

小学生の歩行動作のバイオメカニクスの
データベースの構築に関する研究

(研究課題番号 14580014)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金（基盤研究 C（2））

研究成果報告書

平成 16 年 5 月

研究代表者 阿江通良

(筑波大学人間総合科学研究科体育科学専攻)

目 次

I	はしがき 謝辞	1
II	研究組織	3
III	研究概要	4
IV	研究成果	5
	1. 小学生の歩行動作の発達に関するバイオメカニクス的研究	
	2. 小学生の歩行動作のバイオメカニクスのデータベース（資料）	
	2.1 歩行速度を規定する要因	
	2.2 平均歩行動作パターン（スティックピクチャー）	
	2.3 身体重心の鉛直変位パターン	
	2.4 関節角度変化パターン	
	2.5 身体部分角度変化パターン	
	2.6 関節角速度変化パターン	
	2.7 身体部分角速度変化パターン	
	2.8 回復脚関節トルク変化パターン	
	2.9 回復脚関節トルクパワー変化パターン	

I はしがき

最近、青少年の姿勢や歩容の悪化が指摘されている。この現象は、昨今のウォーキングブームとは対照的であり、極めて奇異なことと言えるであろう。

歩行は、人間にとって最も重要かつ基礎的な移動運動の1つであり、心身に障害がない健常な子どもであれば、1歳前後からはじまり、小学生になると、基本形態はほぼ完成するとされている。しかし、「健常であれば誰でも歩けるようになる」ということが、逆に教育の場で歩行を軽視し、正しい指導が行われていない一因とも考えられる。そして、調整力の発達が最も著しいとされる小学校期にこそ正しい歩行動作の指導がなされるべきであると考えられる。

効果的な指導のためには、小学生の歩行動作の実態をバイオメカニクスの研究することが役立つが、小学生の歩行動作に関するバイオメカニクスの研究はほとんどみあたらない。そのため、指導の根拠になる標準的な動作モデルがないのが現状であり、指摘されているような歩容の悪化が本当に生じているのかも確かめられていない。

動作パターンを評価する方法には、力学的変量とパフォーマンスとの関係を検討する方法、および動作モデルと比較する方法がある。このうち、後者の方法を試みたものは、スプリント動作に関するもの(Mann,1998; Ae ら, 1997)、走高跳の踏切動作に関するもの(Ae ら,1997)などがある。しかし、基礎的動作に関するものは少なく、高齢者の歩行動作や走動作を対象にしたものがあるが(岡田ら, 1996)、小学生の動作についてはないようである。また、小学生の各種動作パターンに関しては、発達バイオメカニクスの分野において研究されているが、定量的なかたちで標準的動作パターンのデータベースを構築するまでには至っていない。

そこで、本研究では、小学生の歩行動作をバイオメカニクスの計測し、青年のものと比較することにより、その特徴を明らかにするとともに、小学生の歩行動作の標準的動作パターン(平均歩行動作)に関するデータベースを構築することを目的とした。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，多大な協力をいただいた下記の方々に心より感謝致します．

千葉県茂原市立緑が丘小学校の教職員および児童の皆さん

千葉県松戸市立古ヶ崎南小学校の教職員および児童の皆さん

茨城県石下町立飯沼小学校の教職員および児童の皆さん

鹿児島県鹿児島市立福平小学校の教職員および児童の皆さん

鹿児島大学教育学部 飯干 明 助教授

筑波大学体育科学系スポーツバイオメカニクス研究室の諸兄

Ⅱ 研究組織

研究代表者 阿江通良（筑波大学人間総合科学研究科 教授）

研究分担者 藤井範久（筑波大学人間総合科学研究科 助教授）

研究協力者 小池関也（筑波大学人間総合科学研究科 講師）
伊藤道代（筑波大学体育研究科）
吉澤玲奈（筑波大学体育科学研究科）
松原誠仁（筑波大学人間総合科学研究科体育科学専攻）

研究経費

平成 14 年度	3, 1 0 0 千円
平成 15 年度	5 0 0 千円
<hr/>	
総 計	3, 6 0 0 千円

Ⅲ 研究概要

本研究では、小学 1 年生から 6 年生までの児童 284 名（男子 141 名、女子 143 名）の歩行動作の計測を行い動作データを収集した。得られたデータを青年の歩行動作と比較することにより、小学生の歩行動作の特徴を明らかにした。また、平均歩行動作パターンなどの小学生の歩行動作に関するバイオメカニクスデータベースを作成した。得られた主な結果をまとめると、以下のようになる。

1. 小学生の歩行動作の特徴

歩行速度、ステップ長、ステップ頻度に関しては、以下の特徴が見られた。

①学年とともに歩行速度、ステップ長、歩行比が大きくなり、ステップ頻度は小さくなった。また男子の方が女子より歩行比が大きく、ステップ頻度が小さかった。②歩行パターンは、学年とともにステップ頻度依存からステップ長依存に変わり、小学生以降さらにステップ長に依存していくと考えられる。また男子の方が女子よりステップ長に依存していた。また、動作に関しては、以下のような特徴が見られた。①支持期の股関節は男子の方が女子より伸展しており、これは体幹が起きており、R-on 時の大腿の後傾が小さく、L-on 時の前傾が大きいためであった。②男子より女子の方が膝関節、下腿および足の動作範囲が大きかった。③高学年男子では、回復期後半における股関節伸展トルクおよびパワーが大きく、長育だけでなく下肢筋群のパワー発揮能力の発達も歩行動作の変化、すなわちステップ長依存型への変化に影響していることが示唆された。しかし、女子ではそのような傾向は見られなかった。

2. 小学生の歩行動作に関するデータベースの構築

ステップ長、ステップ頻度、歩行速度、歩行比（ステップ長／ステップ頻度）、kinematics（身体重心の軌跡、関節および部分角度など）、kinetics（回復脚の関節トルクおよび関節トルクパワー）などを算出し、体重や歩行サイクル時間で規格化した。そして、学年および男女別に各項目の変化パターンを平均と標準偏差で示した。また、身体各部の 2 次元座標をもとに平均歩行動作を学年、男女別に作成し、スティックピクチャーで表示した。

小学生の走、跳、投などの基礎的動作パターンに関する研究は多いが、本研究のように歩行動作のデータベースを作成しようとしたものはない。したがって、本研究で得られた小学生の歩行動作に関するバイオメカニクスのデータは、歩行動作の評価基準を作成するための基礎的資料になると考えられる。

IV 研究成果

1. 小学生の歩行動作の発達に関するバイオメカニクス的研究

本文 32 ページ

図表（研究成果 1 の巻末） 30 ページ

2. 小学生の歩行動作のバイオメカニクスのデータベース（資料）

データベースに関する説明 2 ページ

資料（図表） 2-1～2-94

1. 小学生の歩行動作の発達に関するバイオメカニクス的研究

本文 ----- 32 ページ

図表（研究成果1の巻末） ----- 30 ページ

研究成果1は、伊藤道代氏の筑波大学体育研究科平成14年度修士論文としてまとめられたものである。

第1章 緒言

1.1 はじめに

近年、我が国では少子高齢化問題とともに、青少年の体力低下が問題となってきた。我が国における国民の体力・運動能力に関する統計には、文部科学省が承認統計として毎年実施している体力・運動能力調査がある。1961年（昭和36年）に成立したスポーツ振興法に基づき、スポーツテストによる体力・運動能力調査は1964年（昭和39年）から国民の体力・運動能力の現状を明らかにするとともに、体育・スポーツの指導と行政上の基礎資料を得ることを目的として始められた。そして、1998年（平成10年）の試行を経て、1999年（平成11年）からは新体力テストを用いた体力・運動能力テストが実施されるようになった。新体力テストに移行するまでの1964年（昭和39年）から1997年（平成9年）までの34年間の結果によれば、12歳から17歳の体力・運動能力の経年的推移はスポーツテストが開始された1964年（昭和39年）から向上傾向が継続し、1978年（昭和53年）頃をピークとし、以降は継続的な減少傾向にあった（Nishijima ら，2001）。また、文部科学省による平成13年度体力・運動能力調査の結果（文部科学省，2002）によれば、青少年（6～19歳）の走、跳、投の基礎的運動能力、および握力の年次推移の傾向は、ほとんどの年齢段階でいずれの基礎的運動能力および握力とも低下傾向にあると報告されている。運動実施状況別に結果をみると、運動・スポーツをほとんど毎日する群の結果は維持され、わずかに標準偏差が増大する傾向があった。運動をしない群では、結果が低下傾向を示し、標準偏差も増大する傾向があったことから、青少年の体力・運動能力の低下傾向には運動・スポーツ実施頻度および実施時間が大きく影響していることが推察された（西嶋，2002）。これらの体力・運動能力調査の結果は、幼少年期から日常生活に運動を取り入れていく必要があることを示唆すると考えられる。

1.2 研究の動機

歩行は、人間にとって最も重要かつ基礎的な移動動作の一つであり、広い場所や道具を必要としないため、日常生活の中に取り入れやすい運動である。また、ジョギングより、膝や腰への負担も小さいため、肥満傾向にある人や高齢者でも気軽に取り組める運動である。しかし、文明の発達とともに、電車、バス、自動車といった交通手段が発達し、近い距離でも自転車などを用いるようになってきたため、歩く機会は著しく減少している。そのため、「1日1万歩」という言葉はよく耳にするが、現在の生活環境では意識して歩かないかぎり1日1万歩歩くということは難しいと考えられる。一方、歩行運動の効果が認められ、生活習慣病予防やダイエットとの手段としてウォーキングがブームとなり、現在のウォーキング人口は3000万人とも4000万人とも言われるほど積極的に歩行運動に取り組んでいる人も多い。今後、さらに青少年の体力の低下が問題となり、少子高齢化社会の中で生活習慣病が問題視されるようになれば、誰もが、いつでも、どこでもできる歩行運動への関心がさらに高まると考えられる。

これまでに、歩行に関する研究は数多く行なわれてきた。しかし、歩行は心身に障害がない健常な子どもであれば1歳前後から始まり、小学生になるころには基本形態はほぼ完成するとされている。そのため、その研究のほとんどが原始歩行から幼児歩行を経て成人様歩行へと発達する過程での歩容の変化に関するもの、あるいは高齢者、障害児の歩行に関するものであり、小学生を対象とした研究は少ない。小学校期は、心身ともに発達する時期である。そのため、小学生の歩行動作をバイオメカニクス的に分析し、その歩行動作の特徴や発達傾向を明らかにすることは、日常生活の中の移動手段としてだけでなく、健康の保持・増進のための手段などとして歩行を用いるうえで有益な知見を提供すると考えられる。さらに、これらの知見は、現在、学習指導要領には具体的指導法や取り扱いが明記されずに行なわれている小学校体育における歩行の指導に役立つ資料となり得る。

1.3 研究目的

本研究の目的は、小学校 1～6 年生の男女の歩行動作をバイオメカニクス的に分析することにより、発達および性差という観点から小学生の歩行動作の特徴を明らかにすることである。

第2章 文献研究

2.1 歩行動作の完成

山室ら（2001）は、保育園児（2～6歳）57名、小学生（7～12歳）106名、成人（平均 20.1 歳）24 名を対象とし、歩行速度について子ども（保育園児と小学生）は成人よりステップ頻度の影響が高く、ステップ長の影響が低いと報告している。また、子どものステップ長は加齢、身体的発達とともに増加するが、11 歳以後において成人と同程度の値となり、子どものステップ頻度は加齢とともに緩やかに下降し、10 歳以後において成人と同程度の値となったと報告している。

佐々木（1995）は、3～10 歳児と成人の歩行動作について、歩行速度は年齢とともに大きくなっていき、さらにステップ長、ステップ頻度など、歩行動作の指標も加齢にともない変化していくと報告している。また、実際に子どもの歩きを観ると、日常の生活場面において子どもたちが大人のようにのんびりした歩行サイクルで歩いている様子はめったに観察されないと述べている。

八倉巻（2002）は、先行研究で報告されている幼児から高齢者のステップ長、ステップ頻度のデータから歩行比（ステップ長/ステップ頻度、Sekiya ら、1996）を算出し、比較した結果、成人と同じ歩行比になるのはおよそ 15 歳であると報告している。また、その歩行比のデータを長崎（1997）が示した酸素消費量の等高線図に当てはめた結果、加齢とともに酸素消費量が減少していき、成人との歩行パターンは明らかに異なると報告している。

後藤（1999）は、同一幼児を 10 年に亘って追跡した動作・筋電図的に検討した結果、7 歳以降の年齢になると、全ての筋放電パターンは歩行速度を高めても成人のものと差異がみられなくなり、歩行動作は完成すると報告している。

このように、歩行動作の完成時期については、小学生高学年や小学生以降とされている。しかし、歩行速度を決定する要因であるステップ長は長育に伴い増加することから、長育が止まる中高校生まで歩行動作が変化する可能性が高いと考えられ

る。また、小学生は成長期にあり、被験者数によっては個人差の影響を受ける可能性が高いので、一般的な動作である歩行動作を研究する際には、多くの被験者を用い、検討していく必要があると考えられる。

2.2 歩行運動の力学的エネルギー

歩行運動の力学的エネルギーは、位置エネルギーと運動エネルギーの総和であり、その変化の様子は振子運動のエネルギー変化に似ている（淵本，2000）。振子の場合には、位置エネルギーと運動エネルギーの振幅が等しく、完全な逆位相であり、全エネルギーは一定値を示す直線となる。全エネルギーは一定だが、位置エネルギーが運動エネルギーに変換されて最下点に達し、その運動エネルギーが再び位置エネルギーに変換されて身体重心が高く上がり、振子運動が続けられる。歩行運動も同様に、片脚支持期中間で最高に達した位置エネルギーを両脚支持期中間で最大となる運動エネルギー（前方速度）に変換し、その勢いを使って再び重心を持ち上げて位置エネルギーを蓄えるという運動を繰り返している。しかし、歩行運動では、重心のエネルギーの総和は振子運動のように一定ではなく、両脚支持期中間で水平速度を増すためキックすることによってエネルギーを増加させ、片脚支持期中間では遊脚が地面に付かないように意識的に少し持ち上げるためにエネルギーを増加させる。これらの僅かなエネルギーを加えることによって、歩行運動を経済的に行なっていると考えられている。

di Prampero (1986) によると、歩行運動におけるエネルギー消費に関する研究は、すでに 19 世紀後半に行なわれていたという。このとき、歩行速度 3.2~4.8km/時のエネルギー代謝量は、0.32~0.51kcal/kg/km であったというから、現在広く一般に認められている値とほぼ等しいということになる。その後、20 世紀初頭に、4.8km/時以上の速度では、体重 1kg、距離 1m 当たりのエネルギー代謝量が増大することが示されたと報告している。

消費エネルギーに関する性差については、Booyens と Keatinge (1957) が、歩行運動における体重 1kg 当りの安静時に摂取または消費した酸素量を含めた運動時の酸素量 ($\text{gross } \dot{V}O_2$) は、女性は男性に比べて少ないと報告した。一方、Howley と Glover (1974) は、1 マイル (約 1.6km) 当り、体重当りの $\text{gross } \dot{V}O_2$ は女性の方が多いと報告した。Mahadeva ら (1953) によれば、4.8km/時で歩行運動を行なったときの $\text{gross } \dot{V}O_2$ には、性差がみられなかったと報告している。

子どもの歩行を対象とした力学的エネルギーに関する研究は Cavagna ら (1983) が行っており、1~12 歳の子ども男女 43 名と成人男子 17 名を対象とし、フォースプラットフォームを用いて地面反力を測定し、子どもを 2 歳ごとのグループに分けて成人と比較している。そして、運動エネルギーを鉛直方向と水平方向に分けて力学的エネルギーを考え、そこから仕事を算出し、子どもと成人で比較した結果、子どもの方が歩行速度を得るためにより大きな外的仕事を必要とすると報告している。しかし、歩行速度はステップ長の影響を受けることから、相対的な歩行速度 ($(\text{歩行速度})^2 / (\text{重力加速度} \cdot \text{ステップ長})$) と相対的な外的仕事 (外的仕事/身体質量) との関係性を調べた結果、年齢の異なる子どもと成人の間にほとんど違いがみられなかったと報告している。

このように、歩行運動におけるエネルギーに関する研究は以前から数多く行なわれており、性差、子どもと成人の違いも検討されている。しかし、子どもの性差についての検討はほとんど行なわれておらず、Cavagna ら (1983) の研究では歩行速度を鉛直方向と水平方向に分けて検討しているため、一般的に歩行速度として用いられているステップ長とステップ頻度の積による値を用いてエネルギーを算出し、検討する必要があると考えられる。

これまでみてきたように、歩行動作に関する研究は数多く行なわれてきており、歩行速度やステップ長、ステップ頻度に関することだけでなく、エネルギーに関し

でも多くのことが報告されている。しかし、小学生を対象とする研究は少ないようである。また、小学生を対象としていても、分析対象人数が少なく、男女を分けて検討していないため、個人差や性差を考慮していないものが多いようである。

第3章 方法

3.1 被験者

被験者は、小学校1年生から6年生までの児童228名（男子111名、女子117名）であり、千葉県茂原市立緑ヶ丘小学校（男子26名、女子26名）、千葉県松戸市立古ヶ崎南小学校（男子25名、女子27名）、茨城県石下町立飯沼小学校（男子60名、女子64名）に在学していた。表3.1は、学校ごとの各学年の男女別被験者数と身体特性を示したものである。

実験に先立って、実験の目的、方法などの概要を示した文書を学校長に提出し許可を得た。そして、担任の理解を得た後、児童に担任から説明してもらった。さらに、実験直前にも験者が児童にねらいややり方などを説明した。

3.2 実験試技

本実験に先立ち、カメラやライトの影響を受けない状況下での小学生の歩行速度を調べるため、千葉県茂原市立東郷小学校で全校生徒を対象に光電管のみを用いて予備歩行速度計測を行なった。そして、その結果に基づき本実験の基準歩行速度を設定した。

図3.1は、本研究において各校の体育館内に設置した歩行路（幅1m、長さ13m）、カメラ配置および撮影範囲を示したものである。

被験者には、実験用歩行路で自由歩行を行なわせた。自由歩行は、日常生活で普段歩いている速度での歩行とし、被験者に対し口頭で「学校に来るときのように歩いて下さい」と伝え、被験者に対し歩行時の視線は前方に向けるように指示した。1人2回の試技を行なったが、著しく不自然な動作であると験者が判断した場合にはやり直しさせた。また、予備歩行速度計測を行ない、基準歩行速度（表3.2）を設定したが、本実験では設定速度を著しく逸脱する者はいなかった。

3.3 VTR 撮影

VTR 撮影は、以下に示すように計 3 回行なった。

撮影 1 千葉県茂原市立緑ヶ丘小学校（2001 年 6 月 21 日）

撮影 2 千葉県松戸市立古ヶ崎南小学校（2001 年 6 月 27 日）

撮影 3 茨城県石下町立飯沼小学校（2002 年 9 月 25～27 日）

実験試技を分析するため、歩行路の側方に設置した VTR カメラ 1 台（VX2000, SONY 社製）によって被験者の歩行動作を撮影した。撮影スピードは 60Hz, 露出時間は 1/500 秒であった。

3.4 データ処理

撮影した実験試技のうち、歩行速度は設定速度内にあったため、被験者が歩行路中で止まらず、視線を前方に向けていたよりものについて分析を行なった。2 試技とも条件を満たす場合には、験者がより自然だと判断した試技の方を分析した。

撮影 1 および撮影 2 では、身体上の分析点 21 点および校正マーク 4 点をビデオ動作解析システム（Frame-DIAS II, DKH 社製）を用いて毎秒 60 フィールドでデジタルイズすることにより 2 次元座標を得た。

撮影 3 では、身体上の分析点 13 点（右第 3 中手骨頭, 右手首, 右肘関節, 右肩関節, 右つま先, 右第 5 中足骨粗面, 右踵, 右足関節, 右膝関節, 右大転子, 頭頂点, 耳珠点, 胸骨上縁）および校正マーク 4 点を毎秒 60 フィールドでデジタルイズした。歩行では左右肢の動きに大きな差がないとみられたので、左側分析点 10 点（左第 3 中手骨頭, 左手首, 左肘関節, 左肩関節, 左つま先, 左第 5 中足骨粗面, 左踵, 左足関節, 左膝関節, 左大転子）の座標は、右半身の座標から以下の手順で作成した。

①左足離地時における左肩関節の座標を求める。

右足離地時の右肩関節から胸骨上縁までの水平距離を胸骨上縁に加えることにより左肩関節の X 座標を算出し、左肩関節の Y 座標は右足離地時の右肩関節の Y

座標と等しいとした。

②左足離地時における左肩関節以外の左側分析点の座標を求める。

左足離地時の左側分析点の X 座標は，右足離地時の右肩関節とその他の右側分析点との水平方向の相対距離を左足離地時の左肩関節の座標（上記①）に加えることにより求めた。また，左足離地時の左側分析点の Y 座標は，右足離地時の右側分析点の Y 座標と等しいとした。

③左足離地時の左側分析点の座標を基準に全局面の左側分析点の座標を求める。

右足離地時から右足離地時までの右側分析点の X 座標および Y 座標の変化量を求め，左足離地時の左側分析点の座標にそれぞれ加えた。本研究の分析局面は 1 歩行周期分であったため，2 回目の右足接地までの変化量を加えた後，1 回目の右足接地からの変化量を求め，加えた。

左側分析点の 2 次元座標値を構築した後，4 点の較正マークをもとに実座標に換算した。このとき，進行方向を X 座標，鉛直方向を Y 座標とした。以上の手順によって得られた撮影 1～3 の 2 次元座標について，Wells と Winter（1980）の方法により分析点の座標成分ごとに最適遮断周波数を決定し，Butterworth low-pass digital filter により平滑化した。用いた最適遮断周波数は，X 座標が 1.2～8.4Hz，Y 座標が 0.6～9Hz であった。

3.5 算出項目と算出方法

3.5.1 performance descriptors

①歩行速度，ステップ長，ステップ頻度

右足接地から次の右足接地までの間（2 歩）の右足先の距離の 1/2 をステップ長，1 歩に要する時間の逆数をステップ頻度（steps/s）とし，これらの積を歩行速度とした。

②相対ステップ長，相対ステップ頻度

身長差の影響を除くため、ステップ長を身長で除した相対ステップ長、ステップ頻度に（身長/重力加速度）^{1/2}を掛けた相対ステップ頻度を算出した。

③歩行比

ステップ長とステップ頻度の比（ステップ長/ステップ頻度）を歩行比（Sekiya ら，1996）とした。

④支持期時間，遊脚期時間，片脚支持期時間，両脚支持期時間

分析脚を右足とし，1 歩行周期に要する時間の内訳として，右足が接地してから離地するまでに要した時間を支持期時間（STT），右足が離地してから再度接地するまでに要した時間を遊脚期時間（SWT），右足のみで支持している時間を片脚支持期時間（SST），両足で支持している時間を両脚支持期時間（DST）とし，ビデオタイマーのコマ数から算出した。

3.5.2 kinematics

①関節角度および部分角度

図 3.2 は関節角度および部分角度の定義を示したものである。

右足関節と右つま先を結ぶベクトルが右足関節と右膝関節を結ぶベクトルとなす角を右足関節角度，右膝関節と右足関節を結ぶベクトルが右膝関節と右大転子を結ぶベクトルとなす角を右膝関節角度，右大転子と右膝関節を結ぶベクトルが胸骨上縁と右大転子を結ぶベクトルとなす角を右股関節角度とした。体幹角度は鉛直線に対して右大転子と胸骨上縁を結ぶベクトルのなす角，足角度は鉛直線に対して右踵と右つま先を結ぶベクトルがなす角，下腿角度は鉛直線に対して右足関節と右膝関節を結ぶベクトルがなす角，大腿角度は鉛直線に対して右大転子と右膝関節を結ぶ角度とした。体幹角度は鉛直線に対して時計回りを正，足，下腿，大腿の部分角度は鉛直線に対して反時計回りを正とした。

②関節角速度

①で算出した関節角度を時間微分して関節角速度を算出した。

3.5.3 力学的エネルギーおよび力学的仕事

①力学的エネルギー

部分の力学的エネルギーを式 (1) により算出した。

$$E_{i,j} = m_i g h_{i,j} + \frac{1}{2} m_i v_{i,j}^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_{i,j}^2 \quad (1)$$

ここで、 $E_{i,j}$ は時刻 j における部分 i の力学的エネルギー、 m は部分質量、 g は重力加速度、 h は部分の重心高、 v は部分重心の速度、 i は部分の重心まわりの慣性モーメント、 ω は部分の角速度である。なお、部分および全身の重心、部分の重心まわりの慣性モーメントの算出には阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いた。

②力学的仕事

部分内および部分間で力学的エネルギーの交換および伝達がおけると仮定して力学的仕事 (W_{wb}) を式 (2) より算出した。(Winter, 1979; Pierrynowski ら, 1980)

$$W_{wb} = \sum_{j=1}^{n-1} \left| \sum_{i=1}^s (\Delta E_{i,j}) \right| \quad (2)$$

ここで、 n は 1 サイクルに要したコマ数、 s は部分の数 (14 部分)、 $\Delta E_{i,j}$ は時刻 j から時間 $j+1$ における部分の i のエネルギー変化である。

③力学的エネルギー利用の有効性指数

力学的エネルギーが目的とする運動課題にどれだけ有効に使われたかを評価するために、力学的エネルギー利用の有効性 (effectiveness of mechanical energy utilization) について検討した。阿江と藤井 (1996) は、力学的エネルギー利用の有効性を評価する指標として Effectiveness index (以下 EI) と呼ばれる指数を提案して

いる。本研究では、力学的仕事が移動距離および歩行速度に対してどの程度有効であったかを評価するため、岡田（2000）の式（3）および式（4）を用いて2種の力学的エネルギー利用の有効性指数を算出した。

$$EI_{distance} = \frac{Distance}{Mechanical Work} = \frac{d}{W_{wb} / M} \quad (3)$$

$$EI_{energy} = \frac{Effective Energy}{Mechanical Work} = \frac{\frac{1}{2}MV_x^2}{W_{wb}} \quad (4)$$

ここで、 d は1歩行周期（2歩）中の身体の水平変位（ステップ長×2）、 M は身体質量、 V_x は1歩行周期の水平方向の歩行速度である。

3.5.4 歩行周期の局面分け

歩行の1周期を接地および離地、身体重心に対するつま先の位置に基づいて、6つの動作局面に分けた。図3.3は、1歩行周期における動作区分を時点と局面を示したものである。各動作区分時点は以下の通りである。

- ①1stR-on 右足（分析脚）の接地
- ②L-off 左足（非分析脚）の離地
- ③St-mid 支持期中点（身体重心が右つま先の真上を通過する時点）
- ④L-on 左足（非分析脚）の接地
- ⑤R-off 右足（分析脚）の離地
- ⑥Sw-mid 遊脚期中点（身体重心が左つま先の真上を通過する時点）
- ⑦2ndR-on 右足（分析脚）の2回目の接地

3.5.5 統計処理

学年と男女の差を検定するため、二元配置の分散分析を行なった。その結果、相互作用が有意であった場合は、男女の対比による検定を行ない、その後LSD検定を

用い学年と性別の多重比較を行なった。相互作用が有意ではなく学年の作用が有意であった場合には LSD 検定を用いて学年間の多重比較を行ない、相互作用が有意ではなく男女の作用が有意であった場合には男女間に有意差があるとした。有意水準は 5%とした。

また、歩行速度と身長の間を相関を検定するため、ピアソンの相関係数 r を算出した。有意水準は 1%とした。

第4章 結果

4.1 小学生の歩行動作のスティックピクチャー（典型例）

図 4.1 および 4.2 は、各学年の典型例を男女別に示したスティックピクチャーである。学年が増すと、ステップ長が大きくなり、手の振り幅などにやや違いはみられるが、動作パターンには視察によって大きな相違は見出せない。そこで、下肢動作にみられた相違については以下に詳しく述べる。

4.2 歩行速度を規定する要因

図 4.3 は、各学年の歩行速度、ステップ長など歩行速度を規定する要因の平均値と標準偏差を示したものである。なお、図中の太い破線は青年（岡田，2000）の平均値である。表 4.1 は、これらの要因に関する有意差検定の結果を示したものである。

歩行速度は、学年間に有意差がみられ、学年とともに大きくなったが、男女間に有意差はみられなかった。

ステップ長は、学年間に有意差がみられ、学年とともに大きくなったが、男女間に有意差はみられなかった。相対ステップ長には、学年間で有意差がみられたが男女間に有意差はなかった。

ステップ頻度は、学年間および男女間に有意差がみられ、学年とともに小さくなり、男子の方が女子より小さかった。また、相対ステップ頻度は、男女間にのみ有意差がみられ、男子の方が女子より小さかった。

歩行比は、学年間および男女間に有意差がみられ、学年とともに大きくなり、男子の方が女子より大きかった。

また、これらの歩行速度を規定する要因を小学生と青年で比較すると、歩行速度、ステップ長、相対ステップ長、歩行比は小学生の方が青年より小さく、ステップ頻

度は小学生の方が青年より大きかった。

図 4.4 および 4.5 は、歩行速度を規定する要因のうち、時間的要因（ステップ頻度の決定要因）の平均値および標準偏差を示したものである。なお、図中の太い破線は青年（岡田，2000）の平均値であり，%STT，%SWT，%SST，%DST はそれぞれ，支持期時間（STT），遊脚期時間（SWT），片脚支持期時間（SST），両脚支持期時間（DST）の 1 歩行周期時間に占める割合をパーセントで示したものである。

