられる。

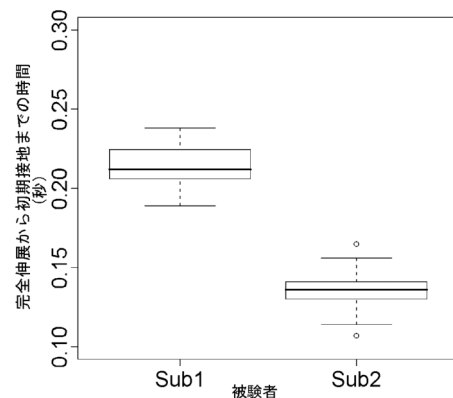


図3 膝継手完全伸展から初期接地までの時間の箱ひげ図  
Fig.3 Box plot of period from full extension of knee joint at the end of the swing phase to the initial contact

### 3 平成20年度の成果

#### 3.1 実施内容

平成20年度は、“義足歩行の練習によって膝継手の完全伸展から着床までの時間が変化するのかどうか”と“義足歩行の練習が終了時の時間はどの程度なのか”を調べた。

#### 3.2 義足歩行練習による影響

##### 測定内容

被験者はA病院に入院していた1名の片大腿切断者である。被験者はA病院に入院前に他の病院にて義足の処方を受け、その後、退院して日常生活を送っており、独歩で歩ける程度の歩行能力を有していた。

被験者および担当医師と担当理学療法士に対してインフォームド・コンセントを行い、測定への同意を得てから、トレッドミル歩行(3.5[km/h]および6.0[km/h])時に義足下腿部の加速度の測定を行った。測定は各速度でのトレッドミル歩行が可能と担当医師と担当理学療法士が診断した時点から行った。3.5[km/h]でのトレッドミル歩行は入院約3ヶ月後から、6.0[km/h]でのトレッドミル歩行は約4ヶ月後から可能と診断された。その結果、3.5[km/h]での歩行時の加速度は2ヶ月間にわたり9回、6.0[km/h]での歩行時の加速度は1ヶ月間にわたり4回測定し、最後の測定から1ヶ月後に退院となった。被験者の入院期間の合計は約6ヶ月であった。なお、6.0[km/h]での歩行が可能となった時点から測定は両速度で行った。また、測定の順序は3.5[km/h]での歩行を先とした。

加速度信号は、「2.2加速度と接触スイッチの同時計測」と同じ条件で測定した。測定3日目以降は加速度と同時に側方から矢状面の動画を撮影した。

##### 測定結果

被験者の加速度とも図2で示した加速度と同様の特徴的なピークが確認でき、そのピークを用いて膝継手の伸展から着床までの時間と歩行周期を推定した。歩行周期は着床から着床までの時間とした。また、歩行周期に対する膝継手伸展から着床までの時間の割合も求めた。

図4に3.5[km/h]および6.0[km/h]トレッドミル歩行時の膝継手の完全伸展から着床までの時間と歩行周期および歩行周期に占める膝継手の伸展から着床までの割合の歩行練習に伴う変化を示す。また、各測定日は3.5[km/h]での歩行時の加速度を初めて測

定した日を1日目として相対的に示している。図4では視認性を優先し6.0[km/h]での歩行時の各データは同じ測定日の3.5[km/h]での歩行時のデータより少し右に示している。表1に測定日毎の義足側歩数を示す。