表 4.2 は、これらの要因に関する有意差検定の結果を示したものである。

支持期時間は、学年間および男女間に有意差がみられ、3 年生から 4 年生にかけて長くなり、男子の方が女子より長かった。遊脚期時間は、学年間に有意差がみられ、学年とともに長くなった。これらの 1 歩行周期に占める割合（%STT，%SWT）は、ともに学年間および男女間に有意差がみられ、%STT は学年とともに小さくなり、%SWT は学年とともに大きくなり、%STT は男子の方が女子より大きく、%SWT は男子の方が女子より小さかった。

片脚支持期時間は、学年間および男女間に有意差がみられ 1～3 年生まで学年とともに長くなり、男子の方が女子より長かった。両脚支持期時間は、男女間に有意差がみられ、男子の方が女子より長かった。これらの 1 歩行周期に占める割合（%SST，%DST）は、ともに学年間に有意差がみられたが、経年的な変化傾向はなかった。また、%DST には男女間にも有意差がみられ、1～4 年生では男子の方が女子より大きく、5，6 年生では男子の方が女子より小さかった。

これらの時間的要因を小学生と青年で比較すると、支持期時間、遊脚期時間および片脚支持期時間は小学生の方が青年より短く、両脚支持期時間には差がみられなかった。また、%STT は小学生の方が青年より大きく、%SWT は小学生の方が青年より小さかった。

以上のことから、歩行速度とステップ長は男女の差はなく学年とともに大きくなるが青年より小さく、ステップ頻度は男子の方が女子より小さく、また学年とともに

に小さくなるが青年より大きく、歩行比は男子の方が女子より大きく、また学年とともに大きくなるが青年より小さいことがわかった。また、ステップ頻度を規定する要因は、支持期時間、遊脚期時間および片脚支持期時間は学年とともに長くなるが青年より短く、両脚支持期時間には変化傾向がなく青年との差もないことがわかった。

4.3 下肢および体幹の関節角度および部分角度

4.3.1 下肢関節の関節角度と動作範囲

図 4.6 は、動作区分時点での下肢関節角度の平均値を男女別に示したものであり、太い破線は青年（岡田，2000）の平均値を示している。図 4.7 は各局面における下肢関節の動作範囲の学年別および男女別の平均値を示したものであり、黒線は青年（岡田，2000）の平均値を示している。また、表 4.3 および 4.4 は、動作区分時点での下肢関節角度の有意差検定の結果を示したものであり、表 4.5 および 4.6 は支持期および遊脚期における下肢関節角度の最大値、最小値および動作範囲の有意差検定の結果を示したものである。

①股関節角度（図 4.6 および 4.7，表 4.3 および 4.5）

股関節角度は、L-on 時において学年間に有意差がみられ、R-on, ST-mid, L-on 時においては男女間に有意差がみられたが、1 歩行周期における股関節の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期の最大値、最小値には男女間に有意差がみられ、男子の方が女子より大きく、より伸展位にあり、動作範囲にも学年間に有意差がみられた。しかし、股関節角度の最大値、最小値および動作範囲に経年的な変化傾向はみられなかった。

股関節角度を小学生と青年で比較すると、小学生の方が青年より角度が大きく、より伸展位にあった。また、最大値、最小値および動作範囲も小学生の方が青年より大きく、より伸展位であった。

②膝関節角度（図 4.6 および 4.7, 表 4.3 および 4.5）

R-on 時における膝関節角度は、交互作用が有意であった。1～4 年生では、男子の方が女子より角度が大きく、より伸展位を示したが、5,6 年生では男子の方が女子より角度が小さくなり、より屈曲位を示した。また、L-on 時には学年間および男女間に有意差がみられた。しかし、1 歩行周期における膝関節の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期の最大値は交互作用が有意であった。1～4 年生では男子の方が女子より大きくより伸展位であり、5,6 年生では男子の方が女子より小さくより屈曲位であった。遊脚期の最小値には学年間に有意差がみられ、遊脚期の動作範囲には男女間で有意差がみられ、男子の方が女子より大きかった。しかし、膝関節角度の最大値、最小値および動作範囲に経年的な変化傾向はみられなかった。

膝関節角度を小学生と青年で比較すると、小学生の方が青年より角度が大きく、より伸展位にあった。また、最大値および動作範囲も小学生の方が青年より大きく、より伸展位であった。

③足関節角度（図 4.6 および 4.7, 表 4.4 および 4.6）

L-on 時および R-off 時における足関節角度には学年間に有意差がみられ、5 年生の角度が小さく、より背屈位であった。しかし、1 歩行周期における足関節の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期および遊脚期における最大値には学年間に有意差がみられ、5 年生の角度が小さく、より背屈位であった。また、最小値は遊脚期にのみ学年間に有意差がみられた。動作範囲は、支持期および遊脚期において学年間に有意差がみられた。しかし、足関節角度の最大値、最小値および動作範囲に経年的な変化傾向はみられなかった。

以上のことから、支持期の股関節は男子の方が女子より伸展していること、遊脚期の膝関節の動作範囲は男子の方が女子より大きいことがわかった。しかし、いずれの下肢関節角度変化パターン、最大値、最小値および動作範囲には経年的な一定

の変化傾向はみられないことがわかった。さらに、小学生は青年より特に支持期の股関節および膝関節が伸展していることがわかった。

4.3.2 下肢および体幹の部分角度と動作範囲

図 4.8 は、動作区分時点での体幹および下肢の部分角度の平均値を男女別に示したものであり、太い破線は青年（岡田，2000）の平均値を示している。図 4.9 は各局面における体幹および下肢の部分角度動作範囲の学年別および男女別の平均値を示したものであり、黒線は青年（2000，岡田）の平均値を示している。また、表 4.7 および 4.8 は、動作区分時点での体幹および下肢の部分角度の有意差検定の結果を示したものであり、表 4.9 および 4.10 は支持期および遊脚期における体幹および下肢の部分角度の最大値，最小値および動作範囲の有意差検定の結果を示したものである。

①体幹角度（図 4.8 および 4.9，表 4.7 および 4.9）

体幹角度は、L-on 時において学年間に有意差がみられ、L-off 時，R-off 時および SW-mid 時においては男女間に有意差がみられた。しかし、1 歩行周期における体幹の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期および遊脚期の最小値には男女間に有意差があり、男子の方が女子より小さく、より前傾位が小さかった。支持期の最小値には学年間にも有意差がみられた。動作範囲は、支持期において学年間に有意差がみられた。しかし、体幹角度の最大値，最小値および動作範囲には経年的な変化傾向がみられなかった。

また、体幹角度を小学生と青年で比較すると、小学生の方が青年より角度が小さく、より後傾位にあった。また、最大値，最小値および動作範囲も小学生の方が青年より小さく、より後傾位であった。

②大腿角度（図 4.8 および 4.9，表 4.7 および 4.9）

ST-mid 時および L-on 時における大腿角度には男女間に有意差がみられ、男子の

方が女子より小さく、より前傾位であった。しかし、1歩行周期における大腿の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期の最小値には男女間に有意差がみられ、男子の方が女子より角度が小さく、より前傾していた。しかし、動作範囲には差がみられず、大腿角度の最大値、最小値および動作範囲には経年的な変化傾向はみられなかった。

また、大腿角度を小学生と青年で比較すると、小学生の方が青年より角度が小さく、より後傾が小さく前傾が大きかった。

③下腿角度（図 4.8 および 4.9, 表 4.8 および 4.10）

R-on 時における下腿角度は、交互作用が有意であった。1～4 年生では、男子の方が女子より角度が大きく、より後傾位を示したが、5,6 年生では男子の方が女子より角度が小さく、より後傾位が小さくなった。また、L-off 時、ST-mid 時、L-on 時および R-off 時には学年間に有意差がみられ、R-off 時には男女間の差がみられた。しかし、1 歩行周期における下腿の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期の最大値は、交互作用が有意であり、女子のみ有意差がみられ、1～4 年生と 5,6 年生の間で大きくなり、より後傾位になった。また、支持期の最小値および遊脚期の最大値には学年間および男女間に有意差がみられ、遊脚期の最小値には男女間に有意差がみられた。動作範囲は、支持期および遊脚期において男女間に有意差がみられ、5 年生では男子の方が女子より小さかったが、全体的にみれば男子の方が女子より大きかった。しかし、下腿角度の最大値、最小値および動作範囲には経年的な変化傾向はみられなかった。

また、下腿角度を小学生と青年で比較すると、ほとんど差がみられなかった。

④足角度（図 4.8 および 4.9, 表 4.8 および 4.10）

足角度は、R-off 時においてのみ学年間と男女間に有意差がみられた。しかし、1 歩行周期における足の角度変化パターンに経年的な変化はみられなかった。支持期および遊脚期の最小値には、学年間および男女間に有意差がみられ、3 年生から 4

年生で角度が大きくなり、より後傾位になった。動作範囲は、支持期および遊脚期において学年間および男女間に有意差がみられ、3年生から4年生で動作範囲が小さくなり、男子の方が女子より動作範囲が大きかった。しかし、足角度の最大値、最小値および動作範囲には経年的な変化傾向はみられなかった。

以上のことから、支持期および遊脚期のいくつかの動作区分時点において体幹は男子の方が女子より後傾が大きく前傾が小さいこと、支持期の大腿は男子の方が女子より前傾していること、支持期および遊脚期の下腿および足角度の動作範囲は男子の方が女子より大きいことがわかった。また、いずれの下肢関節角度変化パターン、最大値、最小値および動作範囲に経年的な一定の変化傾向がないことがわかった。さらに、小学生は青年より1歩行周期を通して体幹が後傾しており、支持期の大腿はより後傾が小さく前傾が大きいことがわかった。

4.4 力学的エネルギー

4.4.1 力学的エネルギーと力学的仕事

図4.10は、支持期および遊脚期における体重当たりの力学的エネルギーの変化を男女別に示したものである。

1歩行周期における力学的エネルギーの変化パターンに大きな違いはみられなかったが、学年とともに大きくなった。また、1～5年生では男子の方が女子より小さかったが、6年生では男子の方が女子より大きかった。

図4.11は、1歩行周期における体重当たりの力学的仕事（以下、仕事）の平均値および標準偏差を示したものである。表4.11は、仕事の有意差検定の結果を示したものである。

仕事は、学年間に有意差がみられ、学年とともに大きくなったが、男女間に有意差はなかった。

4.4.2 力学的エネルギー利用の有効性

図 4.12 は 1 歩行周期における力学的エネルギー利用の有効性指数（以下、EI）の平均値および標準偏差を示したものである。表 4.12 は、 $EI_{distance}$ および EI_{energy} の有意差検定の結果を示したものである。

ステップ長による EI ($EI_{distance}$) には、学年間および男女間に有意差はみられなかった。しかし、力学的エネルギーによる EI (EI_{energy}) には、学年間で有意差がみられ、学年とともに大きくなったが、男女間に有意差はなかった。

第5章 考察

本研究の結果では、学年とともに変化する項目がみられた。そこで、岡田（2000）の青年の結果と比較することにより、小学生の歩行動作の特徴について検討する。

5.1 歩行速度、ステップ長、ステップ頻度からみた小学生の歩行動作の特徴

歩行速度はステップ長とステップ頻度の積で決定される。ある速度を得るためのステップ長とステップ頻度の組み合わせは無限にあるが、その中から個人が自然に選択するステップ長とステップ頻度の組み合わせは、個人の身体的特性に大きく依存すると考えられる。本研究の結果から、ステップ長は学年とともに大きくなり、ステップ頻度は学年とともに小さくなることが示された（図 4.3）。また、ステップ長とステップ頻度の比である歩行比が学年とともに大きくなったことから、学年とともにステップ長に依存して歩行速度を獲得するようになると考えられる。さらに、ステップ頻度および相対ステップ頻度は男子の方が女子より小さく、歩行比は男子の方が女子より大きかったことから、男子の方が女子よりステップ長に依存して歩行速度を獲得していると考えられる。また、小学生は青年に比べ、歩行速度、ステップ長および歩行比が小さく、ステップ頻度が大きかったことから、小学生以降さらにこれらの要因は変化していき、青年になるとよりステップ長に依存して歩行速度を獲得するようになると考えられる。

ステップ長およびステップ頻度に影響を与える重要な要因として考えられるのが、下肢長である。相対ステップ長は学年間に有意差がある場合もあったが 0.43～0.46 の範囲内にあり、青年の相対ステップ長の 0.48 と大きな差はなかった。また、図 5.1 は歩行速度と身長の関係を示したものである。歩行速度と身長との間に低いものの有意な相関（ $r = 0.36$, $p < 0.01$ ）がみられた。これらのことから、歩行速度は身長の影響を受けると考えられる。

以上のことから、歩行動作は身長の影響を受け、小学生では学年とともに歩行速

度を得る strategy がステップ頻度依存からステップ長依存に変わり、小学生以降さらにステップ長依存になるといえる。また、小学生では男子の方が女子よりステップ長依存であるといえるであろう。

5.2 下肢および体幹の角度からみた小学生の歩行動作の特徴

本研究と岡田（2000）の報告とでは、足関節および足角度の定義、動作区分時の St-mid および Sw-mid の定義が異なるので、以下では、この点に注意して小学生と青年の歩行動作を比較する。

小学生の下肢関節角度、体幹および下肢の部分角度の角度変化パターン、これらの最大値、最小値および動作範囲には経年的な一定の変化傾向はみられなかった。しかし、支持期の股関節角度には男女間に差がみられ男子の方が女子より伸展位にあり、青年に比べて小学生の方がより伸展位にあった（図 4.6）。また、支持期の膝関節角度においては小学生の男女間には差がみられないが、青年に比べて小学生の方がより伸展位にあった。

関節角度は関節を構成する 2 つの部分の相対角によって決まる。小学生の男女間にみられた支持期の股関節角度の差は、図 4.8 に示したように、男子の方が女子より体幹の後傾が大きく、R-on 時の大腿の後傾が小さく L-on 時の前傾が大きかったことに起因し、小学生の支持期の股関節が青年より伸展していたのも、同様の理由からだと考えられる。また、小学生の支持期の膝関節が青年より伸展していたのは、下腿角度にはほとんど差がないことから、小学生の方が R-on 時の大腿の後傾が小さく L-on 時の前傾が大きかったことに起因しているといえる。

これらのことは、男子の方が女子より、また小学生の方が青年より身体をより起こした姿勢で歩行していることを意味する。さらに、小学生と青年では支持期の股関節と膝関節の動作範囲に差がみられ、小学生の方が青年より大きく、より伸展位での動作範囲が大きかった（図 4.7）。体幹の動作範囲については、小学生では男女

間に差がみられないが、小学生と青年間では差がみられ、小学生の方がより後傾位であった（図 4.9）。

岡田（2000）は、男性高齢者と青年の歩行動作を比較し、男性高齢者でみられたステップ長の短縮とステップ頻度の増大は、股、膝、足関節が歩行周期を通じてより屈曲位（背屈位）にあったこと、足関節の最大底屈が小さいことによって生じたと報告している。また、男性高齢者がステップ長を伸ばすことが困難になるのは、加齢にともなう筋機能の衰え（Vandervoort ら、1990；Shultz, 1992；Poulin ら、1992；岡田ら、1994）や関節可動域の減少（Shultz, 1992）によるとの報告もある。本研究の結果では、小学生と青年では、小学生の方が股関節および膝関節が伸展位にあり、関節可動域が大きい、相対ステップ長に大きな差がなく、ステップ長が小さかったことから、小学生は青年に比べて脚を前方に出しやすい姿勢をとっているが、身長が小さく下肢の筋力が未発達なためステップ長が青年よりも小さくなったと考えられる。

5.3 力学的エネルギー利用の有効性からみた小学生の歩行動作の特徴

歩行では、力学的エネルギーの大きさ（力学的出力）だけでなく、力学的エネルギーが身体の移動のためにどのように用いられるか（力学的エネルギー利用の有効性）が重要である。本研究では、力学的仕事は移動距離および歩行速度を得るためにどの程度利用されたかを評価するため、2 種の力学的エネルギー利用の有効性指数（EI）を算出した。

移動距離に対する $EI_{distance}$ には、学年間にも男女間にも有意差がみられなかったことから、自由歩行では負担の少ない歩行速度を自然に選択して歩いていると考えられた（図 4.12）。

岡田（2000）は、関節トルクによって青年の力学的仕事に対する EI を算出した。関節トルクによる力学的仕事は、身体部分間のエネルギーの伝達が完全に生じると

仮定して求めた力学的仕事 (W_{wb}) より大きくなり、阿江ら (1996) は疾走速度約 2~10m/s のランニングの場合には W_{wb} による EI_{Wwb} を従属変数、関節トルクパワーから算出した力学的仕事 (W_{jp}) による EI_{Wjp} を独立変数とすれば、 $EI_{Wwb} = 1.1794EI_{Wjp} + 0.2214$ という推定式が求められると報告している。今回比較するのは歩行運動の EI であるため、阿江らの推定式を用いることは身体運動の違いによる影響を受けると考えられるが、この式を用いた場合の青年の $EI_{distance}$ は 0.81 と推定され小学生の $EI_{distance}$ より小さかった。しかし、Cavagna ら (1983) は、相対的な歩行速度 ($(\text{歩行速度})^2 / (\text{重力加速度} \cdot \text{ステップ長})$) と相対的な外的仕事 (外的仕事/身体質量) の関係は、年齢の異なる子どもと青年の間でほとんど相違がないと報告していることから、一定の距離を自分で選択した速度で歩く場合には、年齢によるエネルギーの有効性に差はないと考えられる。

歩行速度に対する EI_{energy} は、学年間に有意差があり、学年とともに大きくなったことから、学年とともに歩行速度を生み出すためのエネルギーの有効性が高くなっていると考えられる (図 4.12)。Cavagna ら (1983) は、子どもは年齢とともに歩行速度を得るための体重当たりの外的仕事が小さくなり、その外的仕事は子どもの方が大人に比べて大きいと報告している。この報告は、本研究の結果と一致しており、小学生以降、さらに歩行速度を得るためのエネルギーの有効性は高くなっていくと考えられる。

以上のことから、一定の距離を歩く際の力学的エネルギーの有効性には学年による差も青年との差もないが、歩行速度を得るための力学的エネルギーの有効性は学年とともに高くなり、小学生以降さらに力学的エネルギーの有効性が高くなると考えられる。

本研究の結果から、小学生の歩行は長育と筋力の影響を受け、一定の距離を歩く際のエネルギーの有効性には学年による差はないが、歩行速度を得るためのエネルギー

ギーの有効性は学年とともに高くなることがわかった。これらのことから、教育現場へ以下のような示唆が引き出せるであろう。

- ① 遠足などで同一の距離を歩く場合には学年別にスタート時間を設定し低学年からスタートする、同時にスタートする場合には最終目的地までのコースを学年別に設定する、最終目的地を学年別に設定するなどの配慮が必要である。
- ② 集団登下校では、学年とともに体力が高まると考えられるので、最も下の学年の児童に合った速度で歩く。

第 6 章 結論

6.1 結論

本研究では、小学校 1～6 年生の男女の歩行動作をバイオメカニクスの的に分析することにより、発達および性差という観点から小学生の歩行動作の特徴を明らかにすることを目的とした。

本研究で得られた結果とその考察から、以下のような結論と教育現場への示唆が引き出せるであろう。

(1) 歩行速度、ステップ長、ステップ頻度に関して

- ① 学年とともに歩行速度、ステップ長、歩行比が大きくなり、ステップ頻度は小さくなった。また、男子の方が女子より歩行比が大きく、ステップ頻度が小さかった。
- ② 歩行は、学年とともにステップ頻度依存からステップ長依存に変わり、小学生以降さらにステップ長に依存していくと考えられる。また、男子の方が女子よりステップ長に依存していた。

(2) 動作に関して

- ① 支持期の股関節は男子の方が女子より伸展しており、これは体幹の後傾が大きく、R-on 時の大腿の後傾が小さく L-on 時の前傾が大きいためであった。
- ② 男子より女子の方が膝関節、下腿および足の動作範囲が大きかった。
- ③ 支持期において、男子の方が女子より、小学生の方が青年より股関節が伸展位にあり、体幹および大腿が後傾位にあったことから、小学生の方が青年より、また小学生男女では男子の方がより身体を起こして歩行しているといえる。

(3) 力学的エネルギーの有効性に関して

- ① 移動距離に対する力学的エネルギーの有効性は、学年間や男女間に差はなかった。

- ② 歩行速度に対する力学的エネルギーの有効性は学年とともに高くなり、小学生以降さらに歩行速度を獲得するためのエネルギーの有効性は高くなると考えられた。

これらのことから、小学生の歩行動作は、長育の影響を受けて変化し、小学生以降さらに長育と筋力の増加に伴って変化していくと考えられる。また、遠足などで同一の距離を歩く場合には学年別のスタート時刻を設定する、集団登下校では最も下の学年の児童に合った歩行速度で歩くなどの配慮が必要であろう。

文献

- 阿江通良（1996）：日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数。
Jpn.J.Sports.Sci.,15,155-162
- 阿江通良，藤井範久（1996）：身体運動における力学的エネルギー利用の有効性とそ
の評価指数．筑波大学体育科学系紀要，19，127-137
- Booyens,J. and Keatinge.W : The expenditure of energy by men and women walking,
J.Physiol, 138, 165-171, (1957)
- Cavagna,G.A, Franzetti.P and Fuchimoto.T (1983) : The mechanics of walking in children.
J.Physiol, 343, 323-339
- di Prampero,P.E. : The Energy Cost of Human Locomotion on Land and in Water.
Int.J.Sports Med, 7, 55-72, (1986)
- 淵本隆文(2000):歩行とランニングにおけるエネルギー変換．体育の科学, 50, 20-24
- 後藤幸弘（1999）：子どもの歩行動作の特徴，体育の科学，49，101-107
- Howley,E.T. and Glover.M.E (1974) : The caloric cost of running and walking one mile for
men and women. Med.Scine.Sports, 6, 235-237
- 文部科学省(2002)：平成13年度体力・運動能力調査結果について。
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/14/10
- 長崎浩（1997）：からだの自由と不自由，中公新書
- 西嶋尚彦（2002）：青少年の体力低下傾向．体育の科学，52，4-14
- Nishijima T,Kokubo S,Suzuki K(2001) : Secular changes of physical fitness and motor
ability during 1964-97 in Japanese youth. Jpn.J.School Health, 42 (suppl.), 172-173
- Mahadeva,K. , R.Passmore and B.Woolf : Individual variations in metabolic cost of
standardized exercise : Effects of food, age, sex. J.Physiol, 121, 225-231, (1953)
- 岡田英孝，阿江通良，大木昭一郎（1994）：加齢にともなうマスターズランナーの疾
走フォームの変容に関する横断的研究．体育の科学，44（9），753-760

- 岡田英孝（2000）：男性高齢者の移動運動に関するバイオメカニクス的研究，平成12年度筑波大学大学院体育科学研究科博士論文
- Poulin,M.J., Vandervoort,A.A., Paterson,D.H., Kramer,J.F., and Cunningham,D.A. (1992) : Eccentric and concentric Torques of knee and elbow extension in young and older man. *Can.J.Spt.Sci.*, 17 (1), 3-7
- 佐々木玲子（1995）：幼児の動作における速度調整の発達．*体育の科学*, 45, 869-873
- Schultz,A.B. (1992) : Mobility impairment in the elderly : Challenges for biomechanics research. *J.Biomechanics*, 25 (5), 519-528
- Sekiya,N., Nagasaki,H., Ito,H., and Furuna,T.(1996) : The invariant relationship between step length and step rate during free walking. *J. Human Movement Studies*, 30, 241-257.
- Vandervoort,A.A.,Kramer,J.F.,and Wharram,E,R. (1990) : Eccentric knee strength of elderly females. *J.Gerontol.Biol.Sci.*, 45 (4), B125-128
- 八倉巻尚子（2002）：1歳児歩行の運動力学．*バイオメカニズム学会誌*, 26, 16-21
- 山室英輝，加賀勝，和気昭彦（2001）：発育に伴う歩行パターンの変化，*日本体育学会第52回大会号*, 349

図表一覧（順は本文の初出順）

表 3.1 被験者の身体特性

図 3.1 撮影設定

表 3.2 基準歩行速度

図 3.2 角度定義

図 3.3 動作区分時点および局面

図 4.1 小学生男子における歩行動作のスティックピクチャー（典型例）

図 4.2 小学生女子における歩行動作のスティックピクチャー（典型例）

図 4.3 歩行速度を規定する要因の平均値および標準偏差

表 4.1 歩行速度を規定する要因の有意差

図 4.4 支持期時間および遊脚期時間の平均値，標準偏差および割合

図 4.5 片脚支持期時間および両脚支持期時間の平均値，標準偏差および割合

表 4.2 時間的要因の有意差

図 4.6 動作区分時点における下肢関節角度

図 4.7 下肢関節角度の動作範囲

表 4.3 動作区分時点における股関節角度および膝関節角度の有意差

表 4.4 動作区分時点における足関節角度の有意差

表 4.5 支持期および遊脚期における股関節角度および膝関節角度の最大値，最小値，動作範囲の有意差

表 4.6 支持期および遊脚期における足関節角度の最大値，最小値，動作範囲の有意差

図 4.8 動作区分時点における体幹および下肢部分角度

図 4.9 体幹および下肢部分角度の動作範囲

表 4.7 動作区分時点における体幹角度および大腿角度の有意差

表 4.8 動作区分時点における下腿角度および足角度の有意差

表 4.9 支持期および遊脚期における体幹角度および大腿角度の最大値，最小値，
動作範囲の有意差

表 4.10 支持期および遊脚期における下腿角度および足角度の最大値，最小値，動
作範囲の有意差

図 4.10 支持期および遊脚期の力学的エネルギー変化パターン

図 4.11 力学的仕事の平均値と標準偏差

表 4.11 仕事の有意差

図 4.12 $EI_{distance}$ および EI_{energy} の平均値と標準偏差

表 4.12 $EI_{distance}$ および EI_{energy} の有意差

図 5.1 歩行速度と身長

表3.1 被験者の身体特性

a) 全体

学年	人数(女)	男子身長(m)	女子身長(m)	男子体重(kg)	女子体重(kg)
1	38(21)	1.18±0.06	1.17±0.05	22.0±5.3	21.5±3.7
2	41(22)	1.22±0.05	1.24±0.05	24.5±5.3	25.6±7.3
3	36(18)	1.30±0.06	1.29±0.07	28.3±4.7	27.3±4.4
4	39(20)	1.34±0.06	1.36±0.05	33.3±6.7	32.6±7.4
5	41(23)	1.39±0.07	1.42±0.06	34.5±6.9	37.1±11.1
6	33(13)	1.50±0.11	1.48±0.07	43.3±9.3	37.6±6.3

b) 緑ヶ丘小学校

学年	人数(女)	男子身長(m)	女子身長(m)	男子体重(kg)	女子体重(kg)
1	8(5)	1.19±0.04	1.19±0.05	20.6±0.8	21.7±3.0
2	8(4)	1.19±0.03	1.22±0.03	20.2±0.6	23.2±3.3
3	9(5)	1.28±0.05	1.26±0.09	27.7±3.9	25.4±5.3
4	10(5)	1.34±0.05	1.35±0.01	35.5±5.0	29.0±1.4
5	9(4)	1.40±0.08	1.39±0.03	37.9±7.7	34.3±3.2
6	8(4)	1.52±0.11	1.47±0.05	46.7±9.5	41.1±7.5

c) 古ヶ崎南小学校

学年	人数(女)	男子身長(m)	女子身長(m)	男子体重(kg)	女子体重(kg)
1	9(4)	1.15±0.06	1.15±0.10	19.6±2.1	20.5±3.5
2	9(5)	1.19±0.08	1.24±0.07	23.5±5.2	27.3±5.9
3	9(4)	1.32±0.08	1.30±0.08	29.4±5.4	28.5±6.4
4	9(5)	1.29±0.02	1.35±0.05	25.6±4.1	29.8±4.8
5	8(4)	1.34±0.07	1.38±0.06	32.0±7.3	29.0±3.5
6	9(5)	1.47±0.09	1.47±0.10	41.5±11.7	35.5±3.4

d) 飯沼小学校

学年	人数(女)	男子身長(m)	女子身長(m)	男子体重(kg)	女子体重(kg)
1	21(12)	1.18±0.06	1.17±0.04	23.8±6.7	21.8±4.3
2	24(13)	1.25±0.03	1.25±0.05	26.5±5.5	25.7±8.7
3	18(9)	1.30±0.06	1.31±0.05	27.9±5.0	27.8±3.1
4	20(10)	1.37±0.04	1.36±0.06	35.3±6.2	35.7±9.1
5	24(15)	1.41±0.06	1.44±0.06	33.8±6.3	40.1±12.6
6	17(5)	1.49±0.11	1.48±0.07	42.7±9.0	36.1±7.1

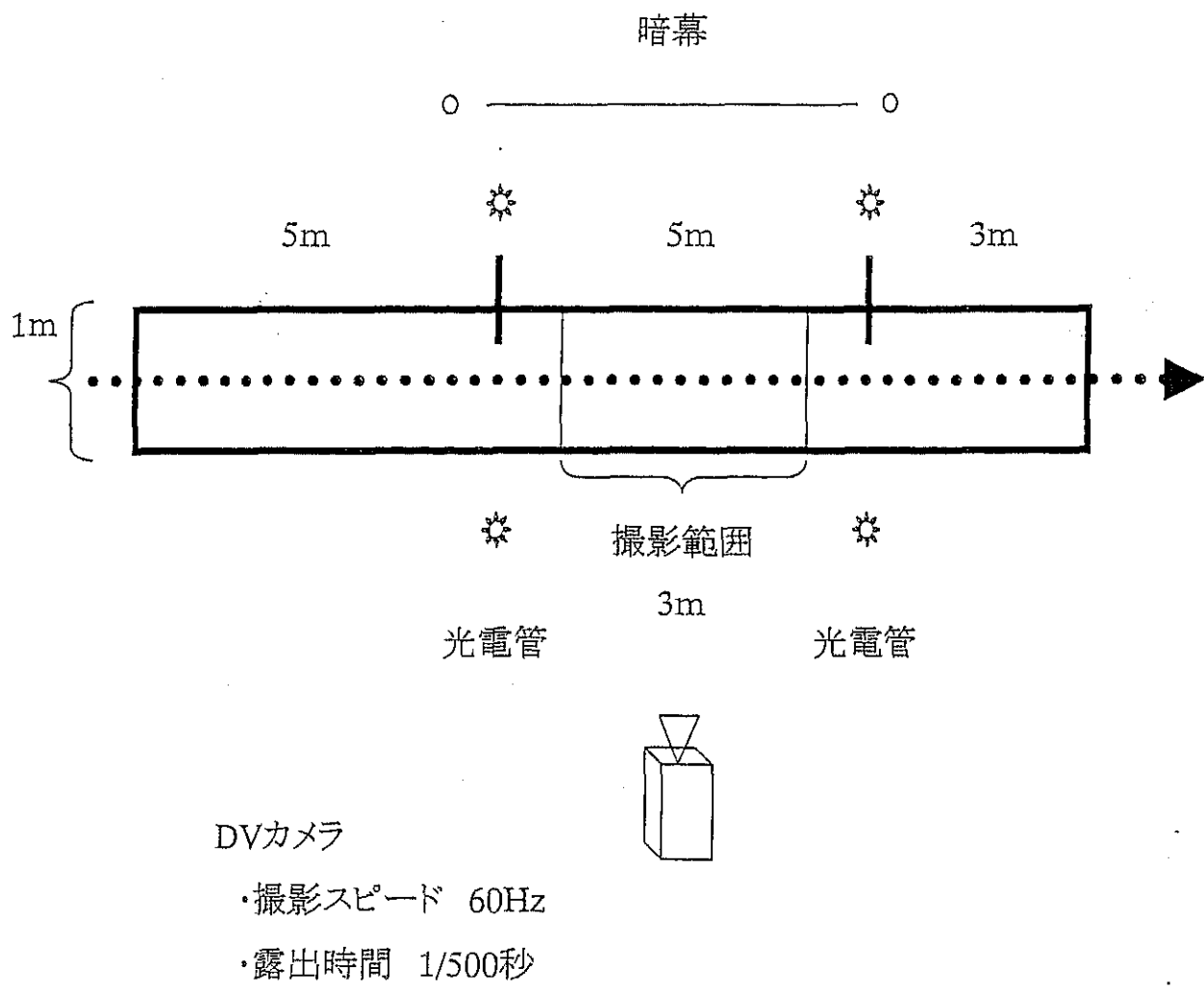
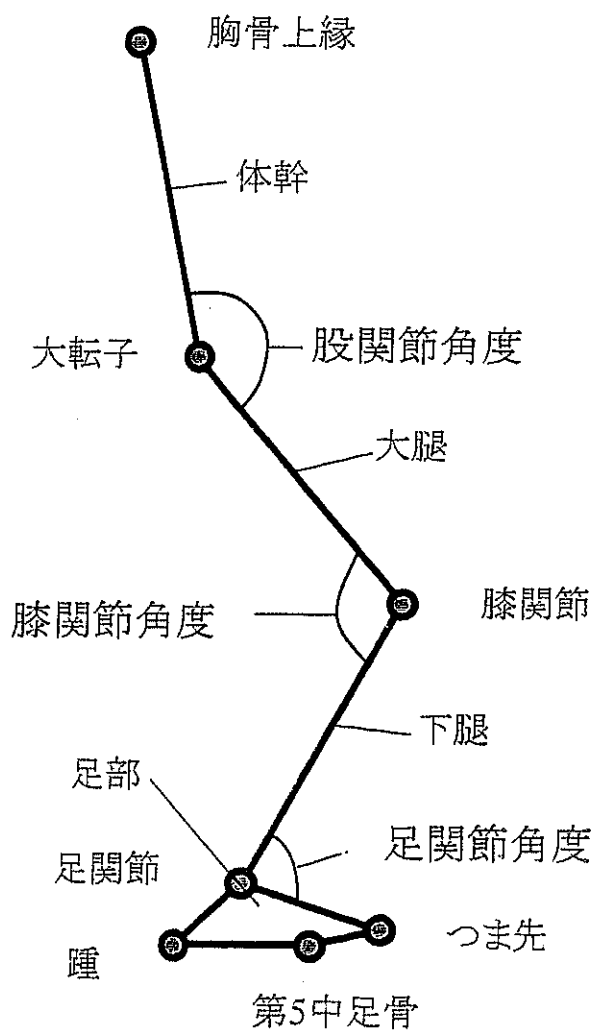


図3.1 撮影設定

表3.2 基準步行速度

学年	男子基準速度 (m/s)			女子基準速度 (m/s)		
	+SD	平均	-SD	+SD	平均	-SD
1	1.35	1.15	0.95	1.35	1.19	1.02
2	1.43	1.20	0.97	1.38	1.24	1.10
3	1.44	1.25	1.05	1.41	1.26	1.11
4	1.46	1.29	1.12	1.46	1.28	1.10
5	1.50	1.33	1.16	1.46	1.31	1.16
6	1.53	1.37	1.21	1.48	1.33	1.18

関節角度



セグメント角度

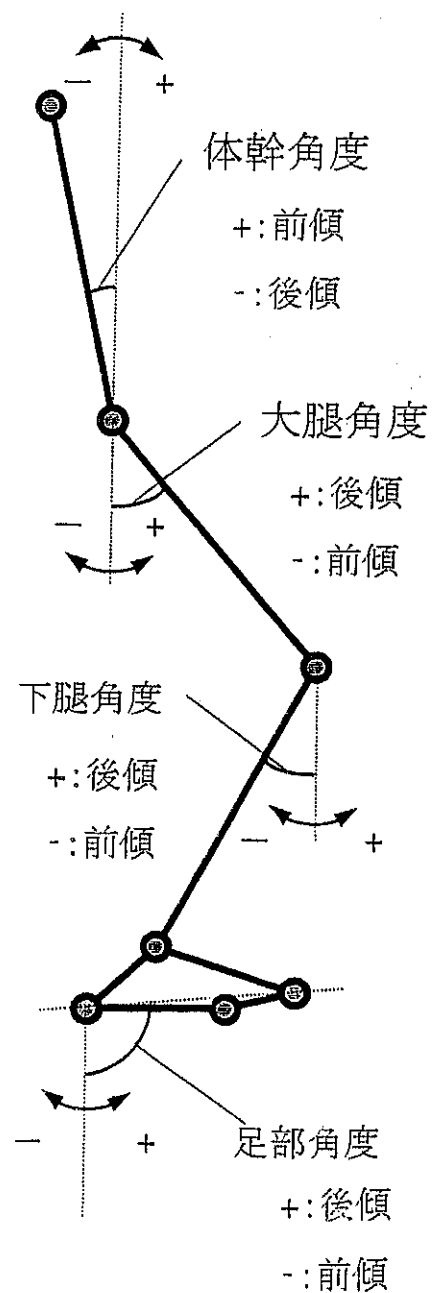


図3.2 角度定義

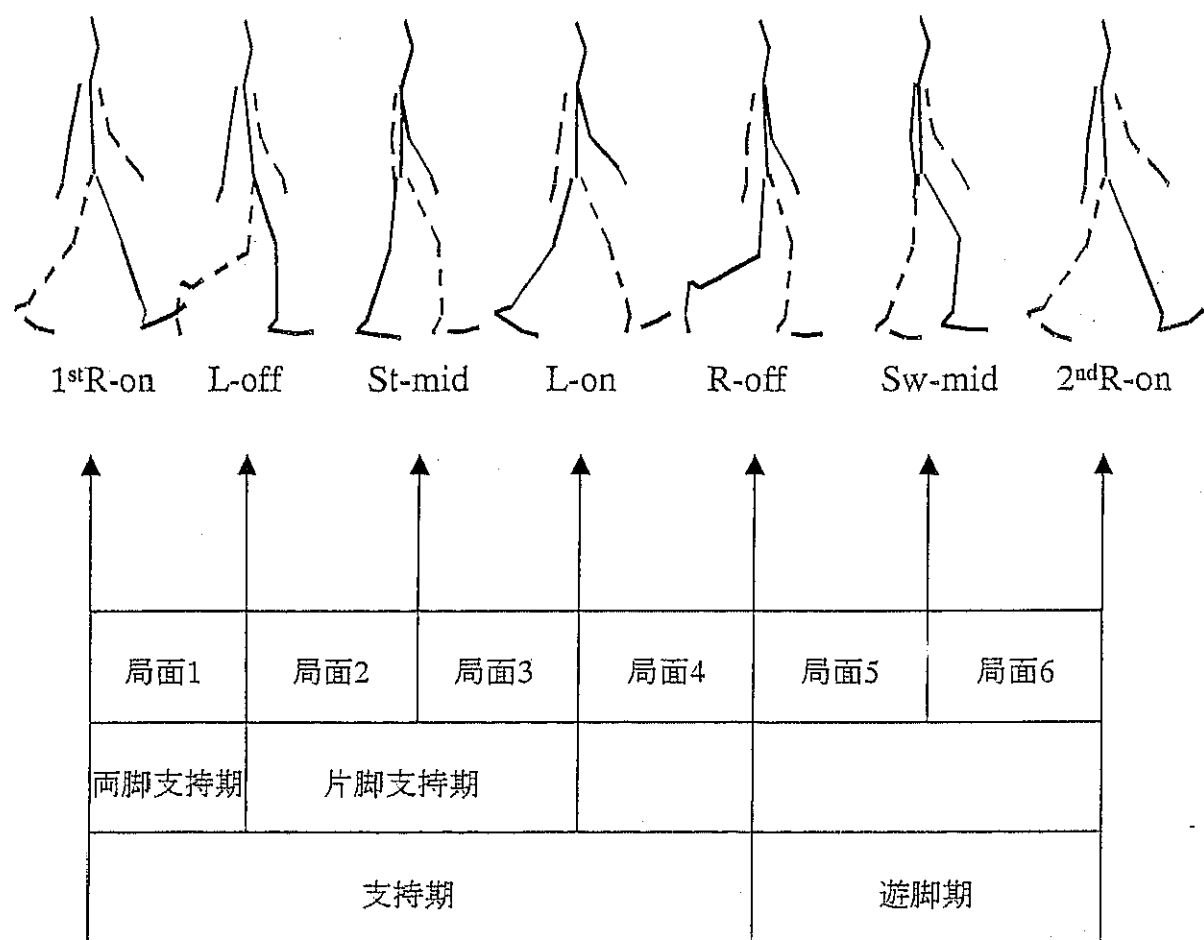
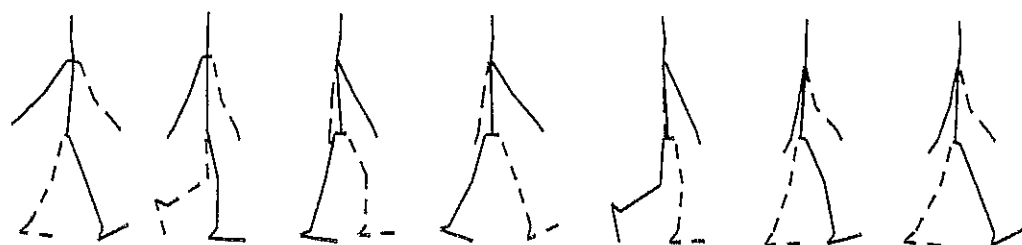


図3.3 動作区分時点および局面

男子
1年



2年



3年



4年



5年



6年



図4.1 小学生男子における歩行動作のスティックピクチャー(典型例)

女子
1年



2年



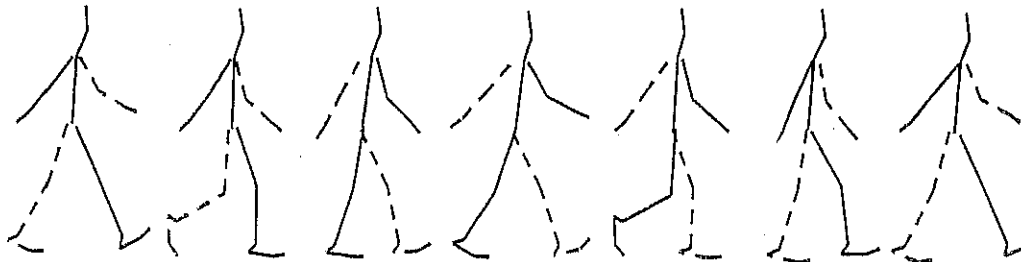
3年



4年



5年



6年

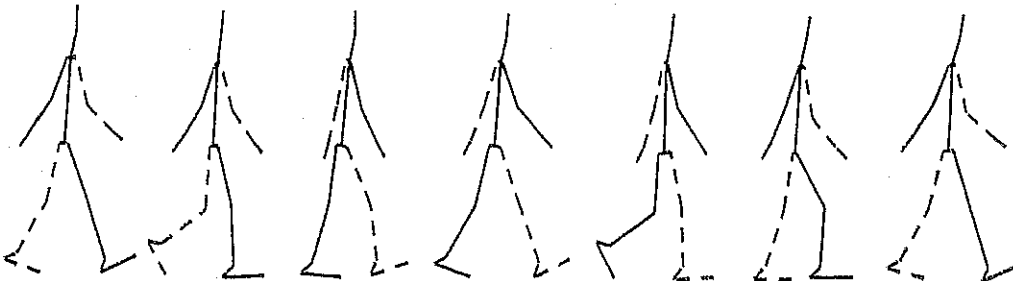


図4.2 小学生女子における歩行動作のスティックピクチャー(典型例)

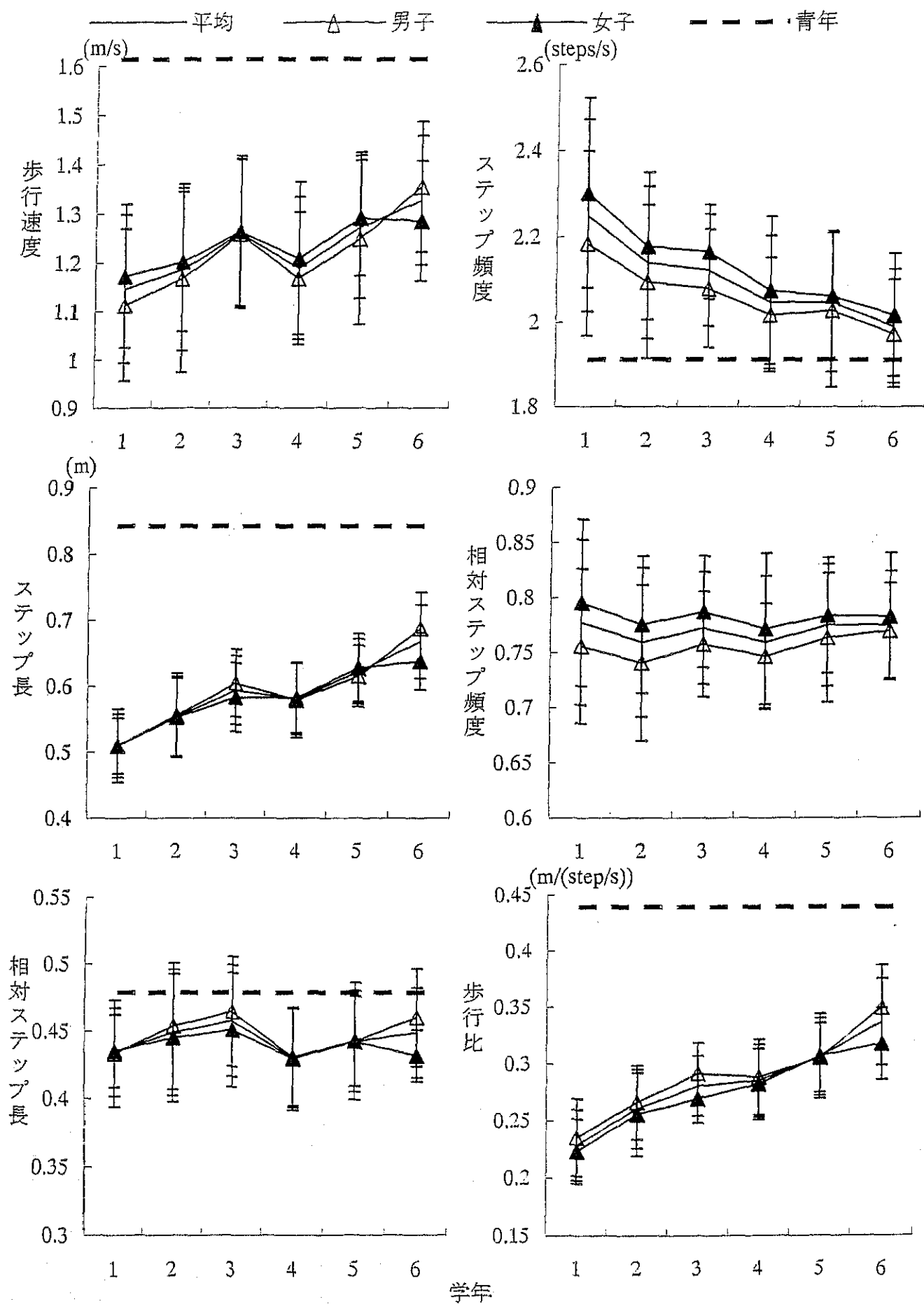


図4.3 歩行速度を規定する要因の平均値および標準偏差

*有意差は表4.1参照

表4.1 歩行速度を規定する要因の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						
歩行速度	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1			*		*	*
		2			*		*	*
		3	*	*		*		
		4			*		*	*
		5	*	*		*		
6	*	*		*				
ステップ長	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1		*	*	*	*	*
		2	*		*	*	*	*
		3	*	*		*	*	*
		4	*	*		*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*		
相対ステップ長 (ステップ長/身長)	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1			*			
		2				*		
		3	*			*		
		4		*	*			
		5						
6								
ステップ頻度	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1		*	*	*	*	*
		2	*			*	*	*
		3	*	*		*	*	*
		4	*	*	*	*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*		
相対ステップ頻度 (ステップ頻度/(身長/重力加速度) ^{1/2})	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1						
		2						
		3						
		4						
		5						
6								
歩行比	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6
		1		*	*	*	*	*
		2	*		*	*	*	*
		3	*	*		*	*	*
		4	*	*		*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*		

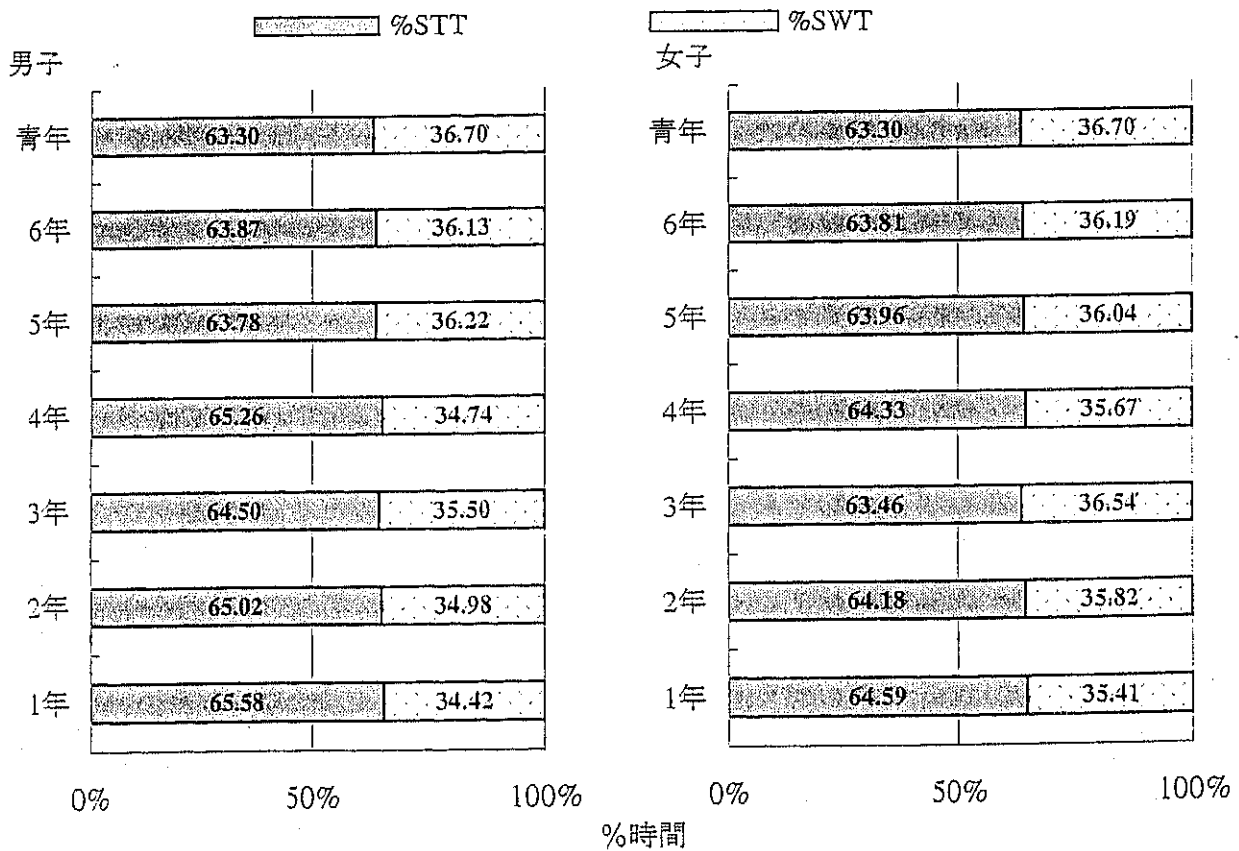
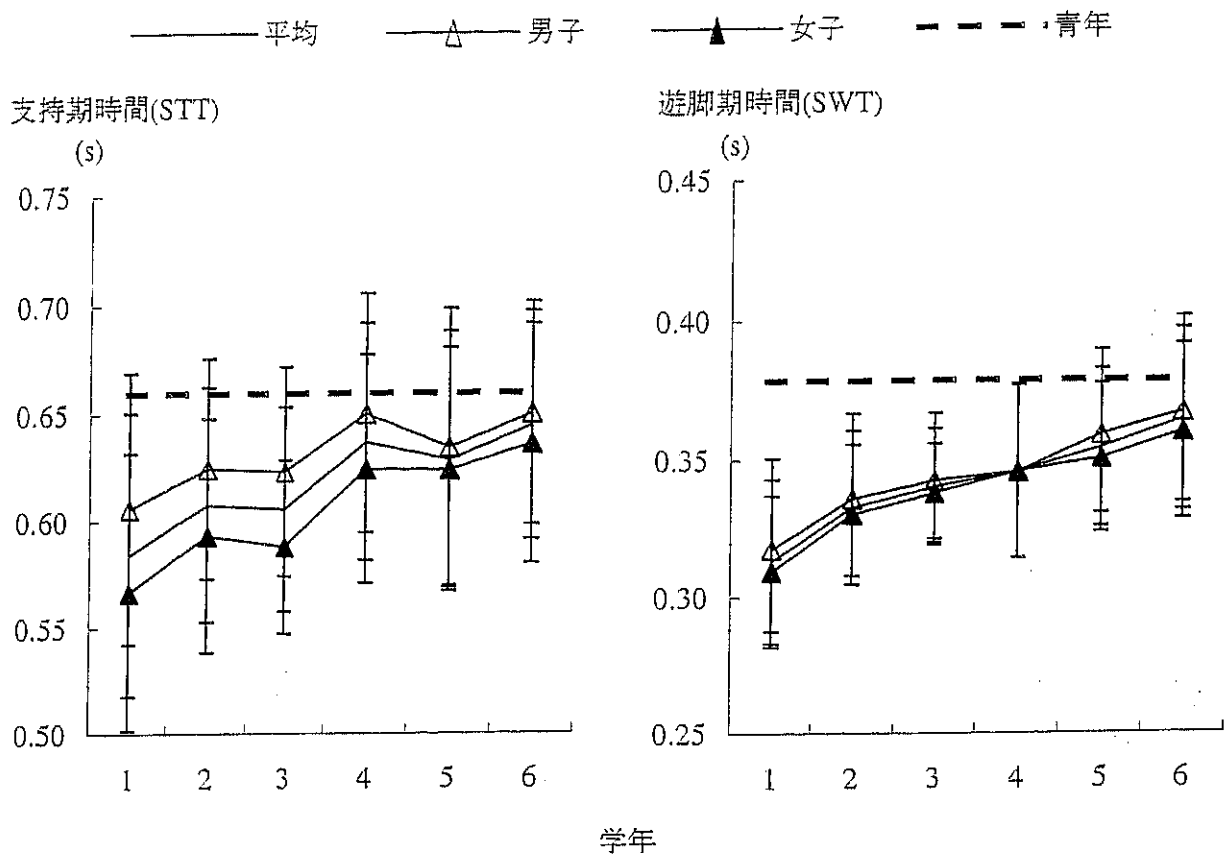


図4.4 支持期時間および遊脚期時間の平均値, 標準偏差および割合
* 有意差は表4.2参照

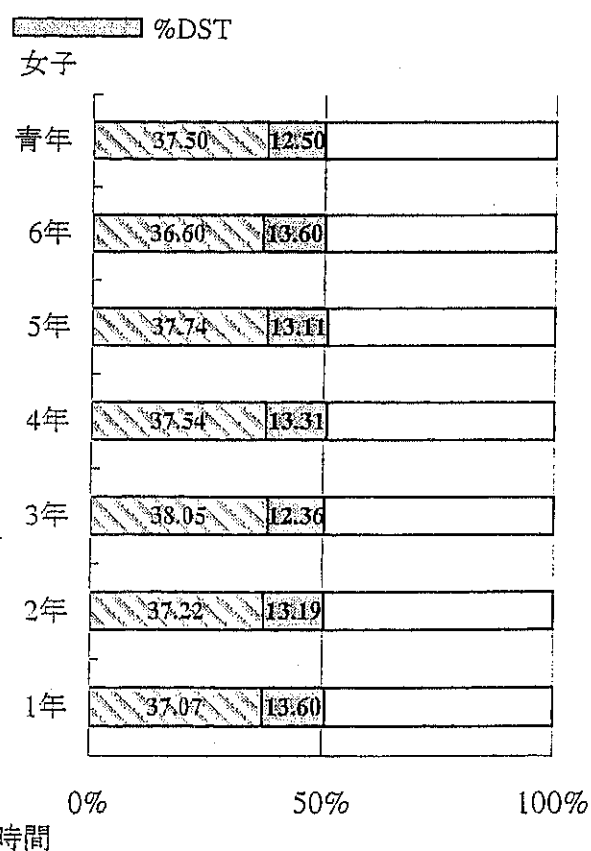
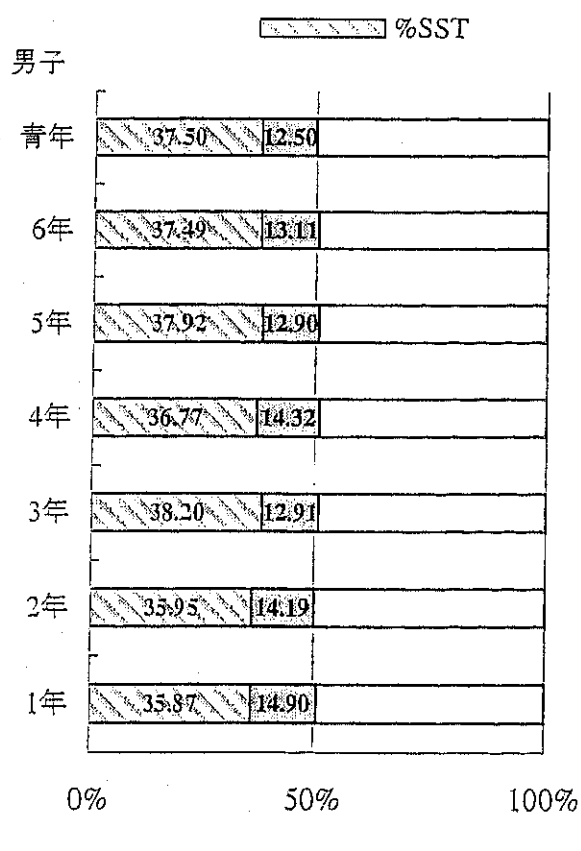
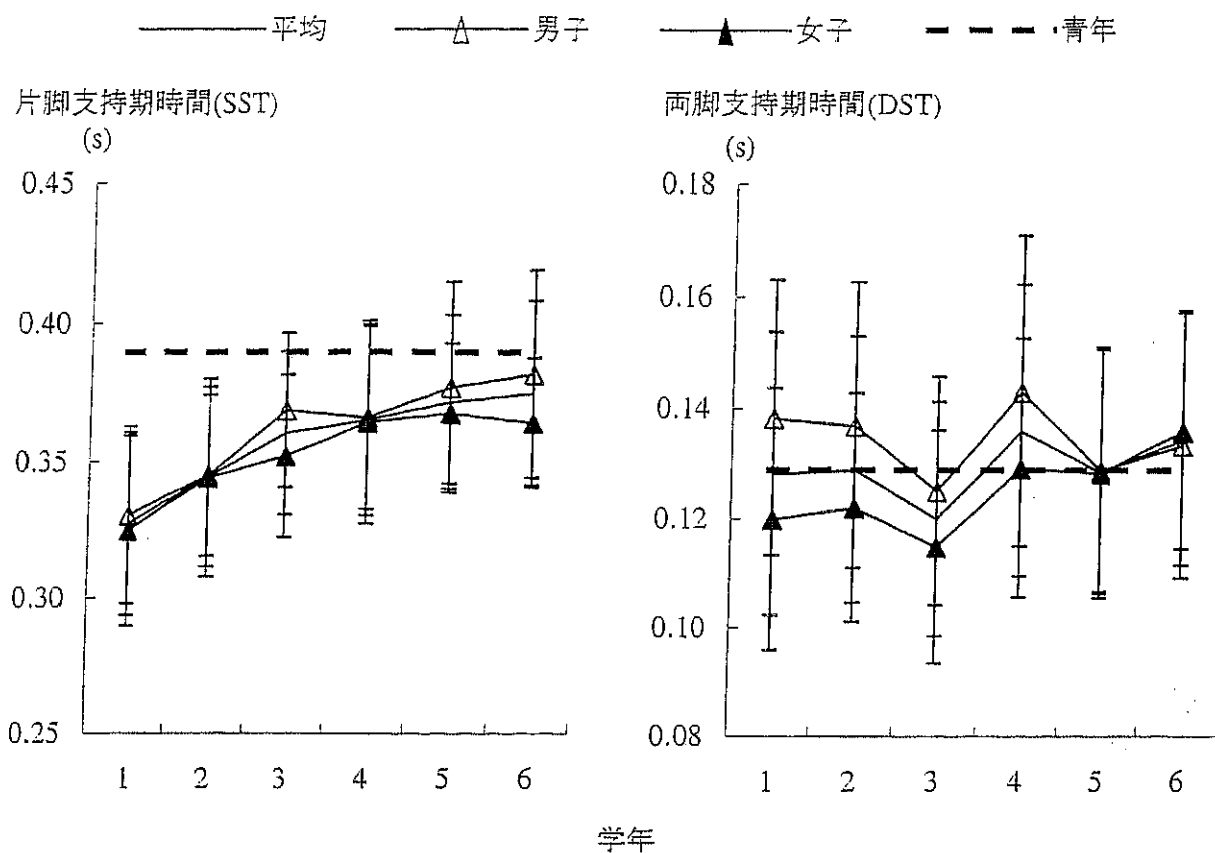