膝継手伸展から着床までの時間の歩行訓練に伴う変化を調べるために、3.5[km/h]での歩行では1日

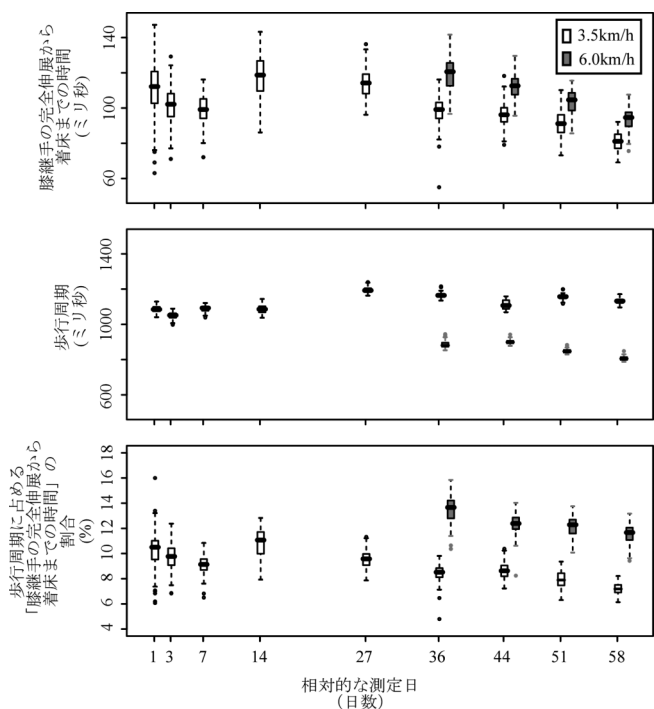


図4 歩行練習に伴う時間因子の変化  
Fig.4 changing parameters with gait training on physical therapy by boxplot  
Above row indicated period from full extension of knee joint to IC. Middle row indicated gait cycle. Bot-tom row indicated the ratio the period to IC to gait cy-cle.

表1 義足側歩数  
Table1 sample size

相対的経過日数	義足側歩数 (サンプルサイズ)	
	3.5[km/h]	6.0[km/h]
1	91	-
3	102	-
7	54	-
14	76	-
27	63	-
36	61	57
44	61	76
51	61	79
58	57	77

目と58日目、6.0[km/h]での歩行では36日目と58日目の平均値を、また、膝継手伸展から着床までの時間に対する歩行速度の影響を調べるために、58日目の3.5[km/h]での歩行と6.0[km/h]での歩行における平均値を、等分散を仮定しないt検定を用いて検定した。3.5[km/h]での歩行における膝継手の伸展から着床までの時間は1日目よりも58日目が、6.0[km/h]での歩行でも36日目よりも58日目が、歩行速度の比較では6.0[km/h]での歩行よりも3.5[km/h]での歩行が有意に短かった。

測定3日目と測定58日目の動画をみた担当理学療法士は、測定3日目の動画のほうが「義足下腿部の動態に違和感をより覚える」との主観的評価を述べている。

### 測定内容

膝継手完全伸展から着床までの時間がどの程度の範囲となるかを明らかにするために、A病院に入院して義足歩行練習を最後まで行った大腿義足使用者3名（「3.2義足歩行練習による影響」の被験者1名を含む）、膝義足使用者1名の膝継手の完全伸展から着床までの時間を義足下腿部の加速度から求めた。なお、担当理学療法士が練習を最後まで行ったと感じている被験者を「義足歩行練習を最後まで行った被験者」とした。歩行速度を一定とするためにトレッドミルを用いた。歩行速度は3.5[km/h]と6.0[km/h]である。ただし、歩行速度6.0[km/h]での歩行は、担当医師と担当理学療法士および被験者の承諾が得られた場合のみ行った。

被験者および担当医師と担当理学療法士にインフォームド・コンセントを行い、実験参加への同意を得てから実験を行った。加速度信号は、「2.2加速度と接触スイッチの同時計測」と同じ条件で測定した。

### 測定結果

表2に各被験者の膝継手の完全伸展から着床までの時間とその時間が歩行周期に占める割合の平均値を示す。表2より、今回の被験者では歩行速度3.5[km/h]における膝継手の完全伸展から着床までの時間は80から90[msec]ぐらいに分布していることがわかる。また、サンプルは2名であるが歩行周期に占める割合は3.5[km/h]よりも6.0[km/h]のほうが多くなっている。

### 考察

図4は、膝継手の完全伸展から着床までの時間が測定期間全体では減少していることを示しており、この時間の減少は歩行練習によって歩行が上達した

Table2 表2 各被験者の各時間因子  
Average of time factors on gait with above-knee prosthesis

被験者	歩行速度			
	3.5[km/h]		6.0[km/h]	
	時間 (ミリ秒)	割合 (%)	時間 (ミリ秒)	割合 (%)
A	81	7	95	12
B	87	8	86	11
C	92	9	-	-
D	89	7	-	-

ことが原因と考えられる。

歩行動作をいくつかの相に分割し、各相での動作について定量的に評価することで、歩行練習による効果を詳細に評価することができると考えられる。そのため、遊脚相終期から着床までの区間を評価する指標として膝継手が完全伸展して着床までの時間は、大腿義足歩行の習熟を示す定量的指標の1つとして用いられるといえる。しかし、単純に膝継手の完全伸展から着床までの時間が短ければいいわけではなく、歩幅が適正な範囲を逸脱して小さい場合、股関節の屈曲角度が浅く足部と床の距離が短くなるため膝継手の完全伸展から着床までの時間も短くなることが考えられるなど、歩幅などの他の評価項目と一緒に用いる必要がある。