図4.5 片脚支持期時間および両脚支持期時間の平均値, 標準偏差および割合

*有意差は表4.2参照

表4.2 時間的要因の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						パラメーター	項目	有意差一覧									
支持期時間 (STT)	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6	片脚支持期 時間 (SST)	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6		
		1					*	*			*	1					*	*	*
		2					*				*	2	*			*	*	*	*
		3	*				*				*	3	*	*					
		4	*	*	*						4	*	*						
		5	*								5	*	*						
6	*	*	*				6	*	*										
遊脚期時間 (SWT)	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6	両脚支持期 時間 (DST)	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6		
		1				*	*	*			*	1							
		2	*				*	*			2								
		3	*				*	*			3								
		4	*					*			4	*							
		5	*	*	*						5	*							
6	*	*	*	*			6	*											
%STT	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6	%SST	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6		
		1				*	*	*			1				*		*		
		2									2			*		*			
		3	*								3	*	*						
		4				*	*				4								
		5	*			*					5	*	*						
6	*			*			6	*											
%SWT	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6	%DST	交互 学年 男女	学年	1	2	3	4	5	6		
		1				*	*	*			1				*		*		
		2									2			*		*			
		3	*								3	*	*		*				
		4				*	*				4			*					
		5	*			*					5	*							
6	*			*			6	*											

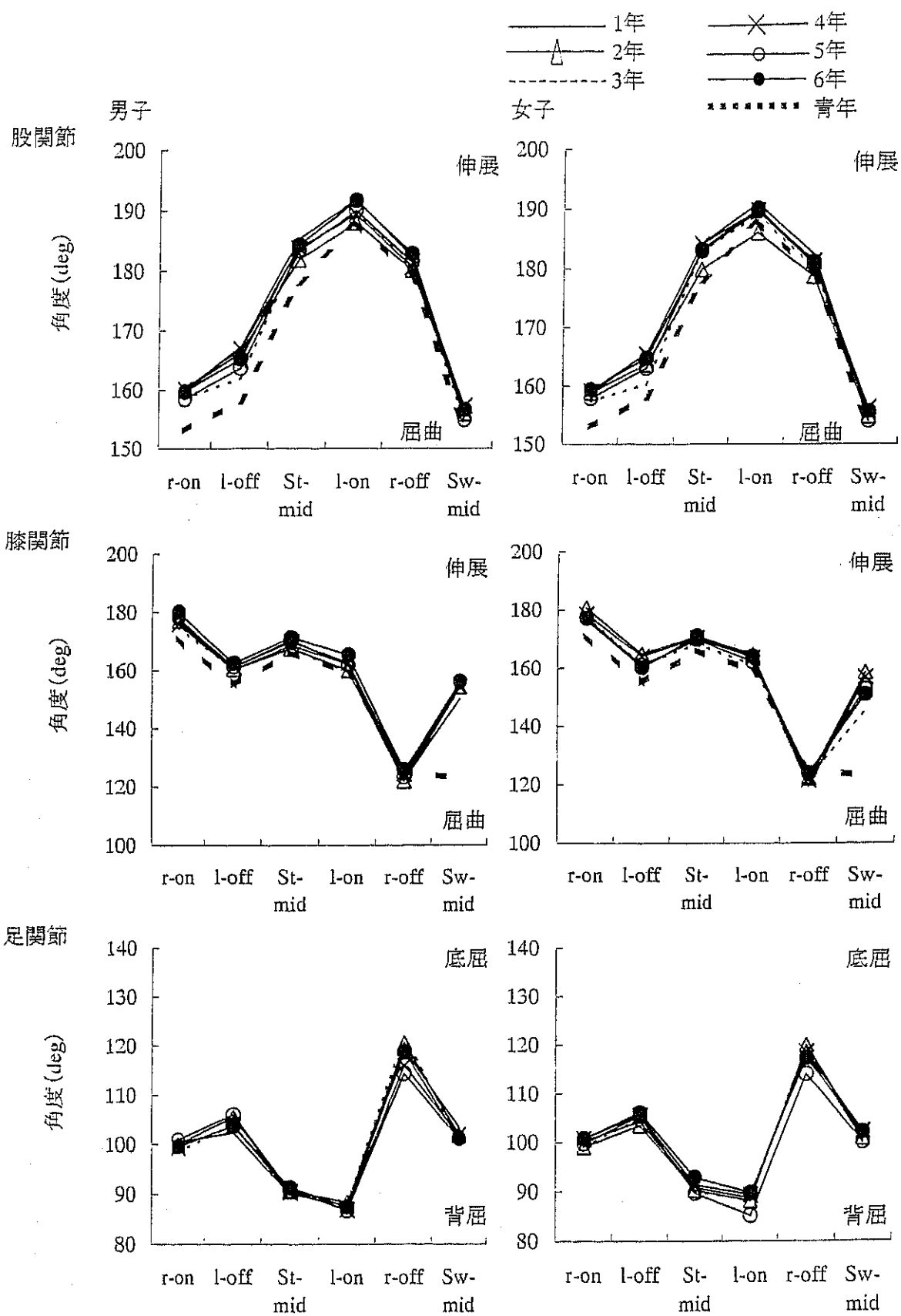


図4.6 動作区分時における下肢関節角度

*有意差は表4.3および4.4参照

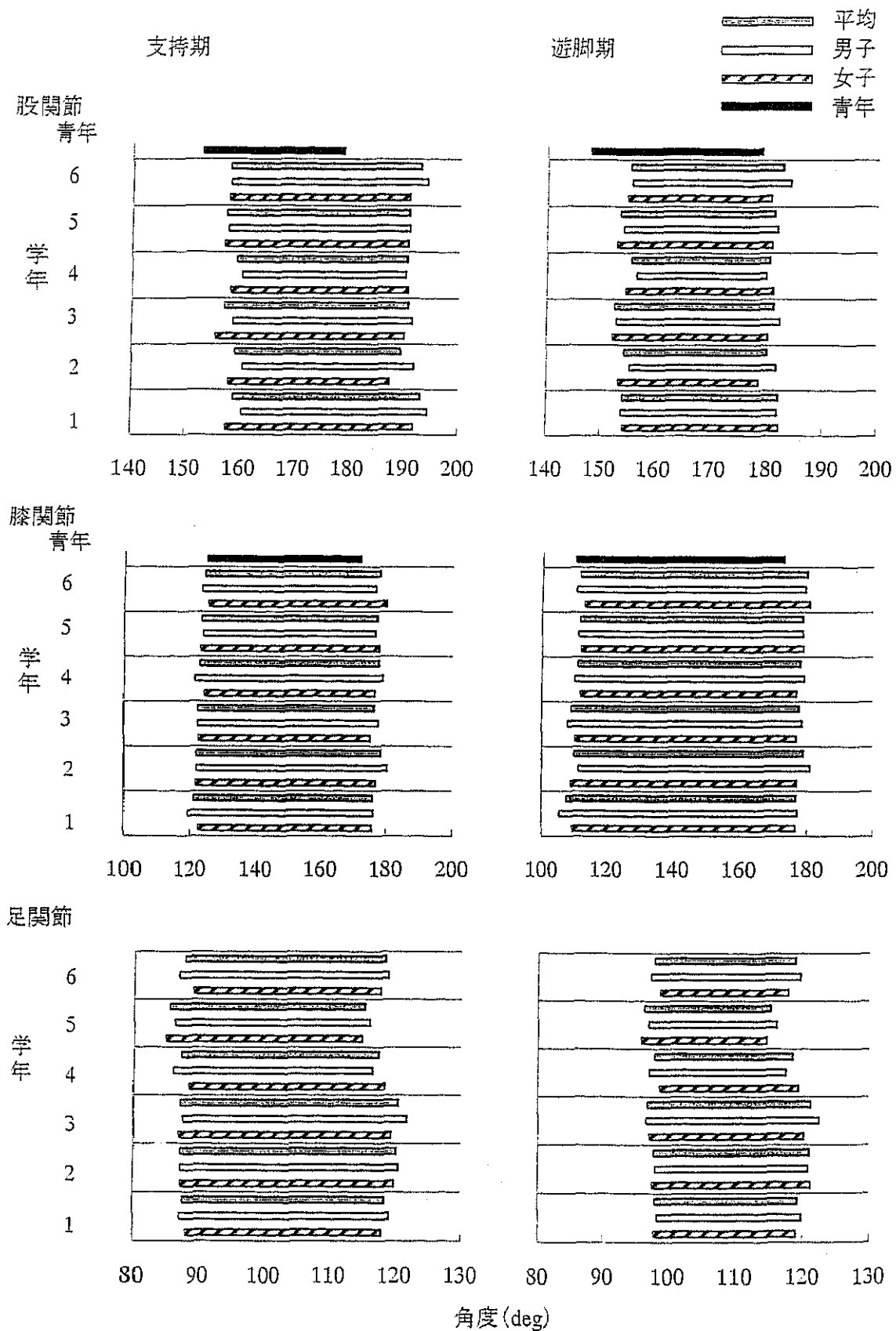


図4.7 下肢関節角度の動作範囲

*有意差は4.5および4.6参照

表4.3 動作区分時点における股関節角度および膝関節角度の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						パラメーター	項目	有意差一覧(○は女子を示す)								
股関節角度		学年	1	2	3	4	5	6	膝関節角度		学年	1①	2②	3③	4④	5⑤	6⑥	
R-on	交互 学年 男女	1							R-on	交互 男子 女子	1		*					*
		2									①	*		*			*	
		3									2	*	*	*	*	*	*	
		4									②	*		*			*	
		5									3			*				
		6									③	*		*	*	*	*	
L-off	交互 学年 男女	1							L-off	交互 学年 男女	1							
		2									2							
		3									3							
		4									4							
		5									5							
		6									6							
St-mid	交互 学年 男女	1							St-mid	交互 学年 男女	1							
		2									2							
		3									3							
		4									4							
		5									5							
		6									6							
L-on	交互 学年 男女	1							L-on	交互 学年 男女	1							
		2		*				*			2							
		3			*			*			3	*		*			*	
		4		*							4	*		*			*	
		5									5						*	
		6			*						6		*	*	*	*		
R-off	交互 学年 男女	1							R-off	交互 学年 男女	1							
		2									2							
		3									3							
		4									4							
		5									5							
		6									6							
Sw-mid	交互 学年 男女	1							Sw-mid	交互 学年 男女	1							
		2									2							
		3									3							
		4									4							
		5									5							
		6									6							

表4.4 動作区分時点における足関節角度の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						
足関節角度		学年	1	2	3	4	5	6
R-on	交互 学年 男女	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
		6						
L-off	交互 学年 男女	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
		6						
St-mid	交互 学年 男女	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
		6						
L-on	交互 学年 男女	1					*	
		2					*	
		3					*	
		4					*	
		5	*	*	*	*		*
		6					*	
R-off	交互 学年 男女	1					*	
		2					*	
		3				*	*	
		4			*		*	
		5	*	*	*	*		*
		6					*	
Sw-mid	交互 学年 男女	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
		6						

表4.5 支持期および遊脚期における股関節角度および膝関節角度の最大値, 最小値, 動作範囲の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧							パラメーター	項目	有意差一覧(○は女子を示す)											
股関節角度		学年	1	2	3	4	5	6	膝関節角度		学年	1①	2②	3③	4④	5⑤	6⑥					
支持期	交互 学年 男女	1							支持期	交互 男子 女子	1		*		*			*				
		2									①		*		*			*				
		3									2	*	*	*	*	*	*	*				
		4									②		*		*		*	*				
		5									3			*		*		*				
		6									③		*	*	*		*	*				
最大値	交互 学年 男女	1							最大値	男子 女子	1		*		*			*				
		2									①		*		*		*	*				
		3									2	*	*	*	*	*	*	*				
		4									②		*		*		*	*				
		5									3			*		*		*				
		6									③		*	*	*		*	*				
最小値	交互 学年 男女	1							最小値	交互 学年 男女	1											
		2									2											
		3									3											
		4									4											
		5									5											
		6									6											
動作範囲	交互 学年 男女	1		*		*		*	動作範囲	交互 学年 男女	1											
		2	*		*			*			2											
		3		*				*			3											
		4	*					*			4											
		5						*			5											
		6		*		*		*			6											
遊脚期	交互 学年 男女	1							遊脚期	交互 学年 男女	1											
		2									2											
		3									3											
		4									4											
		5									5											
		6									6											
最大値	交互 学年 男女	1							最大値	交互 学年 男女	1											
		2									2											
		3									3											
		4									4											
		5									5											
		6									6											
最小値	交互 学年 男女	1							最小値	交互 学年 男女	1						*	*	*			
		2									2											
		3									3	*										
		4									4	*										
		5									5	*										
		6									6	*										
動作範囲	交互 学年 男女	1							動作範囲	交互 学年 男女	1											
		2									2											
		3									3											
		4									4											
		5									5											
		6									6											

表4.6 支持期および遊脚期における足関節角度の最大値, 最小値, 動作範囲の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧							
足関節角度		学年	1	2	3	4	5	6	
支持期	最大値	交互	1					*	
		学年	2					*	
		男女	3				*	*	
		交互	4			*			
		学年	5	*	*	*			
		男女	6						
<hr/>									
最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6	
		1							
		2							
		3							
		4							
		5							
<hr/>									
動作範囲	交互	学年	1	2	3	4	5	6	
		1							
		2				*	*		
		3			*	*	*	*	
		4		*	*				
		5		*	*				
<hr/>									
遊脚期	最大値	学年	1	2	3	4	5	6	
		1					*		
		2					*		
		3					*		
		4					*		
		5	*	*	*	*		*	
<hr/>									
最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6	
		1				*	*	*	
		2							
		3							
		4	*						
		5	*						
<hr/>									
動作範囲	交互	学年	1	2	3	4	5	6	
		1			*				
		2					*	*	
		3	*		*	*	*	*	
		4		*	*				
		5		*	*				
<hr/>									

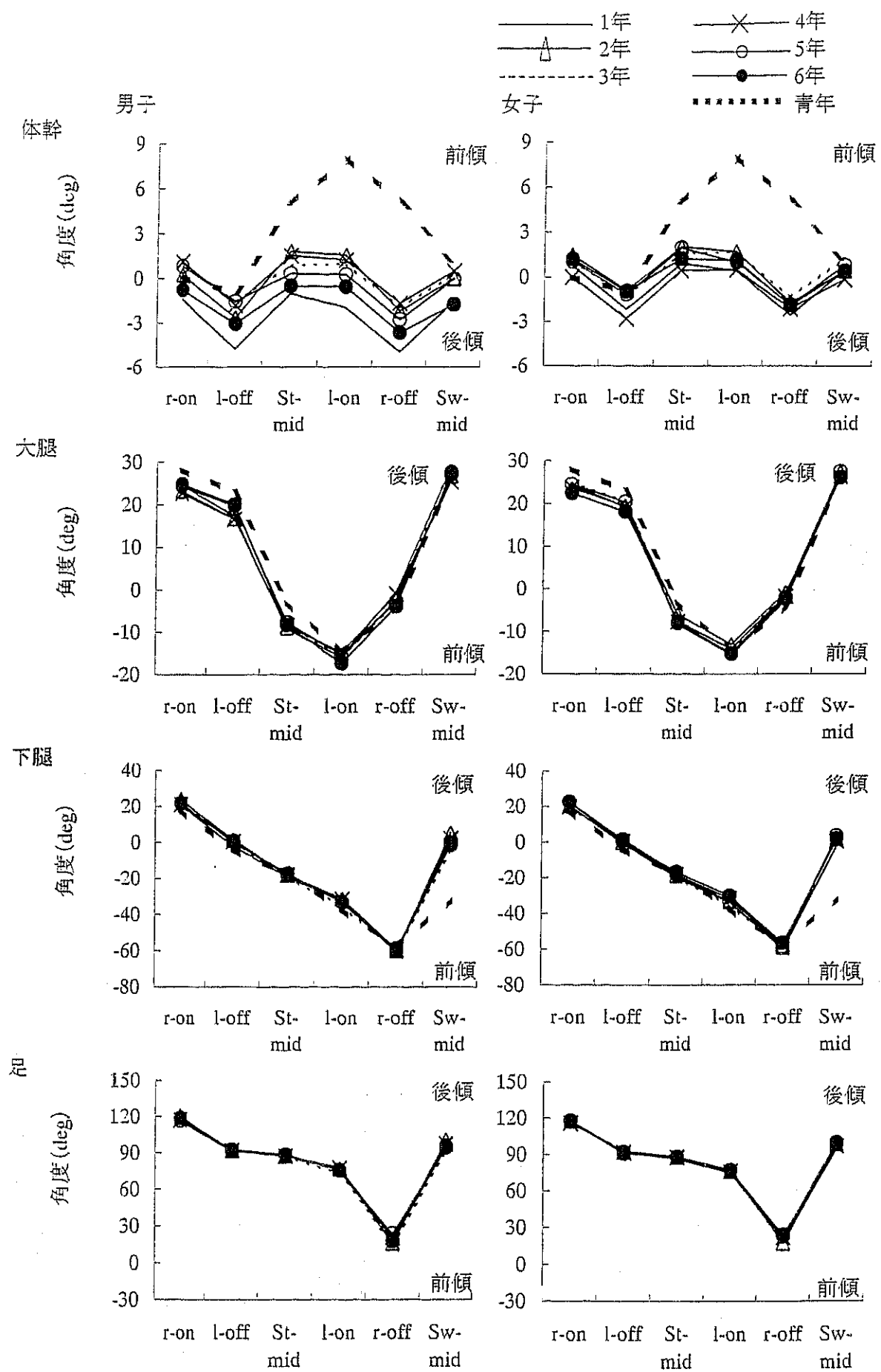


図4.8 動作区分時における体幹および下肢部分角度

* 有意差は表4.7および4.8参照

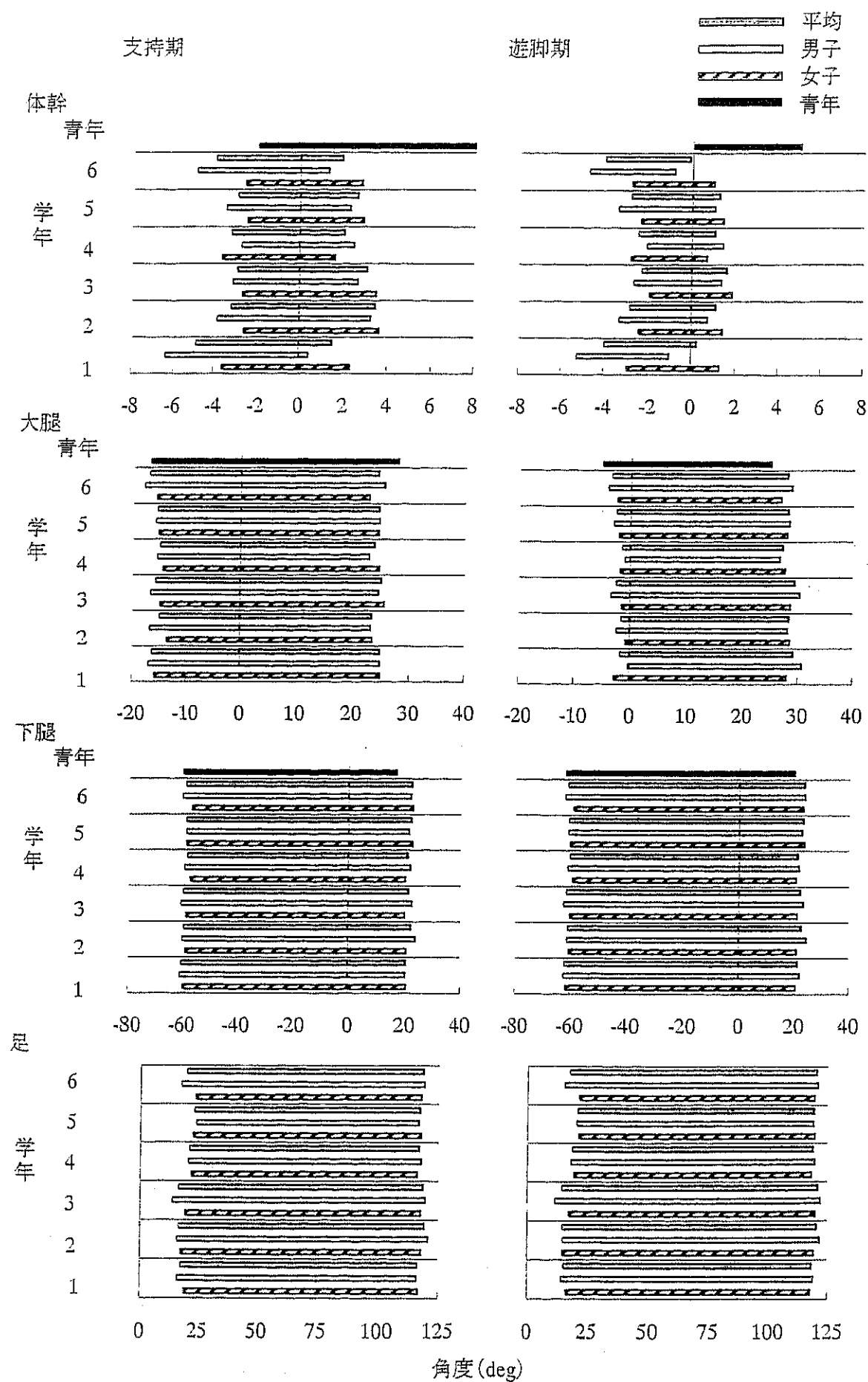


図4.9 体幹および下肢部分角度の動作範囲

*有意差は表4.9および4.10参照

表4.7 動作区分時点における体幹角度および大腿角度の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						パラメーター	項目	有意差一覧							
体幹角度		学年	1	2	3	4	5	6	大腿角度		学年	1	2	3	4	5	6
R-on	交互 学年 男女	1							R-on	交互 学年 男女	1						
		2									2						
		3									3						
		4									4						
		5									5						
		6									6						
L-off	交互 学年 男女 *	1							L-off	交互 学年 男女	1						
		2									2						
		3									3						
		4									4						
		5									5						
		6									6						
St-mid	交互 学年 男女	1							St-mid	交互 学年 男女 *	1						
		2									2						
		3									3						
		4									4						
		5									5						
		6									6						
L-on	交互 学年 男女 *	1							L-on	交互 学年 男女 *	1						
		2		*							2						
		3		*							3						
		4		*							4						
		5									5						
		6									6						
R-off	交互 学年 男女 *	1							R-off	交互 学年 男女	1						
		2									2						
		3									3						
		4									4						
		5									5						
		6									6						
Sw-mid	交互 学年 男女 *	1							Sw-mid	交互 学年 男女	1						
		2									2						
		3									3						
		4									4						
		5									5						
		6									6						

表4.8 動作区分時点における下腿角度および足角度の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧(○は女子を示す)						パラメーター	項目	有意差一覧							
下腿角度		学年	1①	2②	3③	4④	5⑤	6⑥	足角度		学年	1	2	3	4	5	6
R-on	交互	1		*					R-on	交互	1						
	男子	①		*	*			*		2							
	女子	2	*	*	*	*	*	*		3							
		②		*	*			*		4							
		3		*	*	*	*			5							
		③		*	*			*		6							
		4		*	*			*									
		④		*	*			*									
L-off	交互	5		*					L-off	交互	1						
	学年	⑤		*	*	*	*			2							
	男女	6	*	*	*	*	*			3							
										4							
										5							
										6							
St-mid	交互	1							St-mid	交互	1						
	学年	2		*				*		2							
	男女	3	*	*	*	*	*	*		3							
		4	*	*	*	*	*	*		4							
		5	*	*	*	*	*	*		5							
		6	*	*	*	*	*	*		6							
L-on	交互	1							L-on	交互	1						
	学年	2		*				*		2							
	男女	3	*	*	*	*	*	*		3							
		4	*	*	*	*	*	*		4							
		5	*	*	*	*	*	*		5							
		6	*	*	*	*	*	*		6							
R-off	交互	1							R-off	交互	1						
	学年	2		*				*		2							
	男女	3	*	*	*	*	*	*		3							
		4	*	*	*	*	*	*		4	*	*	*	*	*	*	
		5	*	*	*	*	*	*		5	*	*	*	*	*	*	
		6	*	*	*	*	*	*		6	*	*	*	*	*	*	
Sw-mid	交互	1							Sw-mid	交互	1						
	学年	2						*		2							
	男女	3						*		3							
		4						*		4							
		5						*		5							
		6						*		6							

表4.9 支持期および遊脚期における体幹角度および大腿角度の最大値, 最小値, 動作範囲の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						パラメーター	項目	有意差一覧							
体幹角度		学年	1	2	3	4	5	6	大腿角度		学年	1	2	3	4	5	6
支持期		1						支持期		1							
	交互	2															
最大値	学年	3															
	男女	4															
		5															
		6								6							
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6
		1									1						
	交互	2	*							交互	2						
最小値	学年	3	*						最小値	学年	3						
	男女	4	*							男女	4	*					
		5	*								5						
		6									6						
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6
		1				*	*				1						
	交互	2			*	*	*	*			2						
動作範囲	学年	3	*		*	*	*	*		動作範囲	学年	3					
	男女	4	*	*	*						男女	4					
		5	*	*							5						
		6		*							6						
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6
遊脚期		1						遊脚期		1							
	交互	2															
最大値	学年	3															
	男女	4															
		5															
		6								6							
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6
		1									1						
	交互	2								交互	2						
最小値	学年	3							最小値	学年	3						
	男女	4	*							男女	4						
		5									5						
		6									6						
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6
		1								1							
	交互	2															
動作範囲	学年	3															
	男女	4															
		5															
		6								6							

表4.10 支持期および遊脚期における下腿角度および足角度の最大値、最小値、動作範囲の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧(○は女子を示す)						パラメーター	項目	有意差一覧								
下腿角度		学年	1①	2②	3③	4④	5⑤	6⑥	足角度		学年	1	2	3	4	5	6	
支持期	最大値	交互 *	1	*			*	*	支持期	最大値	交互	1						
		男子	①	*			*				2							
		女子 *	2	*	*	*	*	*			3							
			②	*			*				4							
			3			*	*				5							
			③	*	*		*	*			6							
			4															
			④	*	*		*	*										
			5	*				*										
			⑤	*	*	*	*											
			6															
			⑥	*		*	*											
最小値	最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6	最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6
		学年 *	1					*	*		*	交互	2			*	*	
		男女 *	2								3				*	*		
			3								4		*	*	*			
			4	*							5		*	*	*			
			5	*							6							
動作範囲	動作範囲	交互	学年	1	2	3	4	5	6	動作範囲	交互		学年	1	2	3	4	5
		学年 *	1								2			*	*	*		
		男女 *	2								3			*	*			
			3								4	*	*	*				
			4								5	*	*	*				
			5								6		*					
遊脚期	最大値	交互	学年	1	2	3	4	5	6	遊脚期	交互	学年	1	2	3	4	5	6
		学年 *	1					*	*		2			*	*	*		
		男女 *	2								3			*	*			
			3					*	*		4			*	*			
			4								5	*	*	*				
			5	*			*				6		*					
最小値	最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6	最小値	交互	学年	1	2	3	4	5	6
		学年 *	1								2			*	*			
		男女 *	2								3			*	*			
			3								4	*	*	*				
			4								5	*	*	*				
			5								6							
動作範囲	動作範囲	交互	学年	1	2	3	4	5	6	動作範囲	交互	学年	1	2	3	4	5	6
		学年 *	1								2			*	*			
		男女 *	2								3			*	*			
			3								4	*	*	*				
			4								5	*	*	*				
			5								6			*				

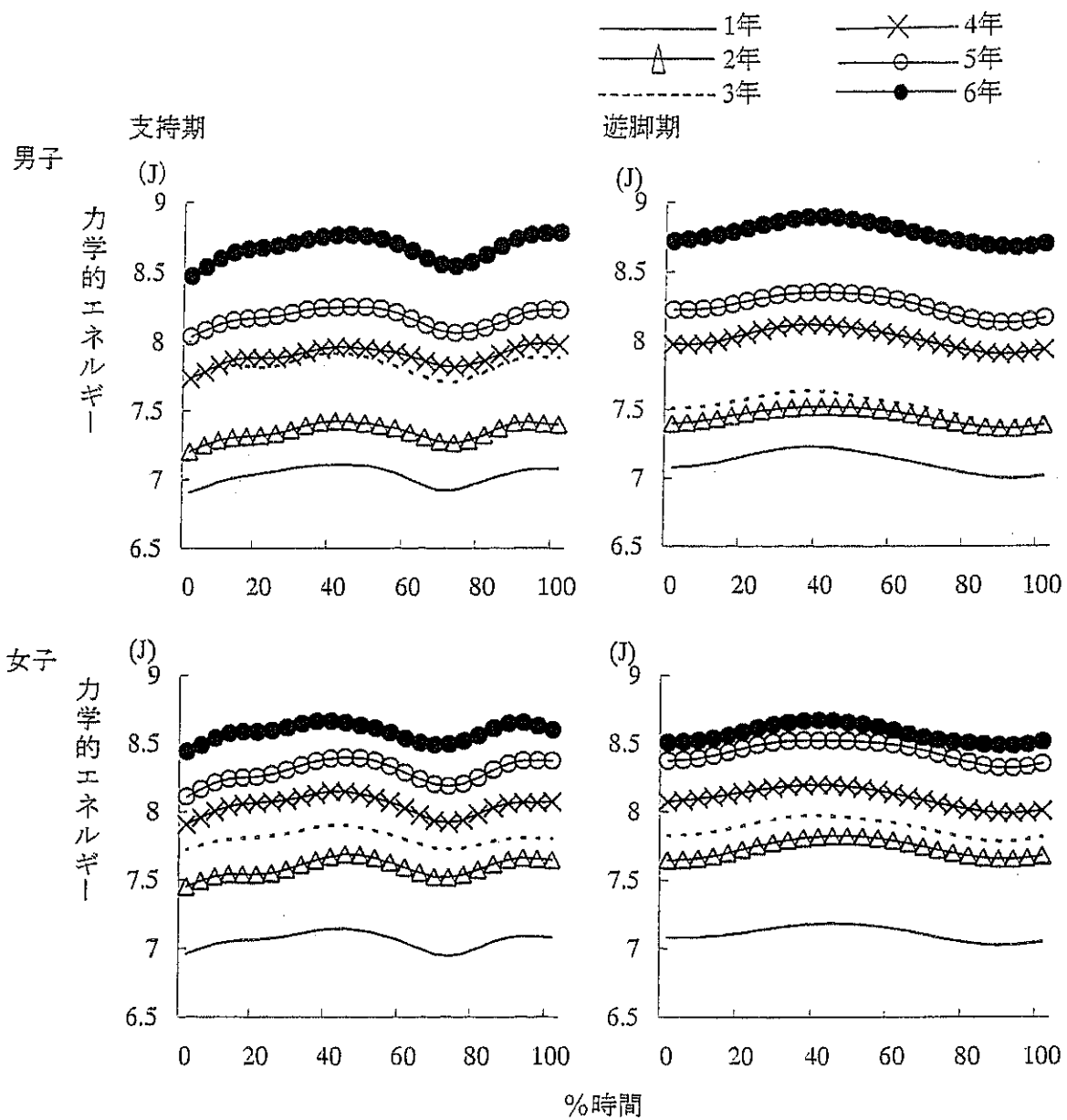


図4.10 支持期および遊脚期の力学的エネルギー変化パターン

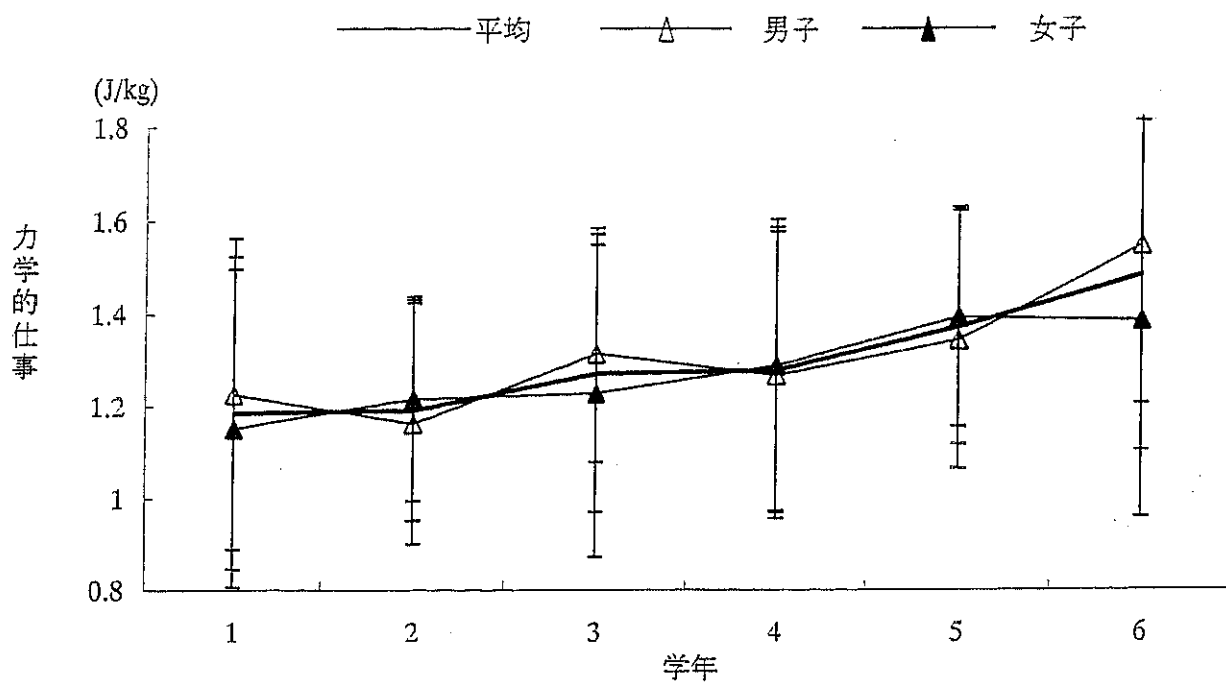


図4.11 力学的仕事の平均値と標準偏差

*有意差は表4.11参照

表4.11 仕事の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						
		学年	1	2	3	4	5	6
仕事	交互	1					*	*
	学年	* 2					*	*
	男女	3						*
		4						*
		5	*	*				*
		6	*	*	*	*	*	

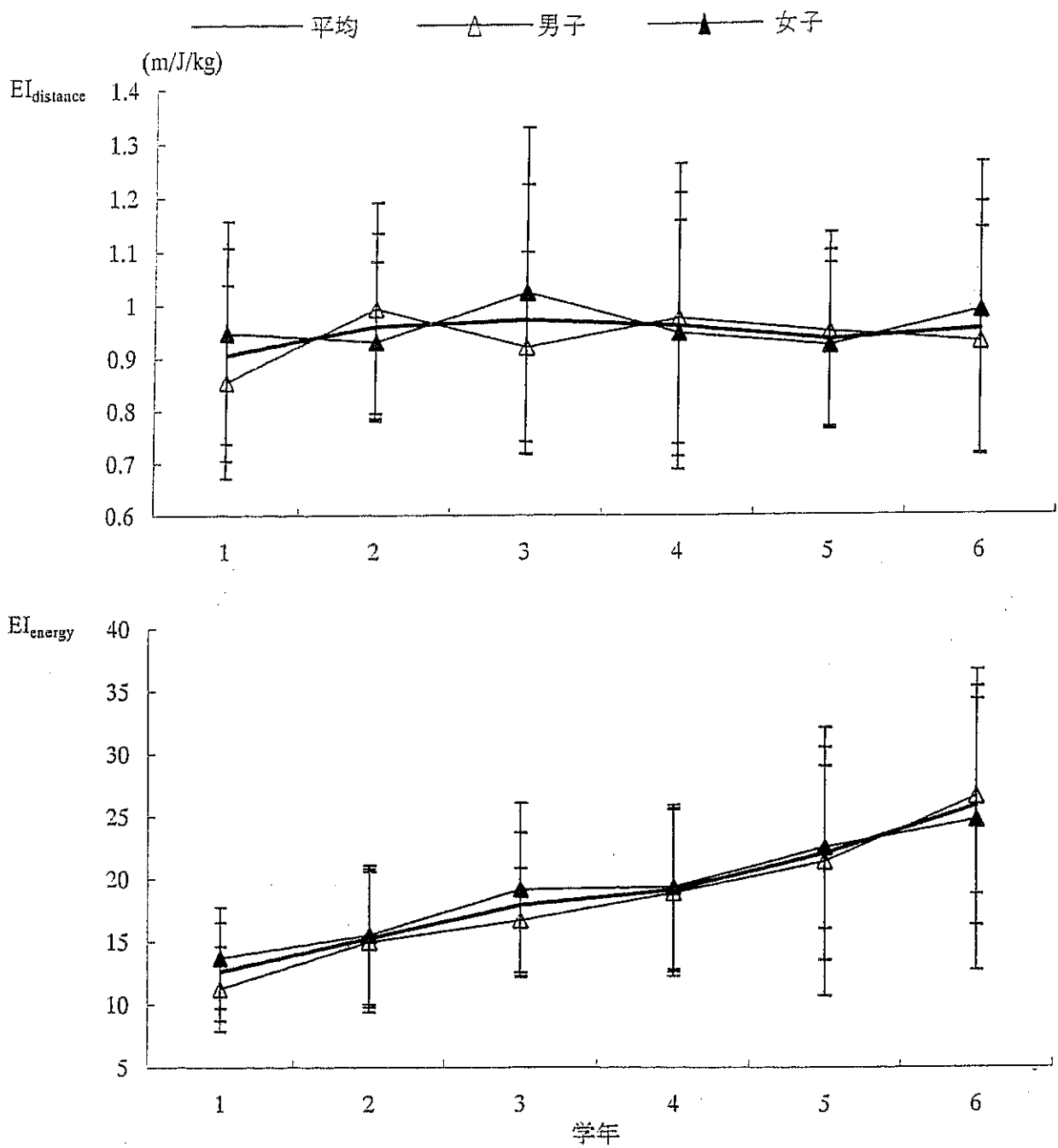


図4.12 $EI_{distance}$ および EI_{energy} の平均値と標準偏差

*有意差は表4.12参照

表4.12 $EI_{distance}$ および EI_{energy} の有意差

パラメーター	項目	有意差一覧						パラメーター	項目	有意差一覧														
		学年	1	2	3	4	5	6			学年	1	2	3	4	5	6							
EI _{distance}	交互	1							EI _{energy}	交互	1													
	学年	2																			*	*	*	*
	男女	3																				*	*	
		4																					*	
		5																				*		
		6																				*		

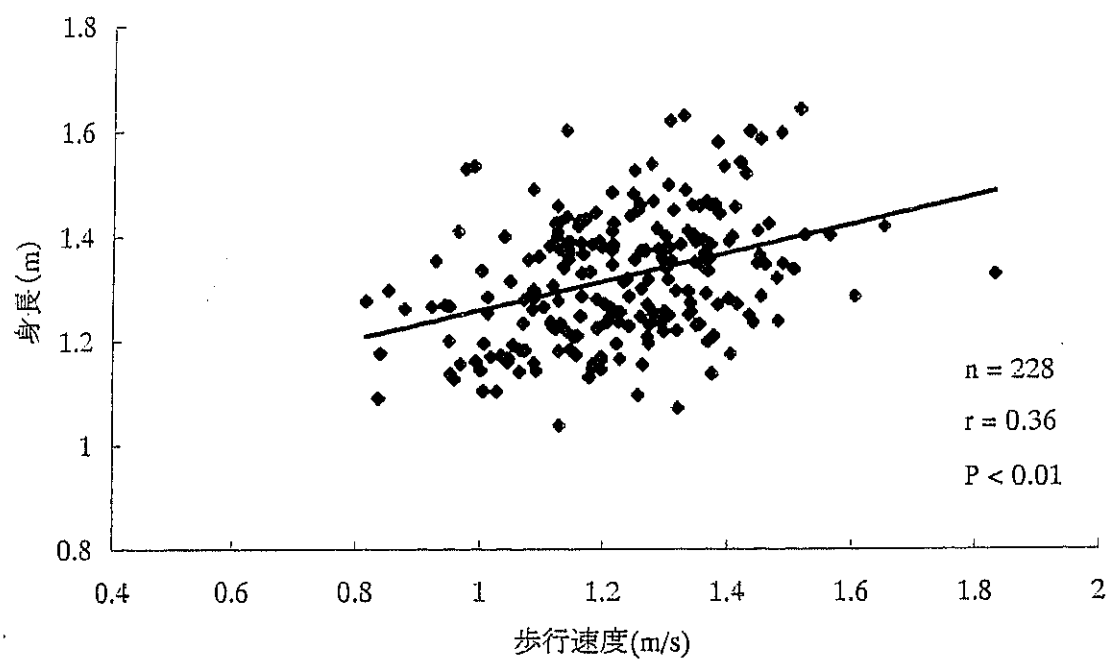


図5.1 歩行速度と身長

2. 小学生の歩行動作のバイオメカニクスのデータベース（資料）

データベースに関する説明 2 ページ

資料（図表） 2-1～2-94

1. データベースについて

このデータベースでは、以下の項目について歩行1サイクル時間で規格化し、学年別、男女別の平均変化パターンを示す。

- 1 歩行速度を規定する要因（歩行速度，ステップ長，ステップ頻度）
- 2 平均歩行動作パターン（スティックピクチャー）
- 3 身体重心の鉛直変位パターン
- 4 関節角度変化パターン
- 5 身体部分角度変化パターン
- 6 関節角速度変化パターン
- 7 身体部分角速度変化パターン
- 8 回復脚関節トルク変化パターン
- 9 回復脚関節トルクパワー変化パターン

2. データ収集および処理

これらのデータの収集法および処理法は研究成果Ⅰで述べたものと同様であるが、ここでは、Ⅰにはない回復脚の関節トルクおよびトルクパワーの算出、平均動作モデルの作成法について補足する。

①回復脚の関節トルクおよびトルクパワーの算出法

回復脚の足，下腿，大腿について剛体リンクモデルを当てはめて運動方程式を立て、通常の逆動力学的手法により、関節トルクを推定した。各部の身体部分慣性係数は横井ら(1986)のものをを用いた。そして、関節トルクパワー（Pt）は関節トルク（JT）と関節角速度（JAV）の内積として以下の式により算出した。

$$Pt = JT \cdot JAV$$

なお、本資料では関節トルクの正により関節の伸展を、負により屈曲を表した。また、関節トルクパワーの正は関節まわりの筋群がコンセントリックな活動によって、負の場合はエキセントリックな活動によってパワーを発揮していることを意味する。

②平均動作モデルの作成法

阿江らが開発した方法（下記文献参照）により小学生の平均歩行動作パターンを作成した。すなわち、歩行1サイクル時間で規格化した計測点の座標を用い、以下の式により平均動作モデルの座標を算出した。

$$ri = Ri - Rrp \quad nRi = ri / H$$

$$mRi = (\sum_{j=1}^n nRi, j) / n$$

$$mRrp = (\sum_{j=1}^n nRrp, j) / n$$

$$MRi = mRi + mRrp$$

ここで、H は被験者の身長、j は被験者 j、n は被験者数、Ri は歩行 1 サイクル時間で規格化された部位 i の座標、Rrp は時間で規格化された基準点の座標、nRi は被験者の身長によって規格化された基準点に対する部位 i の相対座標、mRi は規格化・平均化された相対座標ベクトル、mRrp は基準点の平均座標、MRi は規格化・平均化された部位 i の座標である。

文献

- 阿江通良ほか(1996)スポーツ技術の評価システムの開発に関するバイオメカニクス的研究. 平成 6 年度科学研究費補助金 (一般研究 (c)) 課題番号 06680082.
- 阿江通良, 藤井範久, 高松潤二, 戸谷直喜 (1996) バイオメカニクスデータによる動きの標準値の作成について. 第 9 回日本スポーツ運動学会大会抄録集 p.22.
- Ae, M., Fujii, N., and Takamatsu, J. (1997) A biomechanical method for the construction of a "Standard Motion" and the identification of essential motions by motion variability. Book of abstracts, XVIth Congress of the International Society of Biomechanics, p.27.
- 横井孝志ほか (1986) 日本人幼少年の身体部分係数. 体育学研究 31:53-66.

Table 1 Characteristics of subjects

1) All subjects

School grade	N	Height(m)		Weight(kg)	
		Boys	Girls	Boys	Girls
1st	43(22)	1.18 \pm 0.05	1.17 \pm 0.05	22.3 \pm 4.6	21.4 \pm 3.6
2nd	49(26)	1.23 \pm 0.05	1.24 \pm 0.05	24.5 \pm 4.8	25.4 \pm 6.8
3rd	42(21)	1.30 \pm 0.07	1.30 \pm 0.06	27.5 \pm 4.6	27.8 \pm 4.8
4th	46(23)	1.34 \pm 0.06	1.35 \pm 0.05	34.0 \pm 8.6	31.7 \pm 7.1
5th	49(28)	1.40 \pm 0.08	1.42 \pm 0.06	34.6 \pm 7.4	37.3 \pm 10.2
6th	40(19)	1.49 \pm 0.01	1.47 \pm 0.07	43.1 \pm 9.7	37.0 \pm 5.8

2) Midorigaoka E.S

School grade	N	Height(m)		Weight(kg)	
		Boys	Girls	Boys	Girls
1st	8(5)	1.19 \pm 0.04	1.19 \pm 0.05	20.6 \pm 0.8	21.7 \pm 3.0
2nd	8(5)	1.19 \pm 0.03	1.22 \pm 0.03	20.2 \pm 0.6	23.2 \pm 3.3
3rd	9(5)	1.28 \pm 0.05	1.26 \pm 0.09	27.7 \pm 3.9	25.4 \pm 5.3
4th	10(5)	1.34 \pm 0.05	1.35 \pm 0.01	35.5 \pm 5.0	29.0 \pm 1.4
5th	9(4)	1.40 \pm 0.08	1.39 \pm 0.03	37.9 \pm 7.7	34.3 \pm 3.2
6th	8(4)	1.52 \pm 0.11	1.47 \pm 0.05	46.7 \pm 9.5	41.1 \pm 7.5

3) Kogasaki E.S

School grade	N	Height(m)		Weight(kg)	
		Boys	Girls	Boys	Girls
1st	7(3)	1.15 \pm 0.06	1.15 \pm 0.10	19.6 \pm 2.1	20.5 \pm 3.5
2nd	7(4)	1.19 \pm 0.08	1.24 \pm 0.07	23.5 \pm 5.2	27.3 \pm 5.9
3rd	5(2)	1.32 \pm 0.08	1.30 \pm 0.08	29.4 \pm 5.4	28.5 \pm 6.4
4th	7(4)	1.29 \pm 0.02	1.35 \pm 0.05	25.6 \pm 4.1	29.8 \pm 4.8
5th	6(2)	1.34 \pm 0.07	1.38 \pm 0.06	32.0 \pm 7.3	29.0 \pm 3.5
6th	5(2)	1.47 \pm 0.09	1.47 \pm 0.10	41.5 \pm 11.7	35.5 \pm 3.4

4) Inuma E.S

School grade	N	Height(m)		Weight(kg)	
		Boys	Girls	Boys	Girls
1st	21(12)	1.18 \pm 0.06	1.17 \pm 0.04	23.8 \pm 6.7	21.8 \pm 4.3
2nd	24(13)	1.25 \pm 0.03	1.25 \pm 0.05	26.5 \pm 5.5	25.7 \pm 8.7
3rd	18(9)	1.30 \pm 0.06	1.31 \pm 0.05	27.9 \pm 5.0	27.8 \pm 3.1
4th	20(10)	1.37 \pm 0.04	1.36 \pm 0.06	35.3 \pm 6.2	35.7 \pm 9.1
5th	24(15)	1.41 \pm 0.06	1.44 \pm 0.06	33.8 \pm 6.3	40.1 \pm 12.6
6th	17(5)	1.49 \pm 0.11	1.48 \pm 0.07	42.7 \pm 9.0	36.1 \pm 7.1

5) Fukuhira E.S

School grade	N	Height(m)		Weight(kg)	
		Boys	Girls	Boys	Girls
1st	7(2)	1.18 \pm 0.04	1.19 \pm 0.02	22.9 \pm 3.0	20.3 \pm 2.7
2nd	10(5)	1.25 \pm 0.06	1.24 \pm 0.07	24.4 \pm 2.7	24.5 \pm 4.9
3rd	10(5)	1.29 \pm 0.07	1.30 \pm 0.04	24.9 \pm 3.9	29.9 \pm 6.1
4th	9(4)	1.35 \pm 0.07	1.32 \pm 0.06	36.6 \pm 14.6	27.3 \pm 3.5
5th	10(5)	1.42 \pm 0.10	1.44 \pm 0.03	35.0 \pm 10.0	37.7 \pm 5.3
6th	10(5)	1.47 \pm 0.09	1.47 \pm 0.07	42.6 \pm 12.1	35.4 \pm 4.3

Table 2 Walking speed descriptors(Boys)

Grade	Walking speed (m/s)	Step Length (m)	Step Frequency (steps/s)	Relative step length (step length/height)	Relative step frequency (step)	Walking ratio (m/(steps/s))
1st	1.05±0.21	0.47±0.09	2.21±0.21	0.40±0.23	0.67±0.08	0.22±0.04
2nd	1.06±0.22	0.51±0.10	2.09±0.13	0.42±0.12	0.61±0.05	0.25±0.05
3rd	1.19±0.22	0.56±0.08	2.15±0.22	0.43±0.17	0.60±0.03	0.26±0.06
4th	1.08±0.20	0.54±0.09	2.01±0.13	0.40±0.14	0.57±0.06	0.27±0.05
5th	1.19±0.19	0.58±0.09	2.06±0.19	0.42±0.18	0.55±0.05	0.28±0.05
6th	1.26±0.21	0.63±0.02	2.01±0.14	0.42±0.17	0.52±0.03	0.32±0.07

Table 3 Walking speed descriptors(Girls)

Grade	Walking speed (m/s)	Step Length (m)	Step Frequency (steps/s)	Relative step length (step length/height)	Relative step frequency (step)	Walking ratio (m/(steps/s))
1st	1.18±0.19	0.50±0.05	2.32±0.25	0.43±0.24	0.64±0.09	0.22±0.04
2nd	1.15±0.17	0.53±0.06	2.19±0.16	0.42±0.15	0.59±0.04	0.24±0.05
3rd	1.17±0.23	0.53±0.11	2.19±0.10	0.41±0.10	0.59±0.06	0.24±0.05
4th	1.18±0.16	0.60±0.04	2.12±0.10	0.41±0.16	0.54±0.04	0.26±0.04
5th	1.24±0.15	0.60±0.02	2.09±0.21	0.41±0.14	0.55±0.06	0.29±0.05
6th	1.16±0.22	0.57±0.10	2.03±0.11	0.39±0.087	0.52±0.05	0.28±0.06

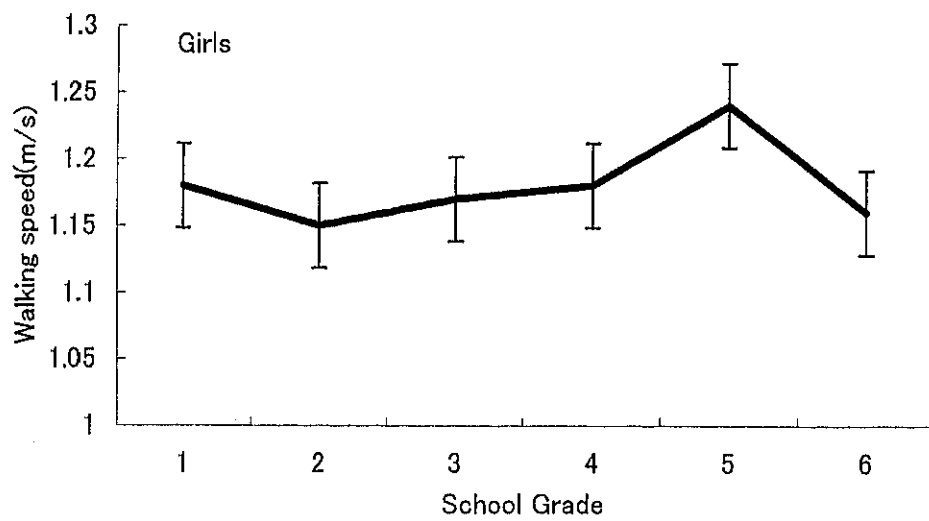
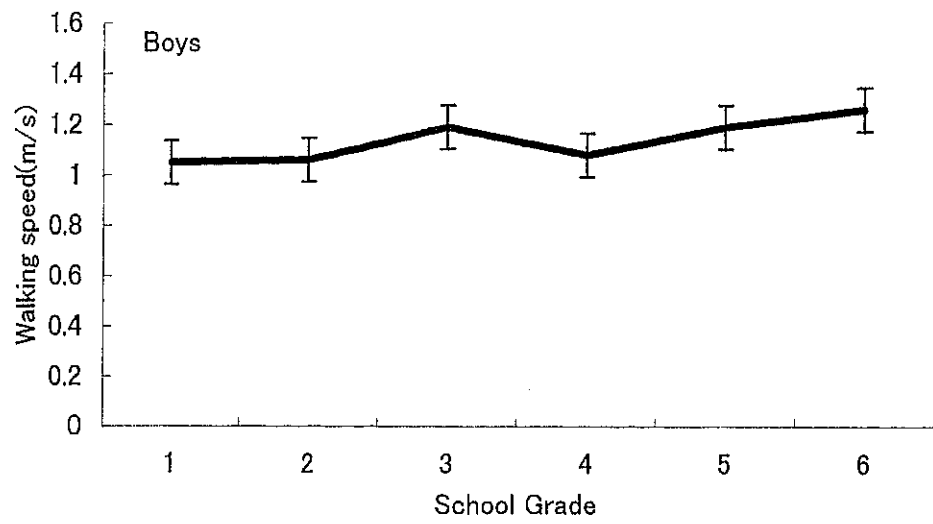


Figure 1 Changes in walking speed

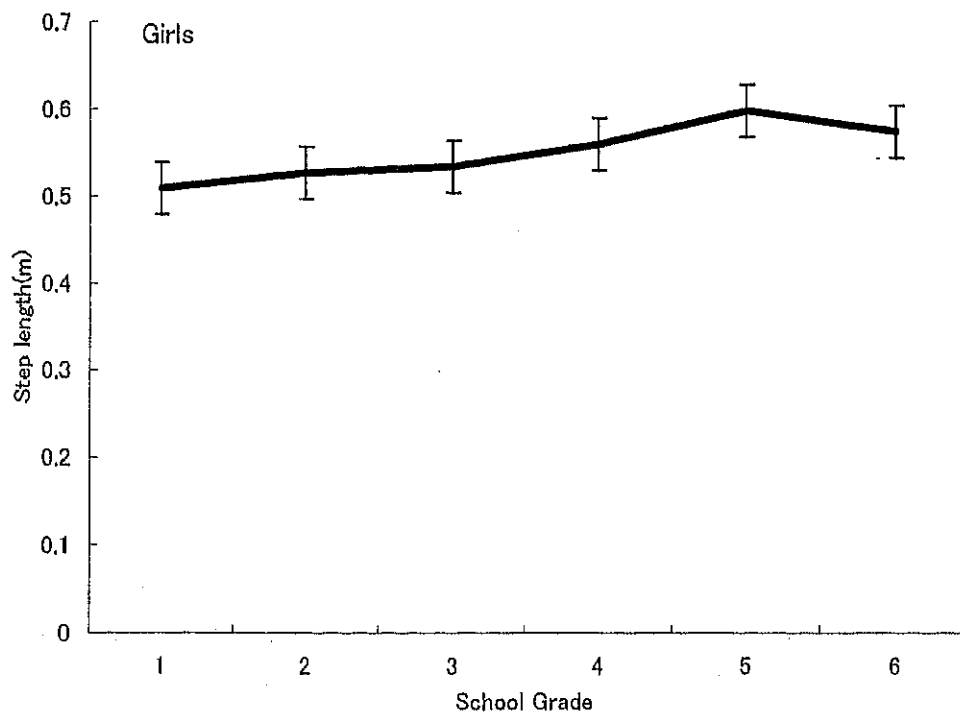
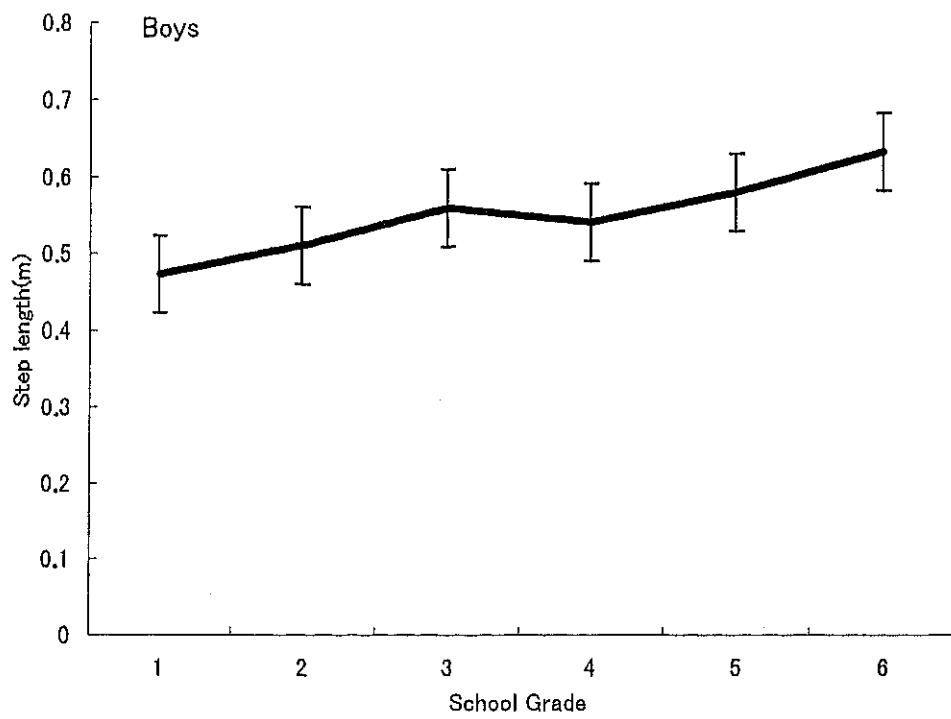