Perryは健常者では遊脚終期に膝関節が最大伸展してから着床までに要する時間についてバラツキは不明であるが歩行周期の3%だと述べており<sup>8)</sup>、膝継手の完全伸展から着床までの時間がどの程度であれば良いかを示す指標と考えられる。しかし、表4で示したように義足歩行の練習を終了した者であっても、その値は歩行速度3.5[km/h]での歩行では8%前後であり、Perryの示した3%とは大きく異なっていた。Perryが述べた歩行周期に対する膝関節の最大伸展から着床までの時間の比が正しく、歩行時には膝継手が膝関節と同じ動きをすると仮定するならば、このことは、歩行周期に対する膝継手の完全伸展から着床までの時間の割合が正常歩行と異なっていることを示し、この割合は義足歩行を俯瞰して評価する指標となることが示唆される、現状では、歩行時に膝関節と同等の動作をする膝継手は存在していないため、膝継手の設定を変えることや機種自体を変えることによっても、この割合はすぐに変化すると考えられるため、この割合に適正な値が存在すれば、この割合は膝継手の設定や機種を評価する指標としても用いることができることを示している。

図4では歩行速度によって歩行周期に対する膝継

手の完全伸展から着床までの時間が変化しており、歩行周期が短い6.0[km/h]のほうが膝継手の伸展から着床までの時間が長かった。これは、6.0[km/h]の歩行は股関節の回転速度が3.5[km/h]の歩行よりも速く、そのため、膝継手伸展時の義足下腿部の前方へ移動しようとする慣性が強く、その慣性によって膝継手の伸展時に更に股関節が屈曲し、足部と床との距離が開いてしまい、膝継手の伸展から着床までの時間が長くなったと考えられる。これにより、歩行速度によって、歩行周期に占める膝継手の完全伸展から着床までの時間の割合の適正な値が異なることが示唆される。

#### 4 おわりに

本研究では、遊脚相終期における膝継手の完全伸展から着床までの時間に着目し、この時間が大腿義足歩行の定量的評価指標として有用であるかを検討するために「義足歩行練習に伴う膝継手の完全伸展から着床までの時間の変化」と「義足歩行練習終了時の膝継手の完全伸展から着床までの時間」を測定した。

「義足歩行練習に伴う膝継手の完全伸展から着床までの時間の変化」の被験者は1名ではあるが、義足歩行練習によって、膝継手の完全伸展から着床までの時間が減少することを定量的に示しことができた。次に、膝継手の完全伸展から着床までの時間がどの程度であれば良いかを検討するために、義足歩行練習終了時の「膝継手の完全伸展から着床までの時間」を測定し、歩行速度が3.5[km/h]であれば、膝継手完全伸展から着床までの時間は80から90[msec]、その時間が歩行周期に占める割合は8%前後となることを示した。これにより、臨床経験の浅い理学療法士が義足歩行者の指導を行うときに、膝継手の完全伸展から着床までの時間が目指す値を示すことができ

た。しかし、2つの実験を通じて、歩行速度によっても、膝継手の完全伸展から着床までの時間が変化することも示されたため、義足歩行の評価にあたっては義足歩行者の歩行速度を考慮することが必要なことも明らかになった。

また、被験者数の合計が4名であるため、膝継手の完全伸展から着床までの適正な値を示したとまではいえず、被験者数と測定する歩行速度を増やして精度を高めることが、今後の課題である。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたって、大阪電気通信大学医療福祉工学部理学療法学科 吉田正樹 教授および奈良先端大学大学院情報科学研究科教授 湊小太郎 には加速度信号の処理に関して多大なるご意見を承りました。ここに謝意を示します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人理学療法士協会：「資料・統計」、  
〈<http://www.soc.nii.ac.jp/jpta/02-association/data0803.html>〉 [accessed March 29, 2009]
- 2) 長倉裕二 “下肢切断者の体力特性とその測定方法”、理学療法、Vol.22、No.2、pp.210-217、2005
- 3) 澤村誠志 “切断と義肢”、医歯薬出版株式会社、p.436、2007
- 4) 日本整形外科学会、日本リハビリテーション医学会、“義肢装具のチェックポイント”、株式会社 医学書院、p.148、2007
- 5) 長倉、小嶋他 “最近の義足膝継手の動向(2)”、Vol.13、No.3、pp.192-199、1997
- 6) 永田靖、吉田道広 “統計的多重比較法の基礎”、サイエンス社、1997
- 7) David A. Winter “BIOMECHANICS and MOTOR CONTROL of HUMAN MOVEMENT THIRD EDITION”, John Wiley & Sons、2005
- 8) Jacquelin Perry “GAIT ANALYSIS Normal and Pathological Function”, SLACK Incorporated、1992