Figure 2 Changes in step length

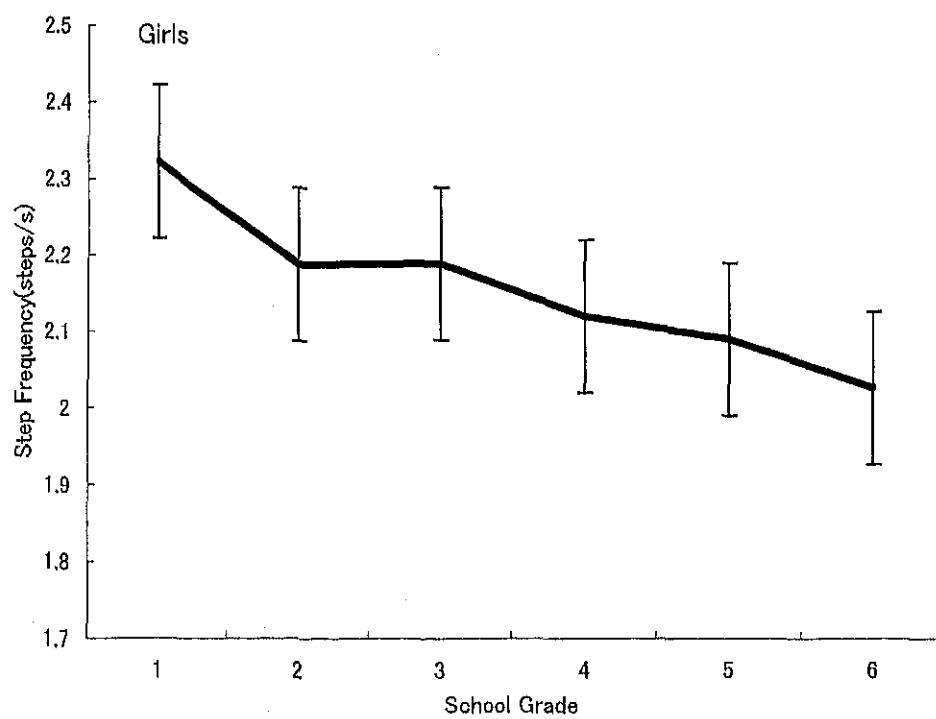
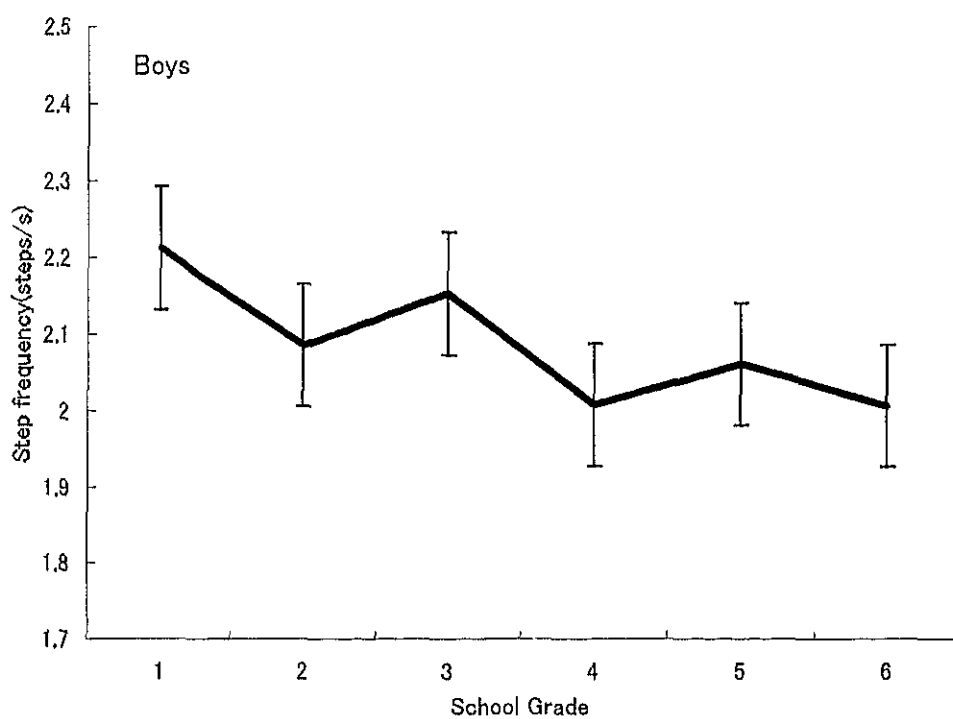


Figure 3 Changes in step frequency

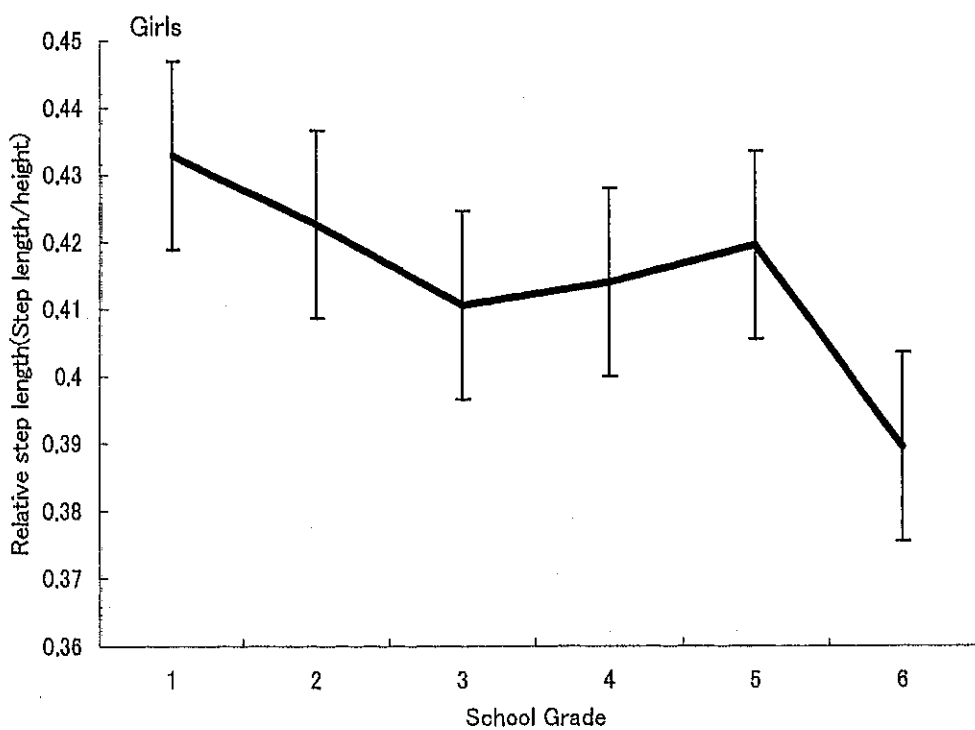
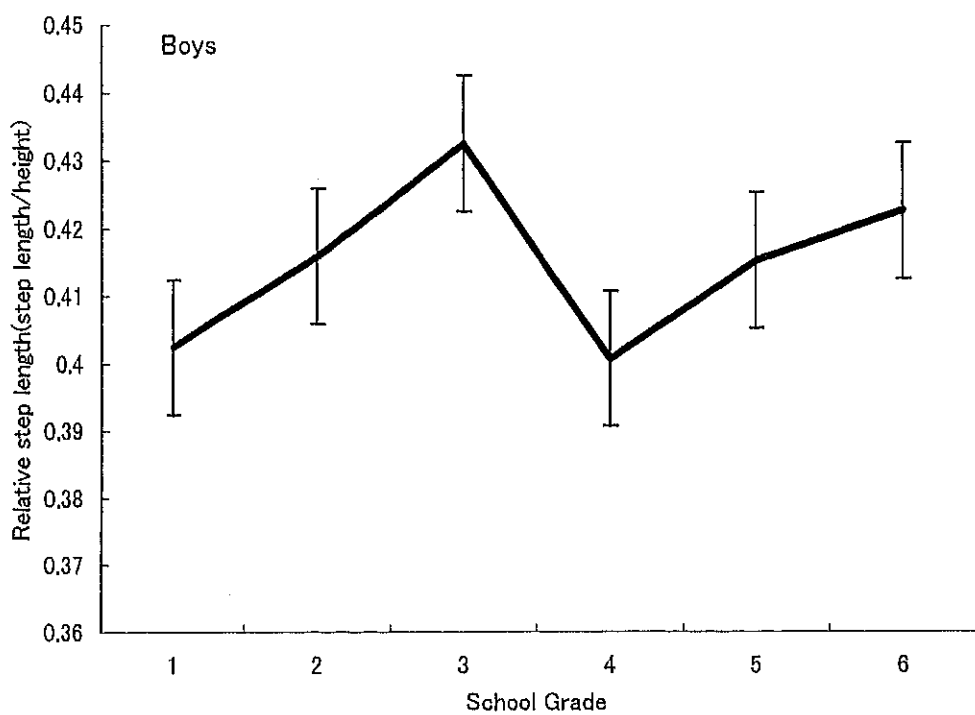


Figure 4 Changes in relative step length

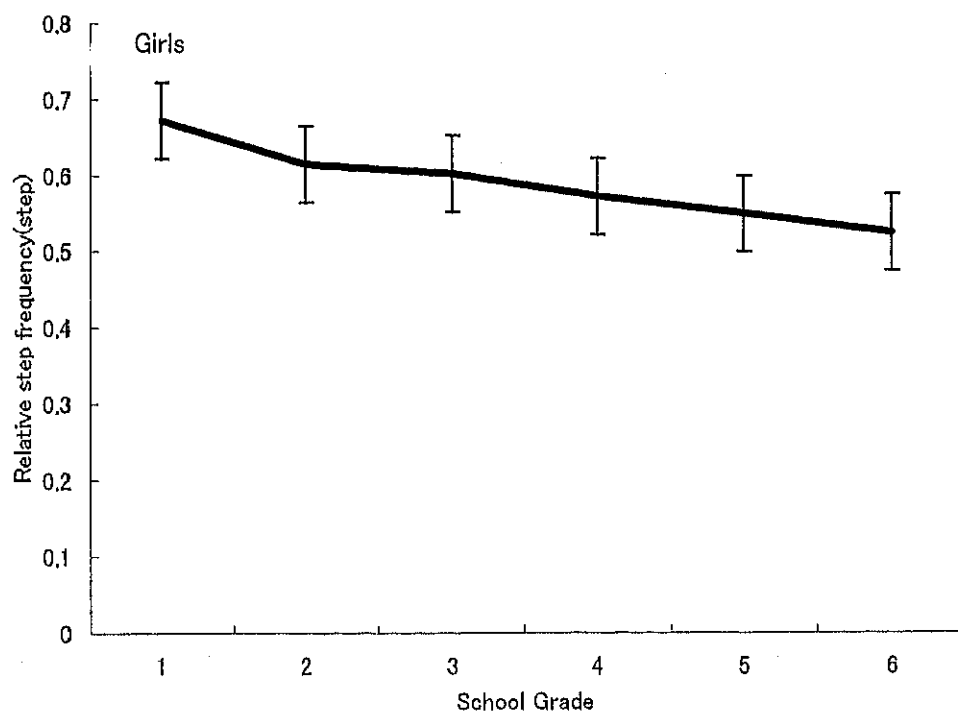
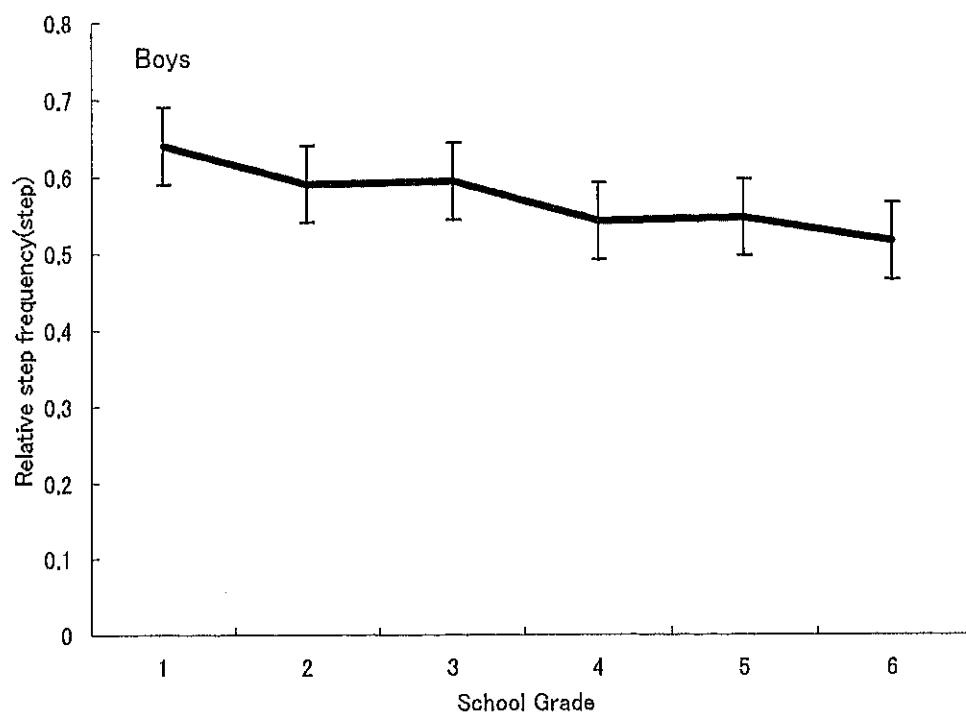


Figure 5 Changes in relative step frequency

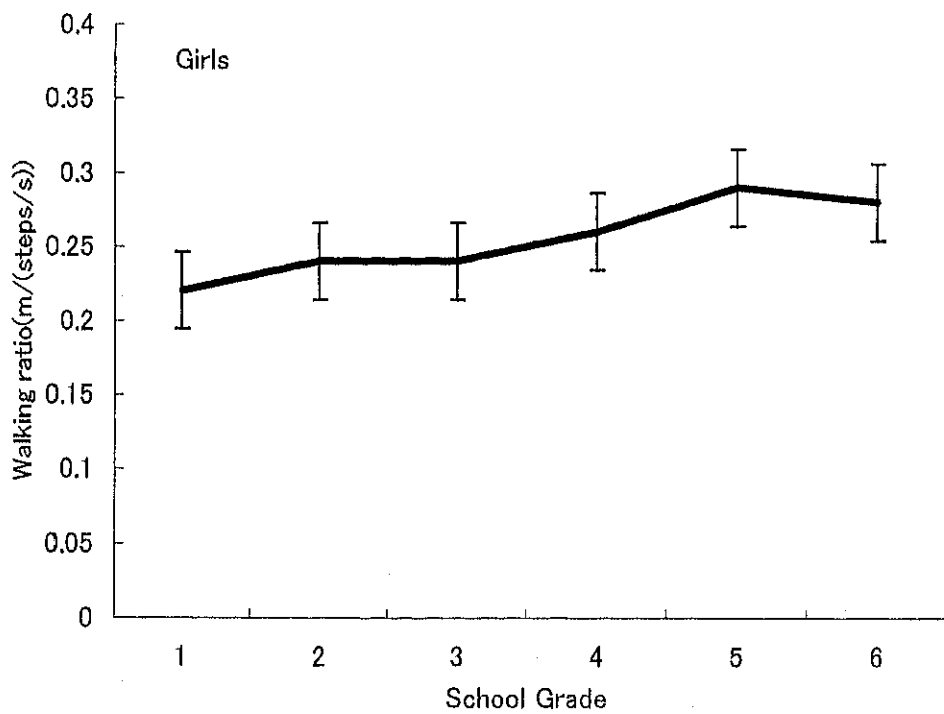
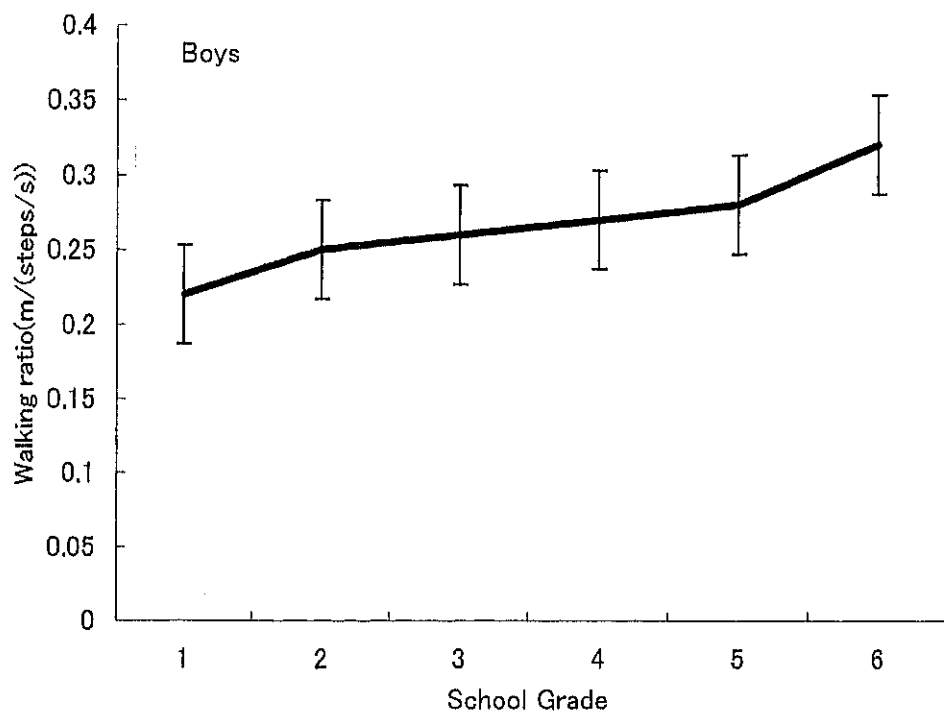


Figure 6 Changes in walking ratio

Boys
1st



2nd



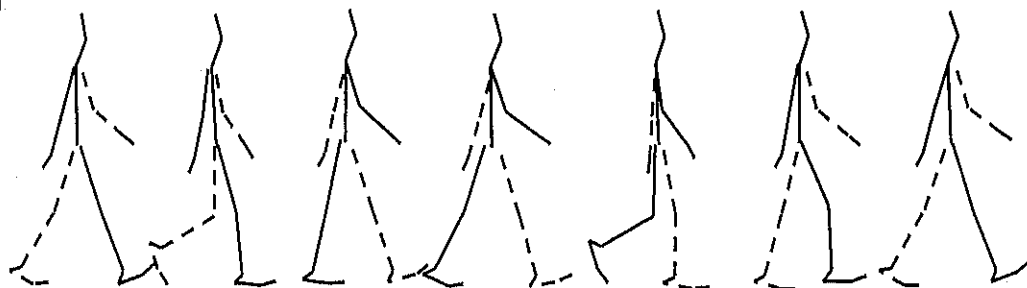
3rd



4th



5th



6th



R-on 1 LT-off

RT-off

R-on2

Figure 7 Averaged gait patterns(standard motions) of school boys

Girls
1st



2nd



3rd



4th



5th



6th



R-on 1 LT-off

RT-off

R-on2

Figure 8 Averaged gait patterns(standard motions) of school girls

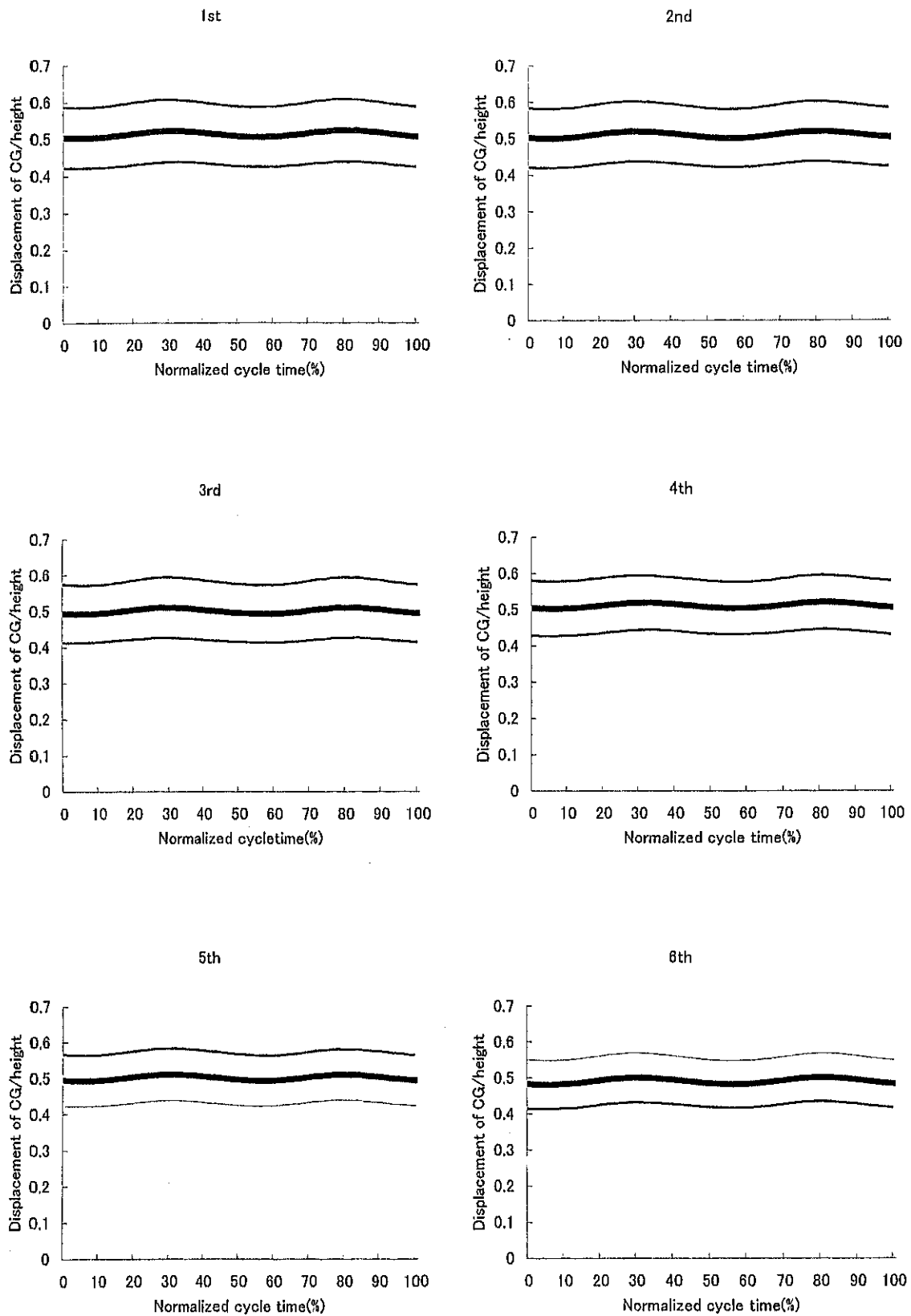


Figure 9-1 Vertical relative CG displacement during walking : Boys

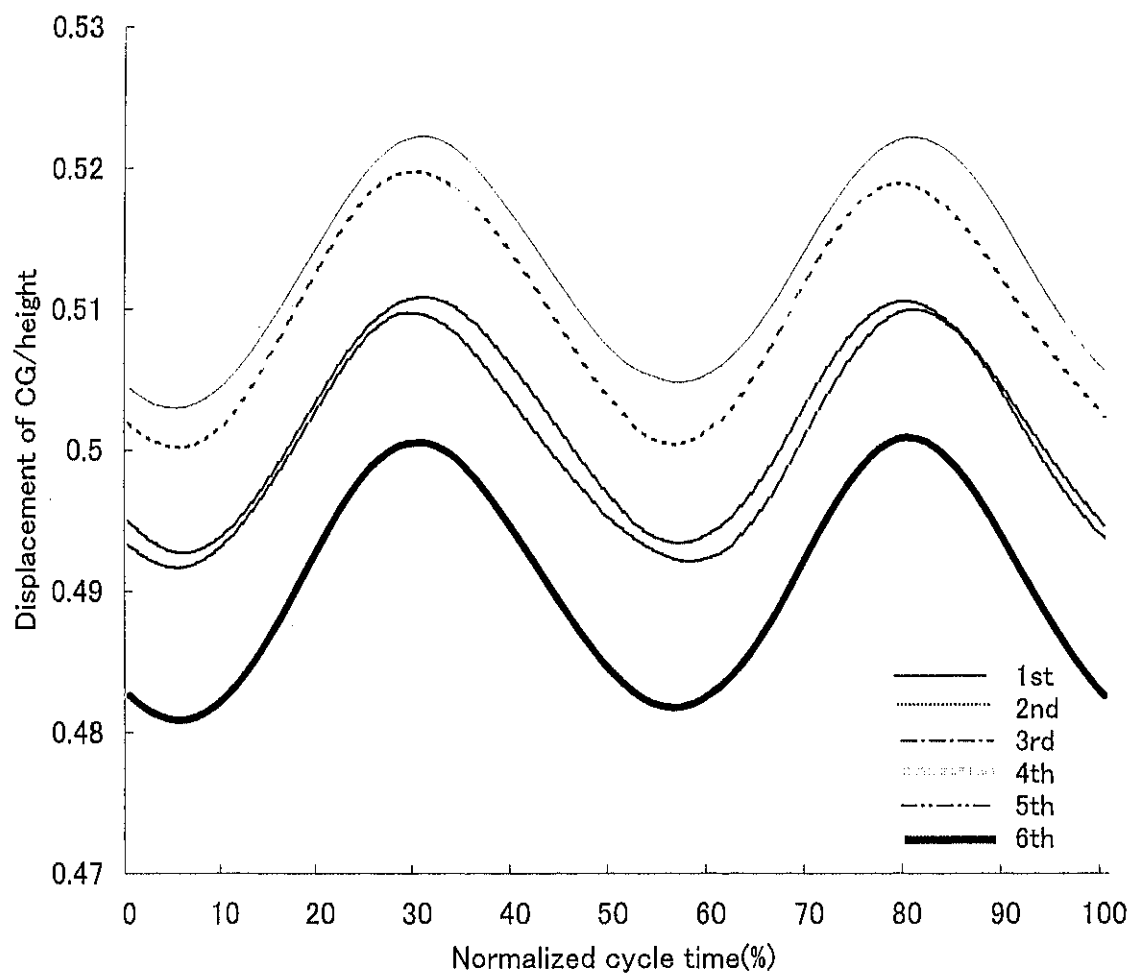


Figure 9-2 Comparison of vertical relative CG displacement : Boys

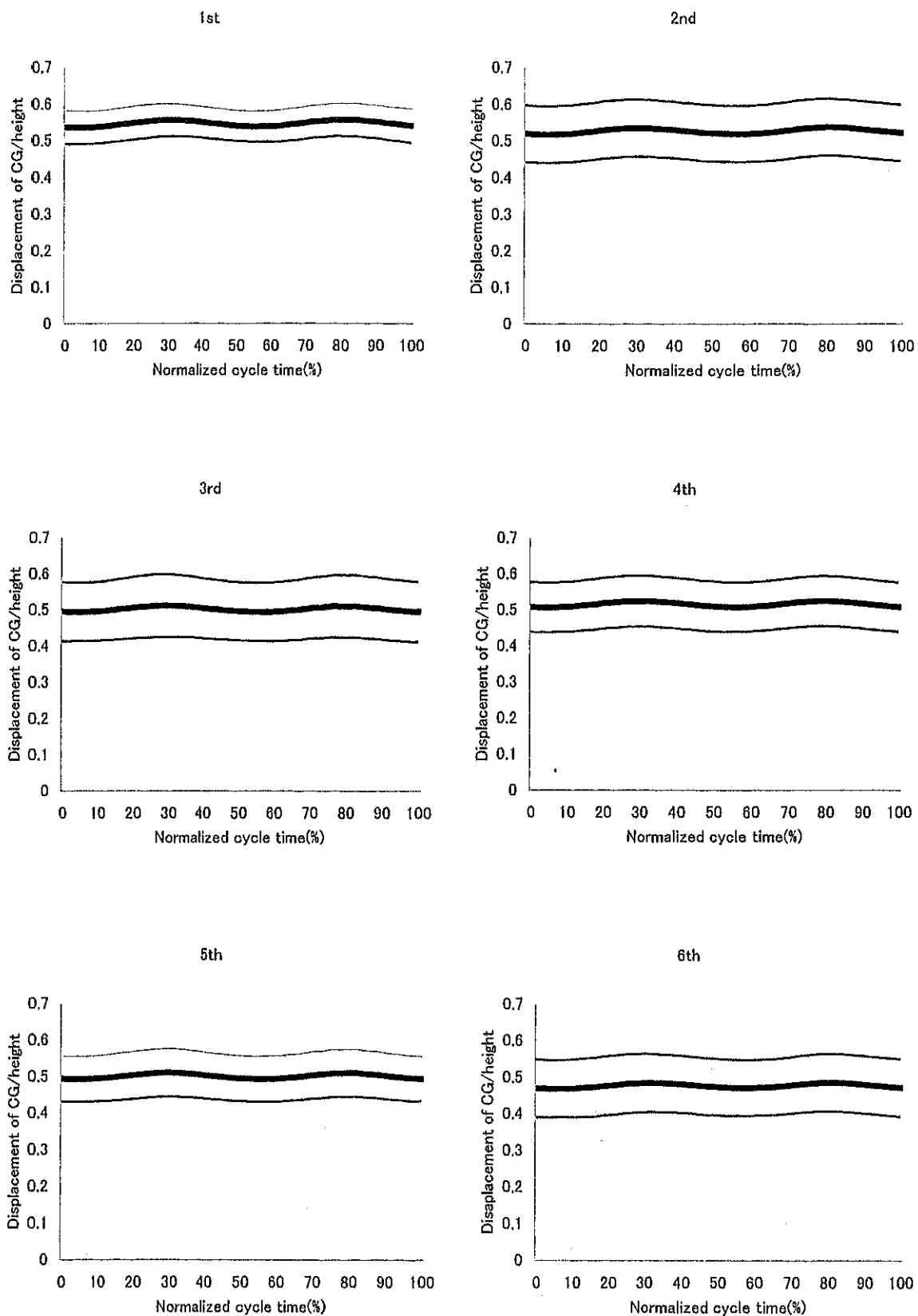


Figure 10-1 Vertical relative CG displacement during walking : Girls

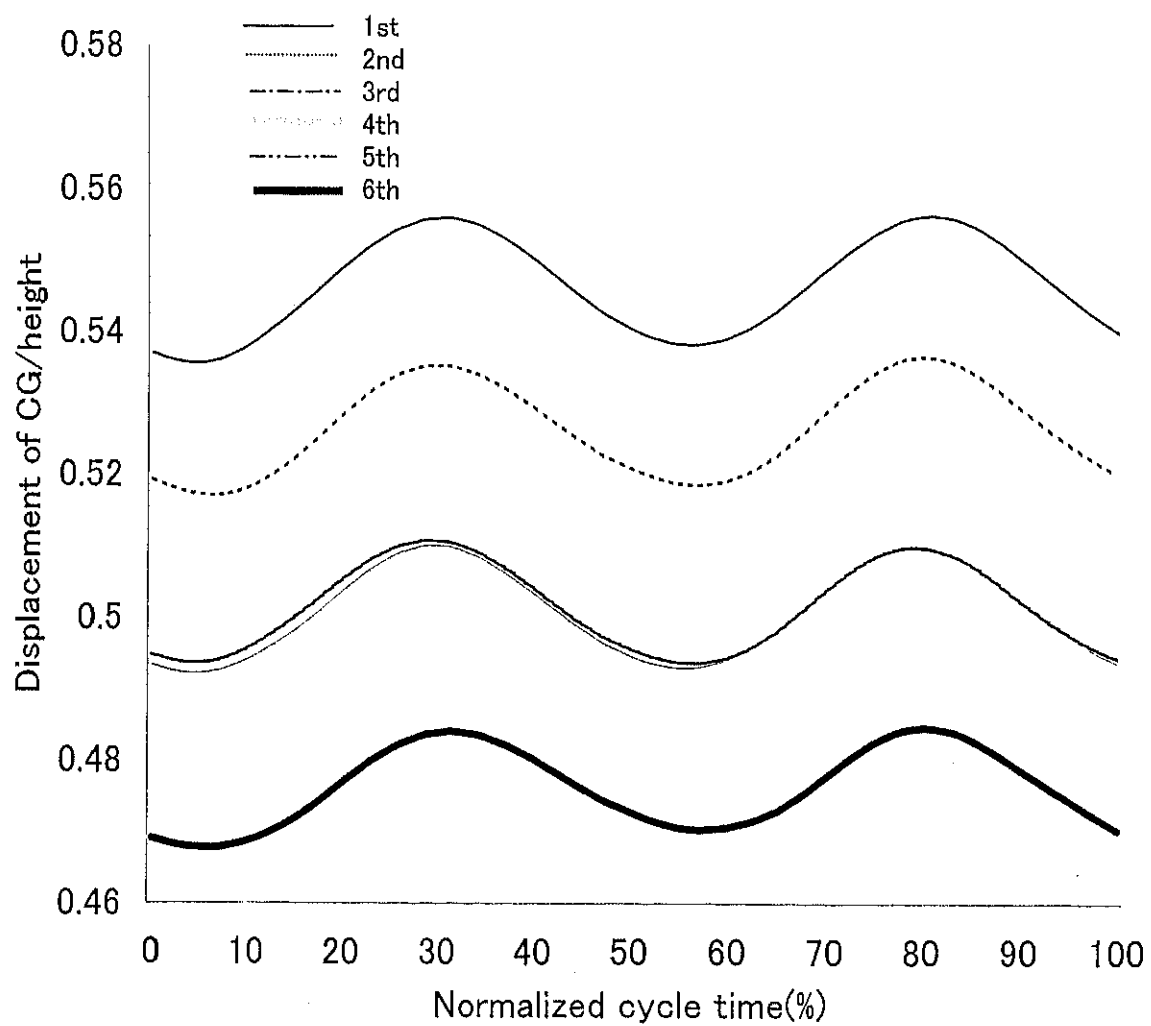


Figure 10-2 Comparison of vertical relative CG displacement : Girls

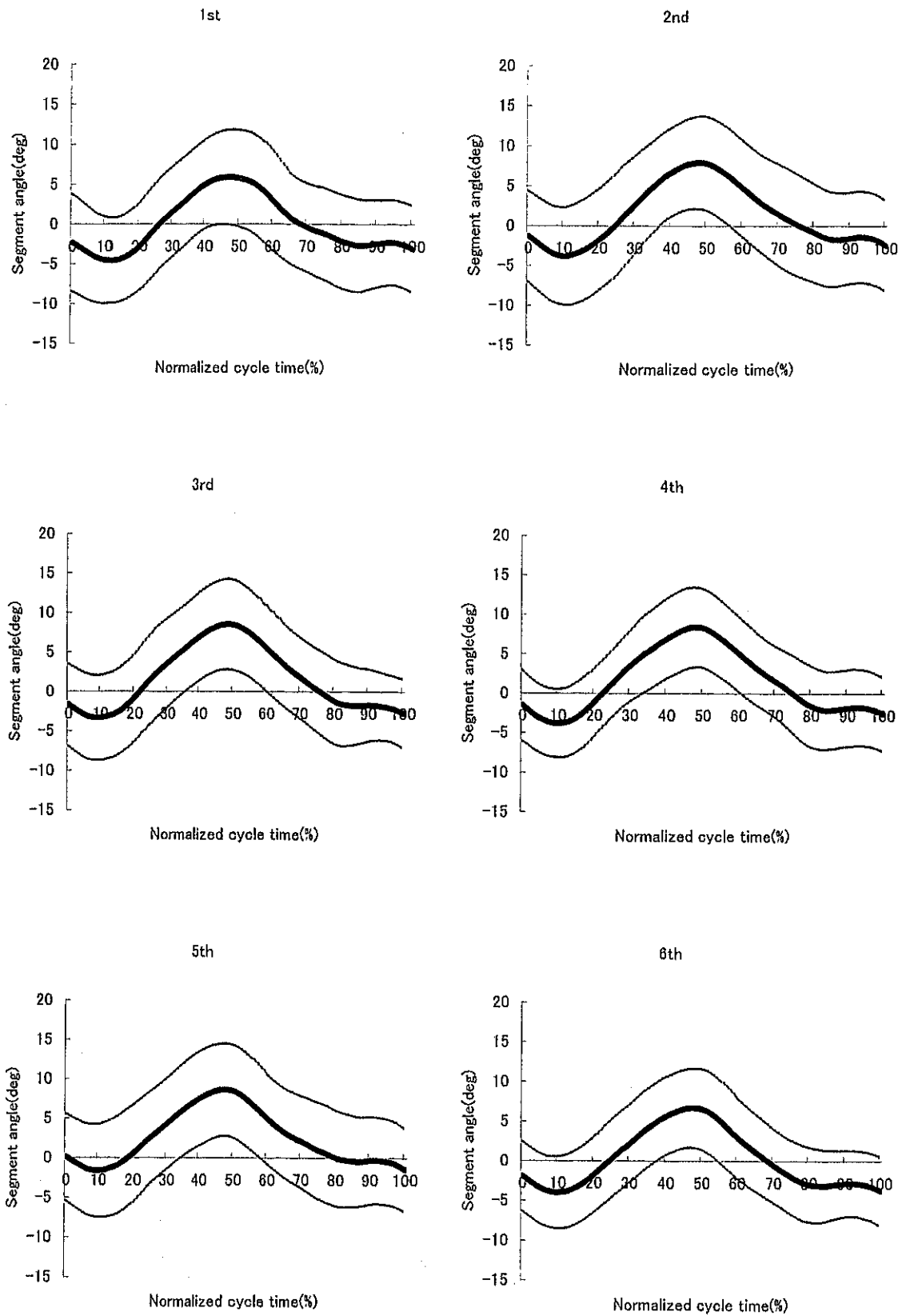


Figure 11-1 Averaged patterns of the trunk angle : Boys

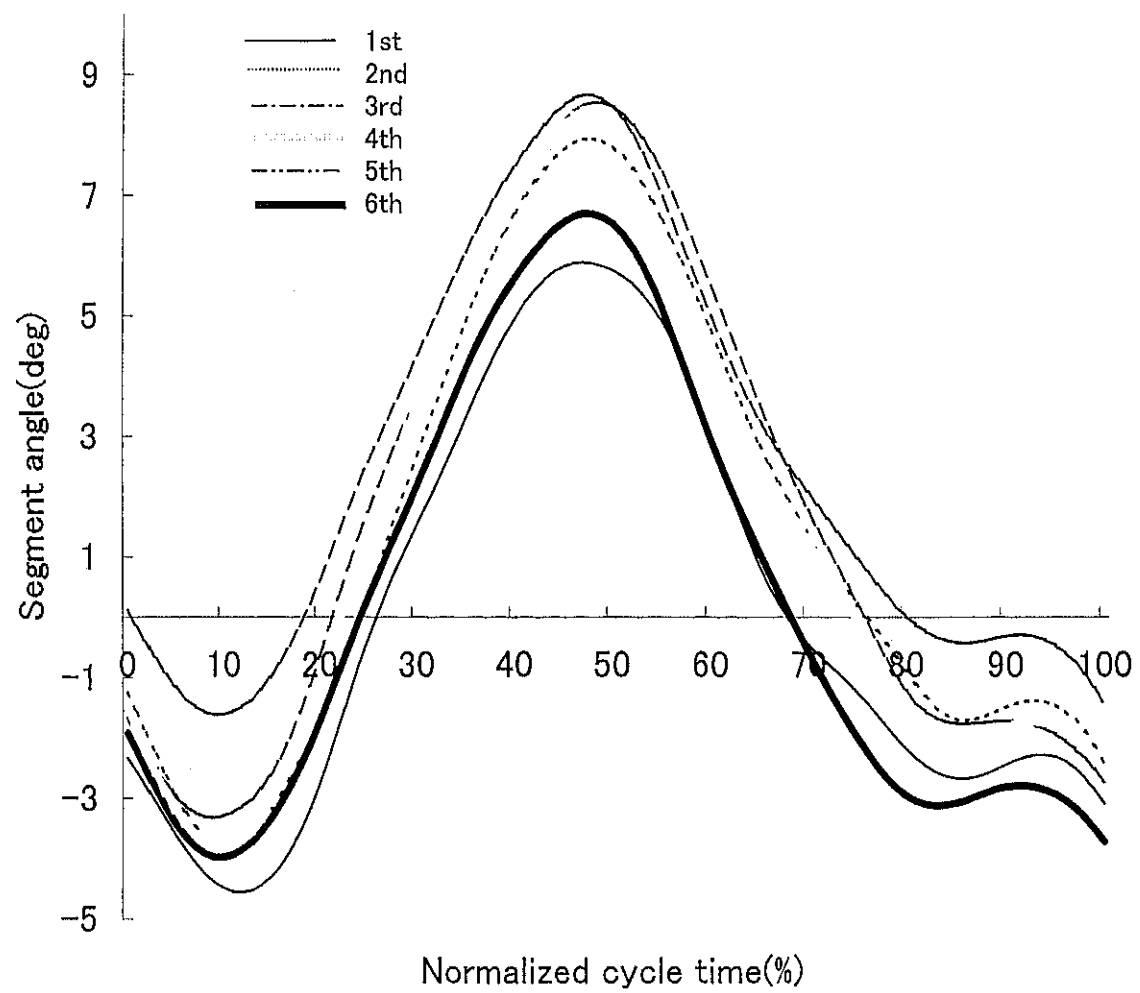


Figure 11-2 Comparison of the trunk angle : Boys

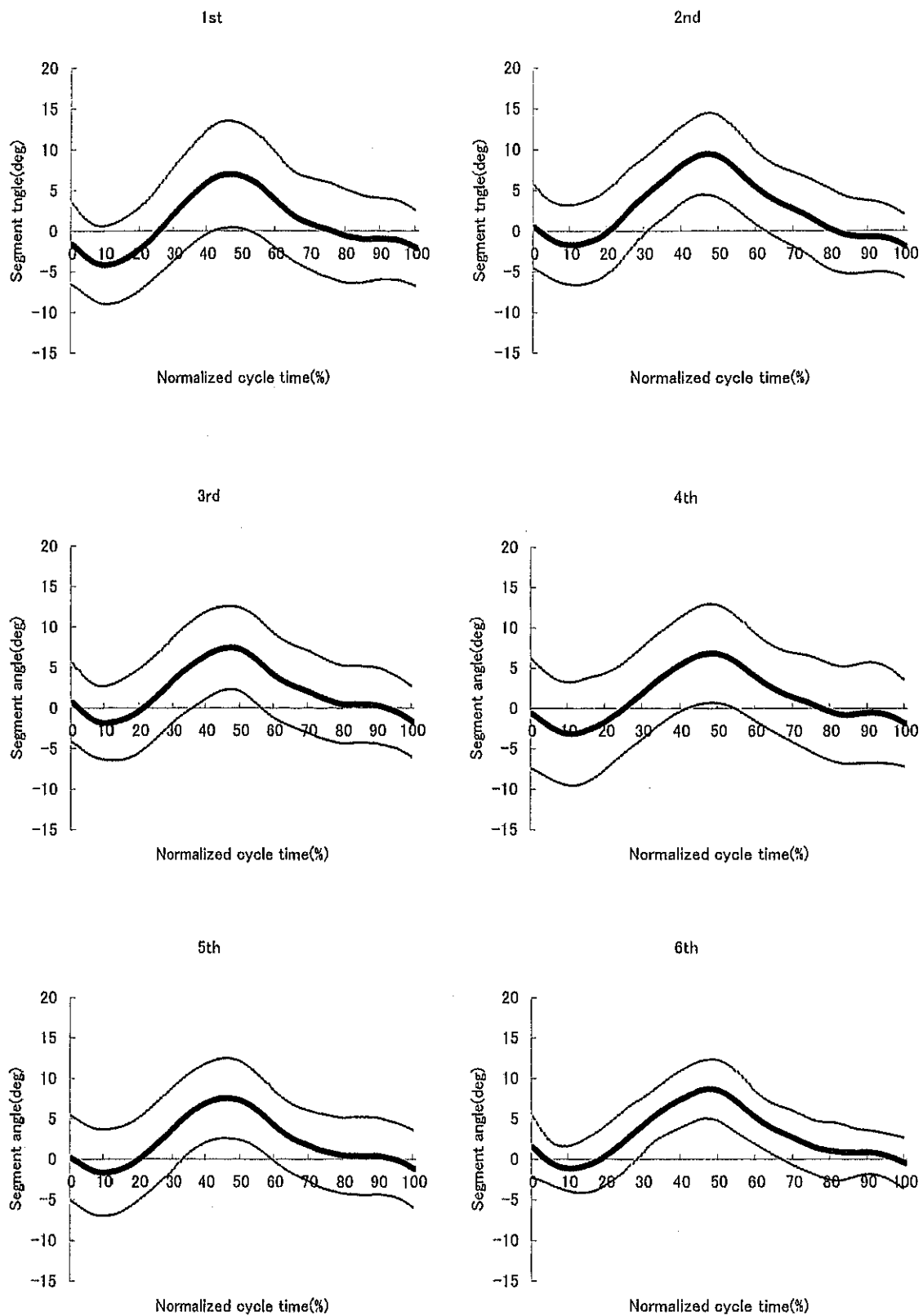


Figure 12-1 Averaged patterns of the trunk angle : Girls

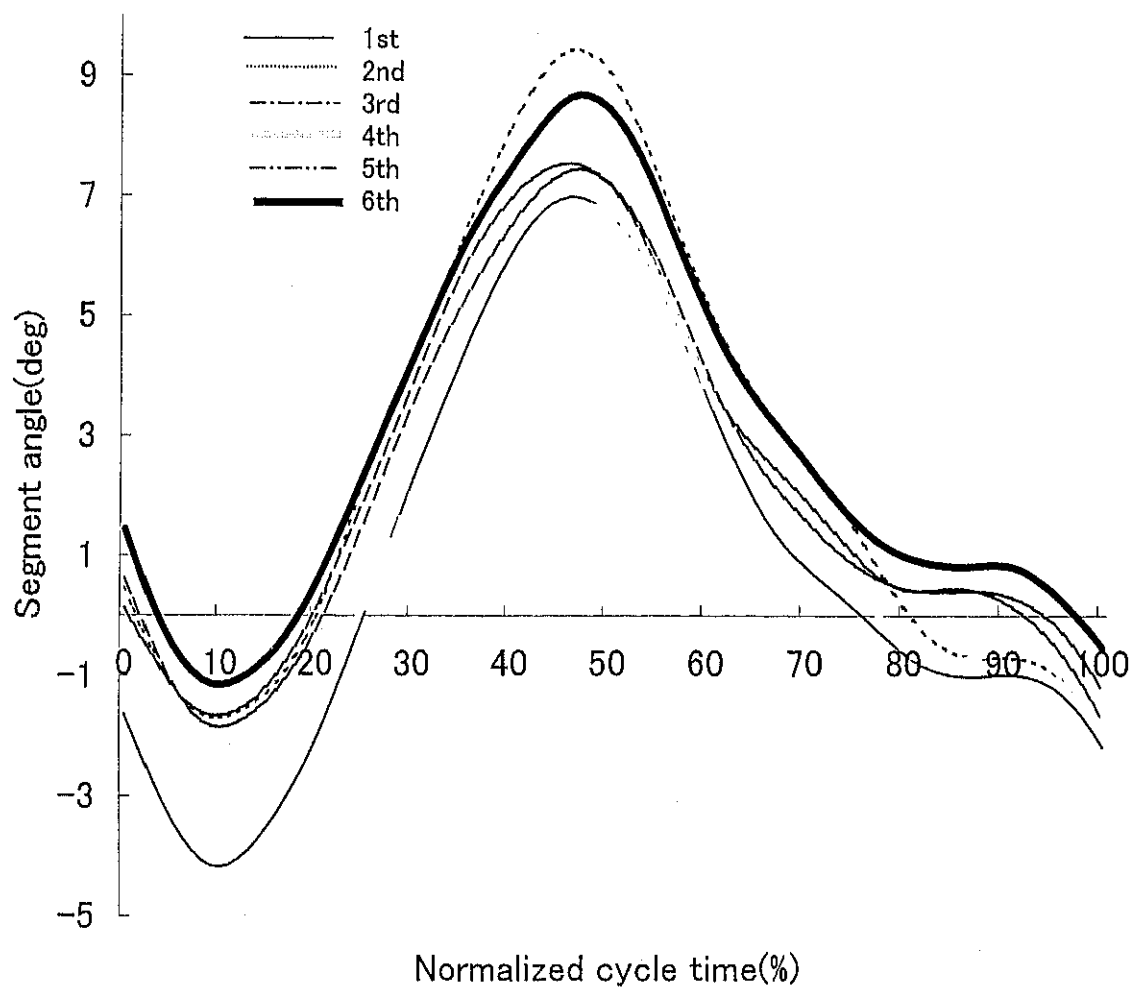


Figure 12-2 Comparison of the trunk angle : Girls

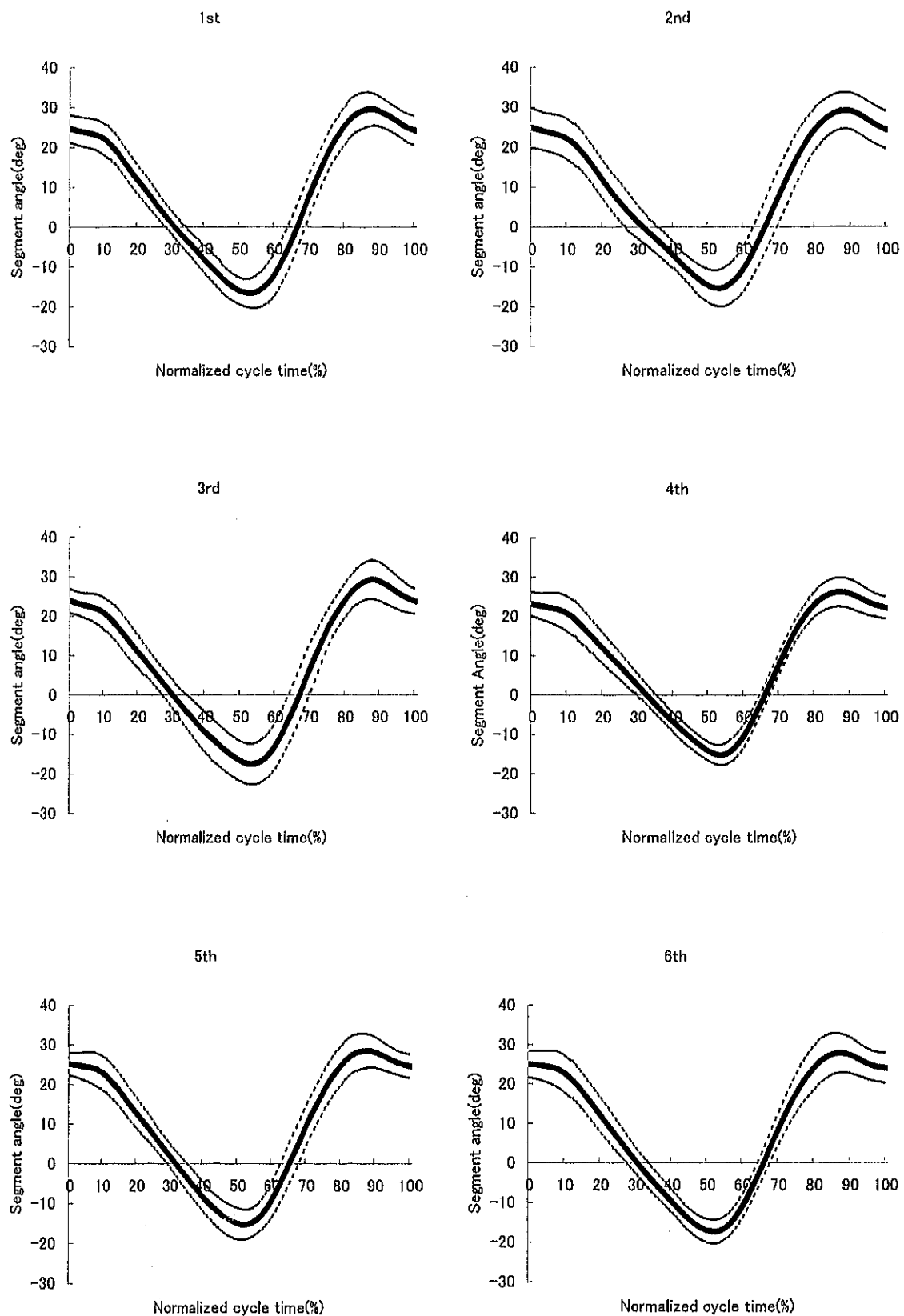


Figure 13-1 Averaged patterns of the thigh angle : Boys

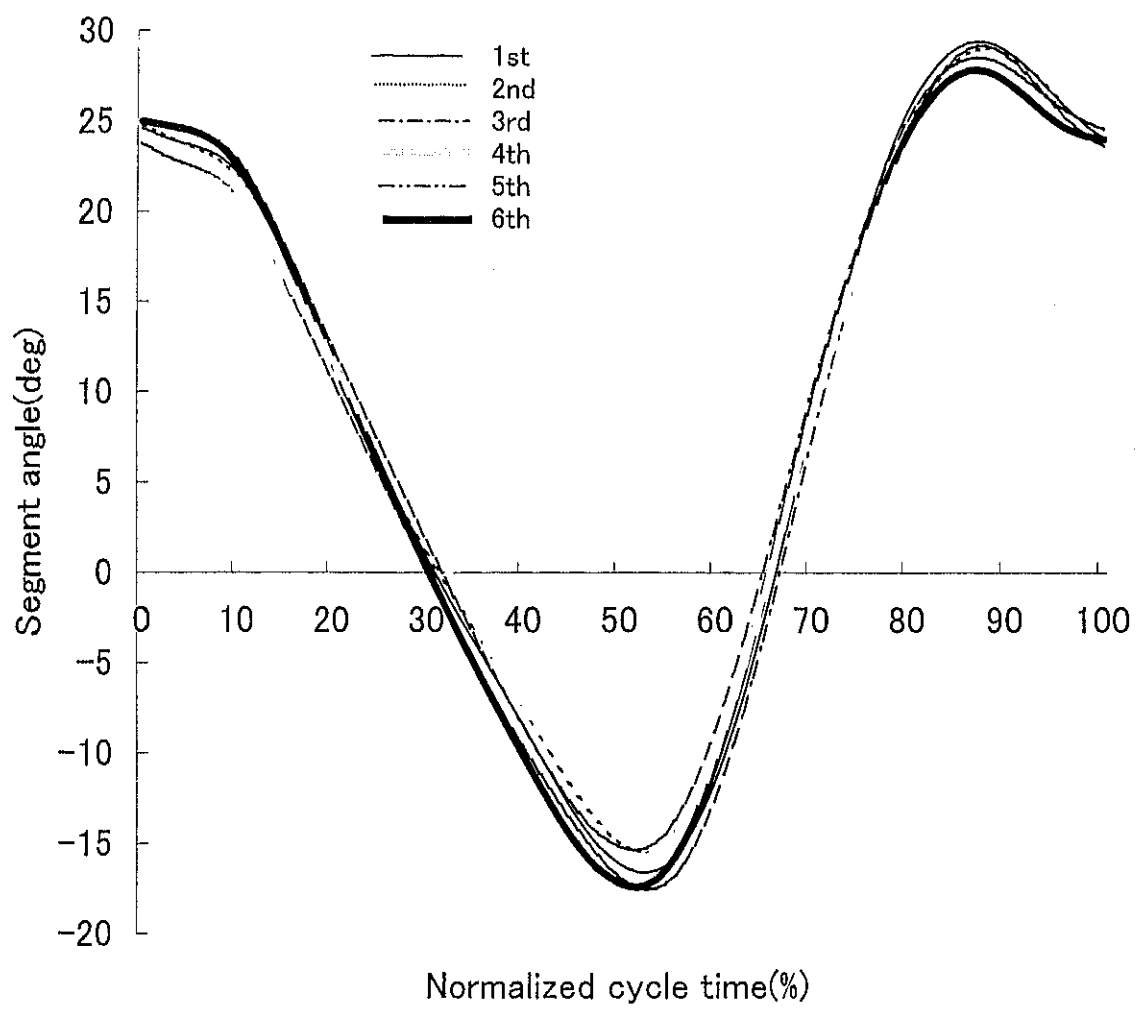


Figure 13-2 Comparison of the thigh angle : Boys

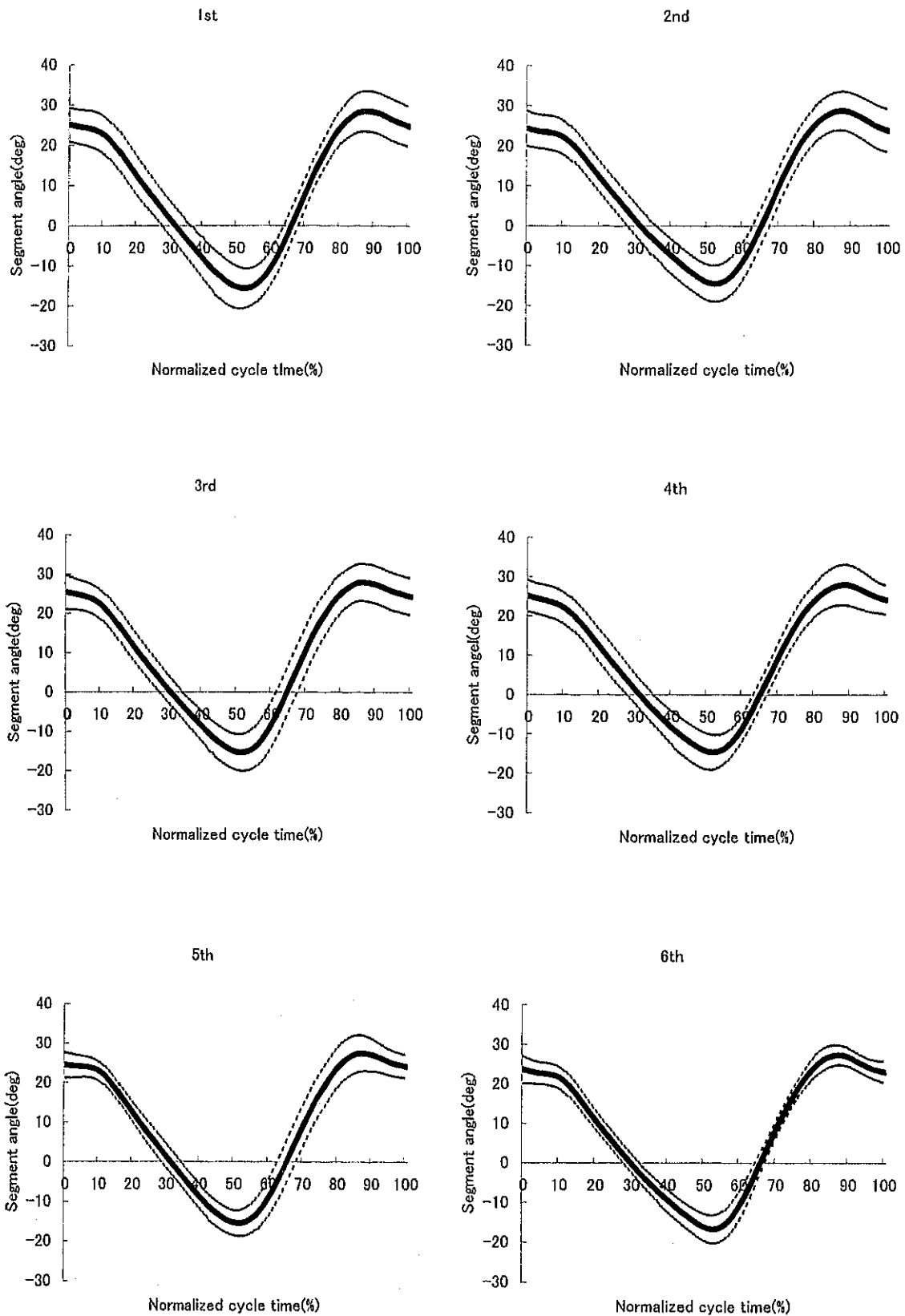


Figure 14-1 Averaged patterns of the thigh angle : Girls

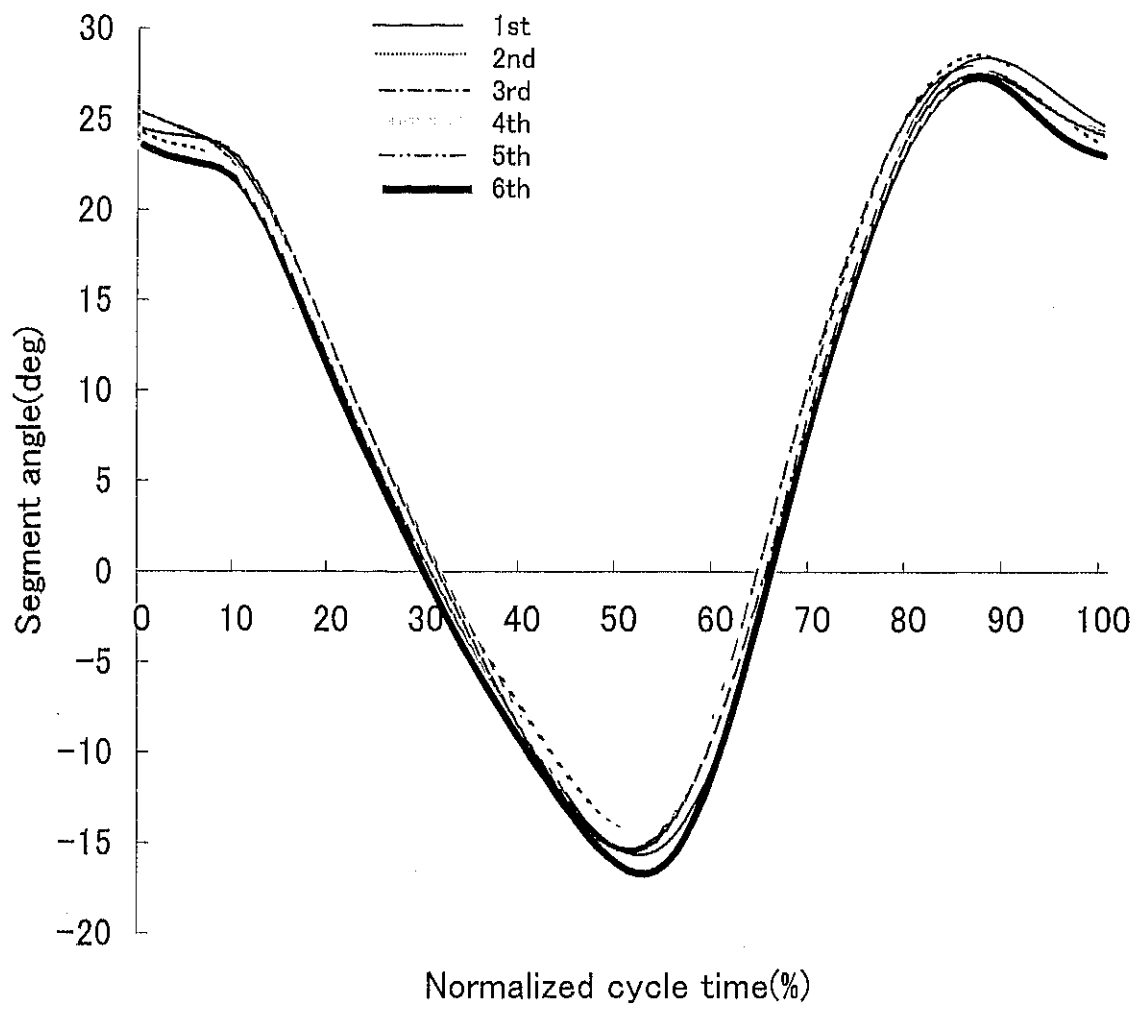


Figure 14-2 Comparison of the thigh angle : Girls

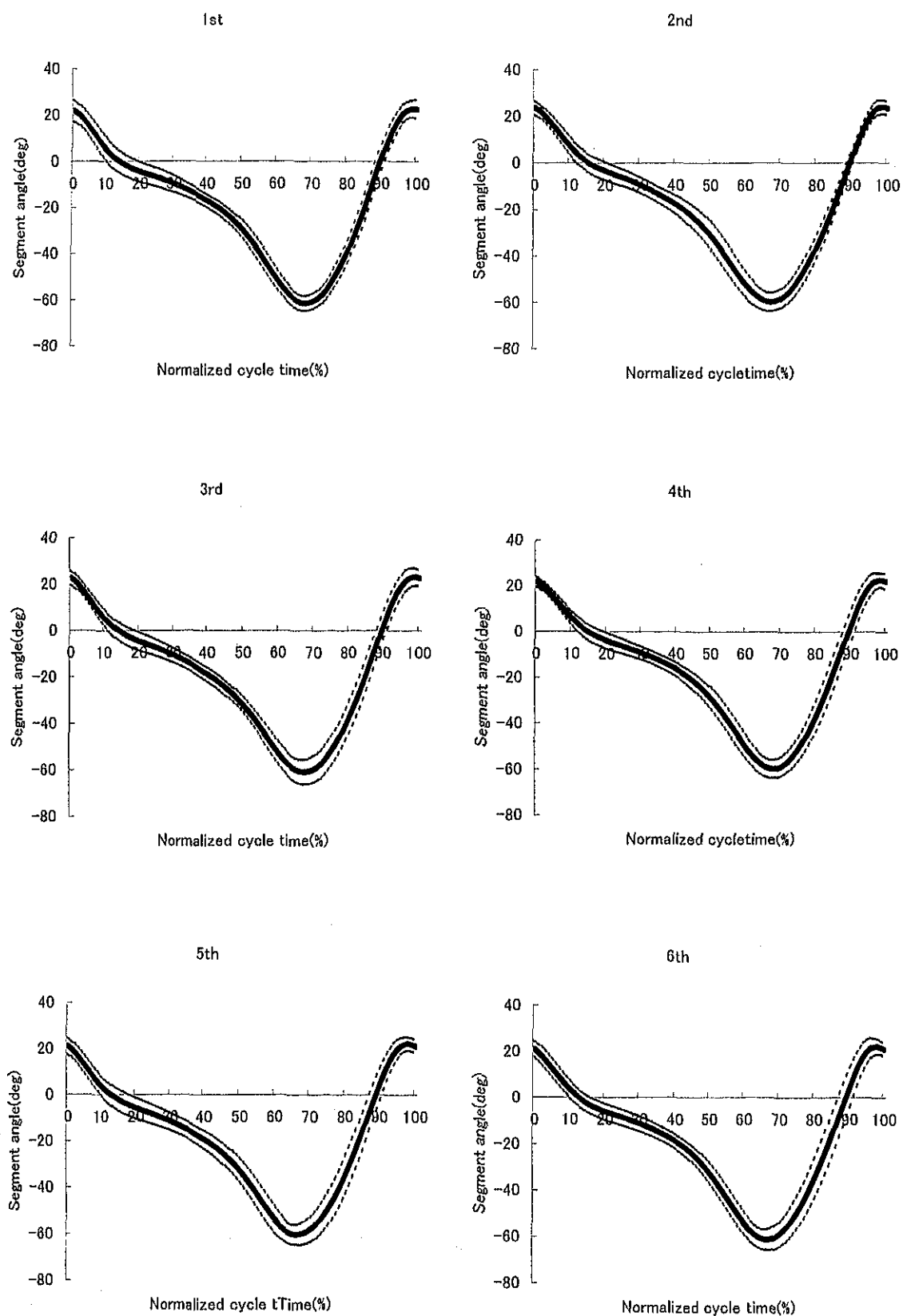


Figure 15-1 Averaged patterns of the shank angle : Boys

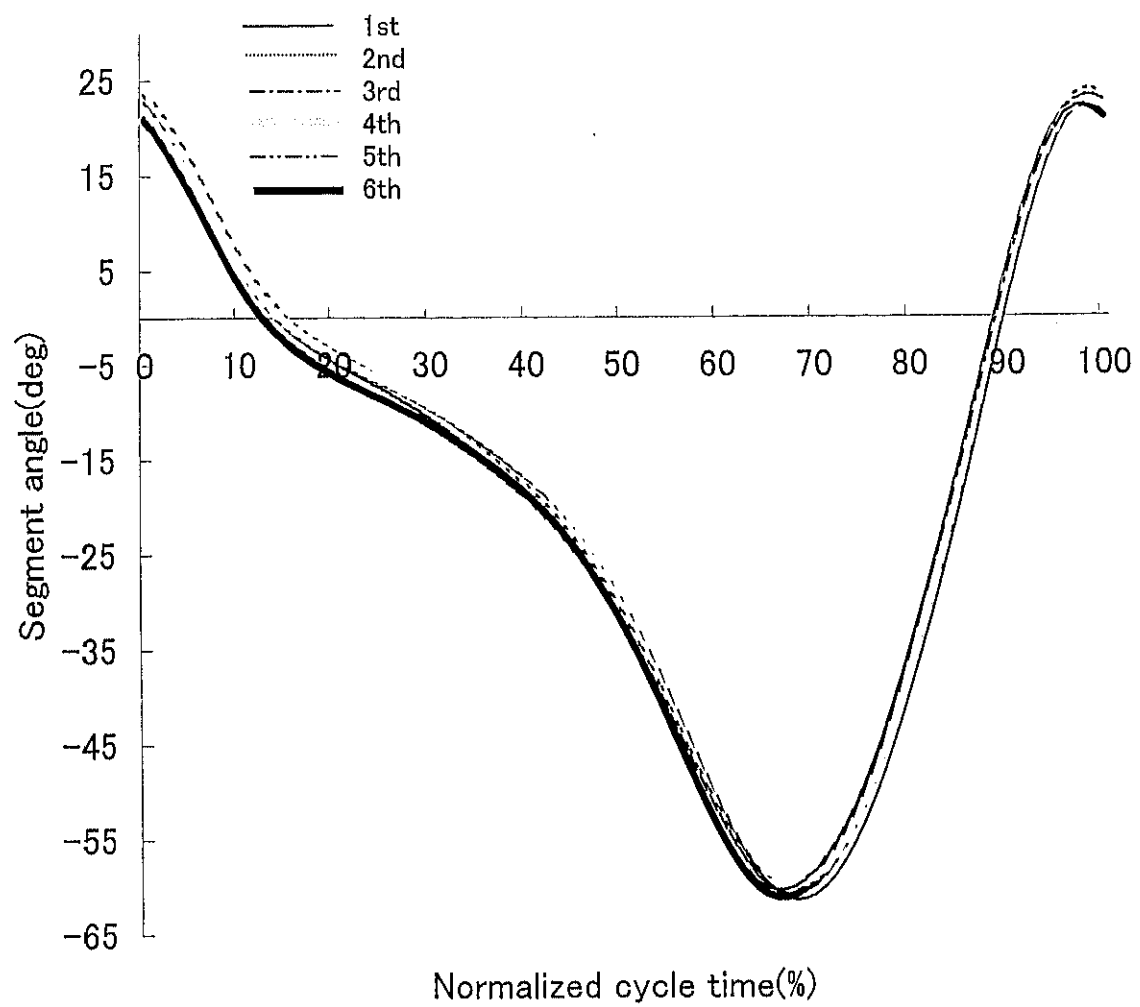


Figure 15-2 Comparison of the shank angle : Boys

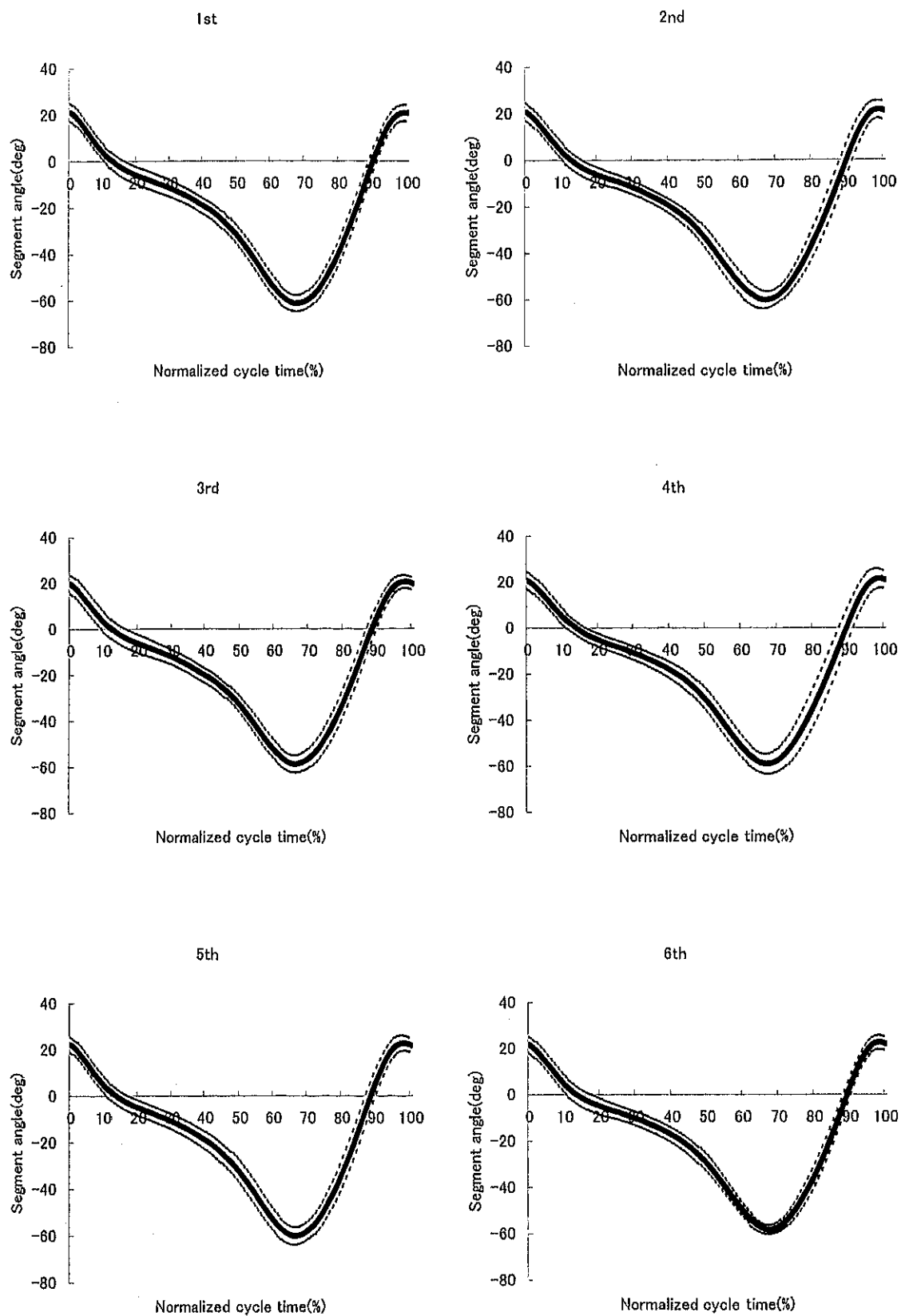


Figure 16-1 Averaged patterns of the shank angle : Girls

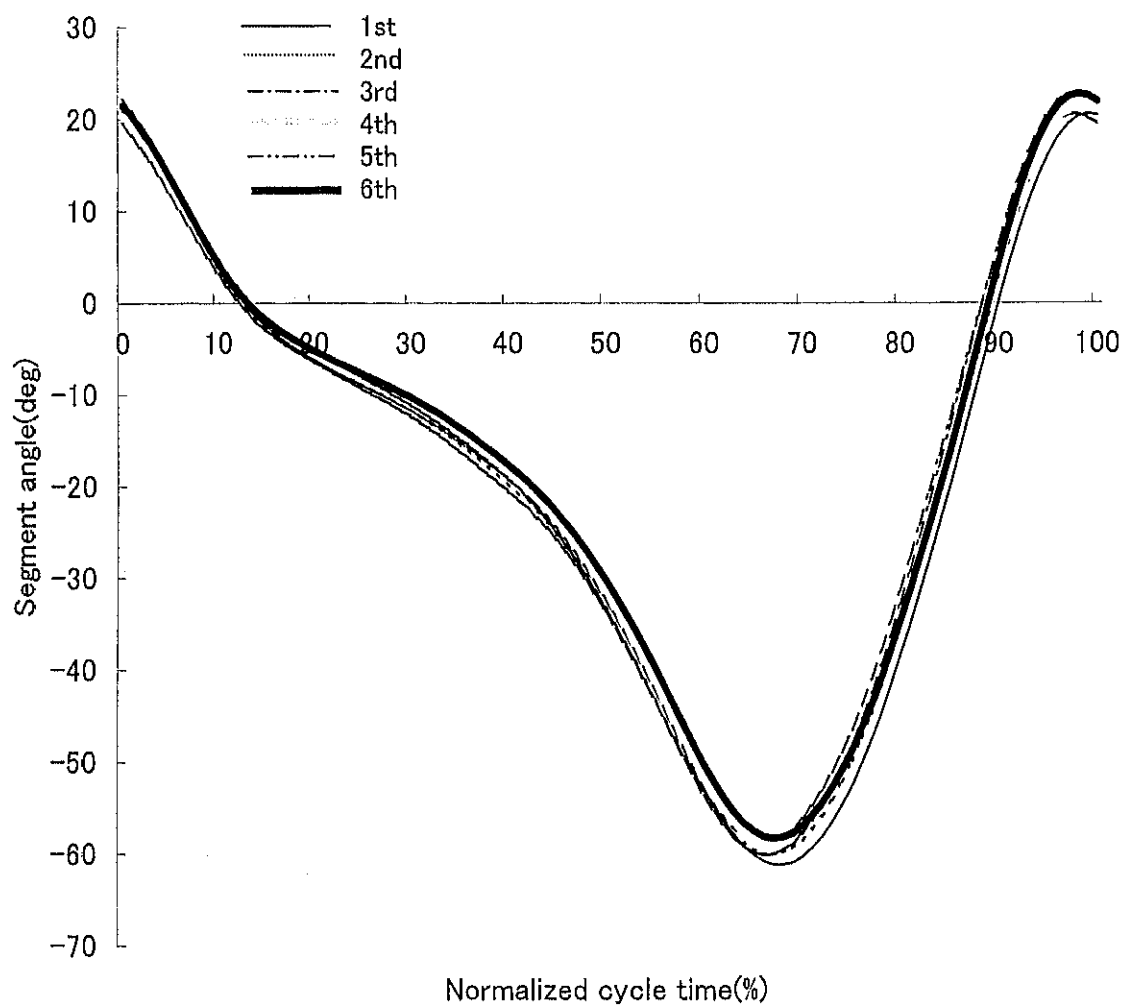


Figure 16-2 Comparison of the shank angle : Girls

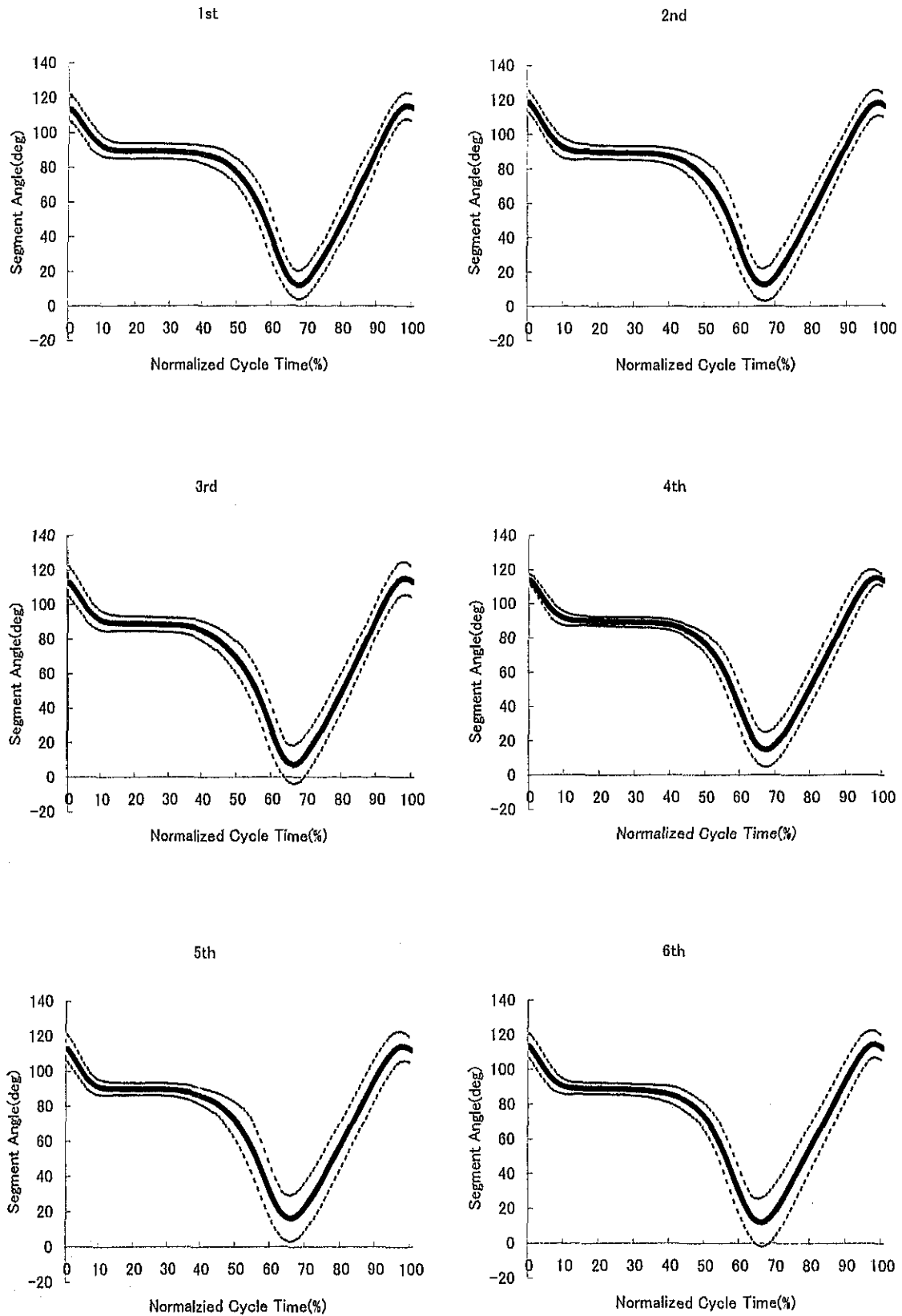


Figure 17-1 Averaged patterns of the foot angle : Boys

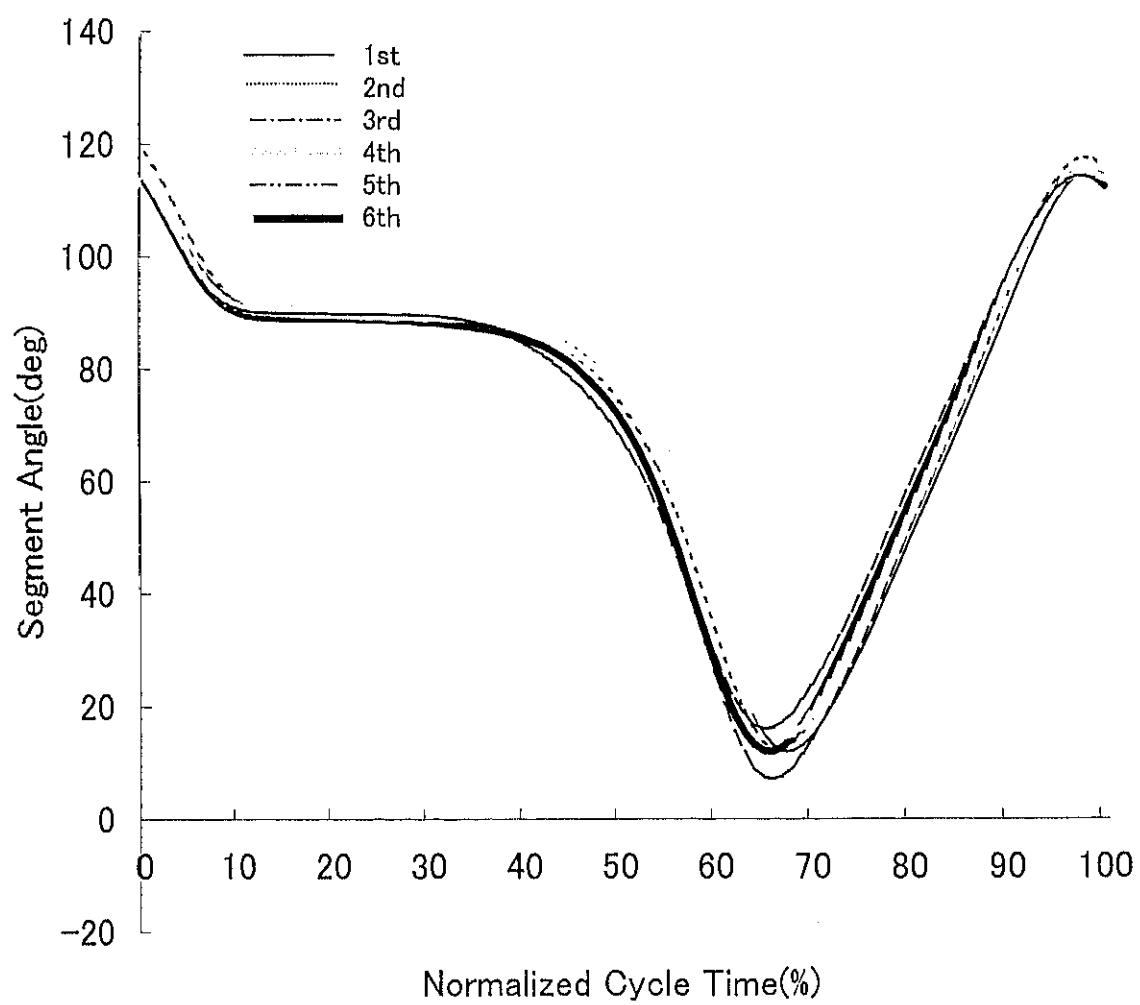


Figure 17-2 Comparison of the foot angle : Boys

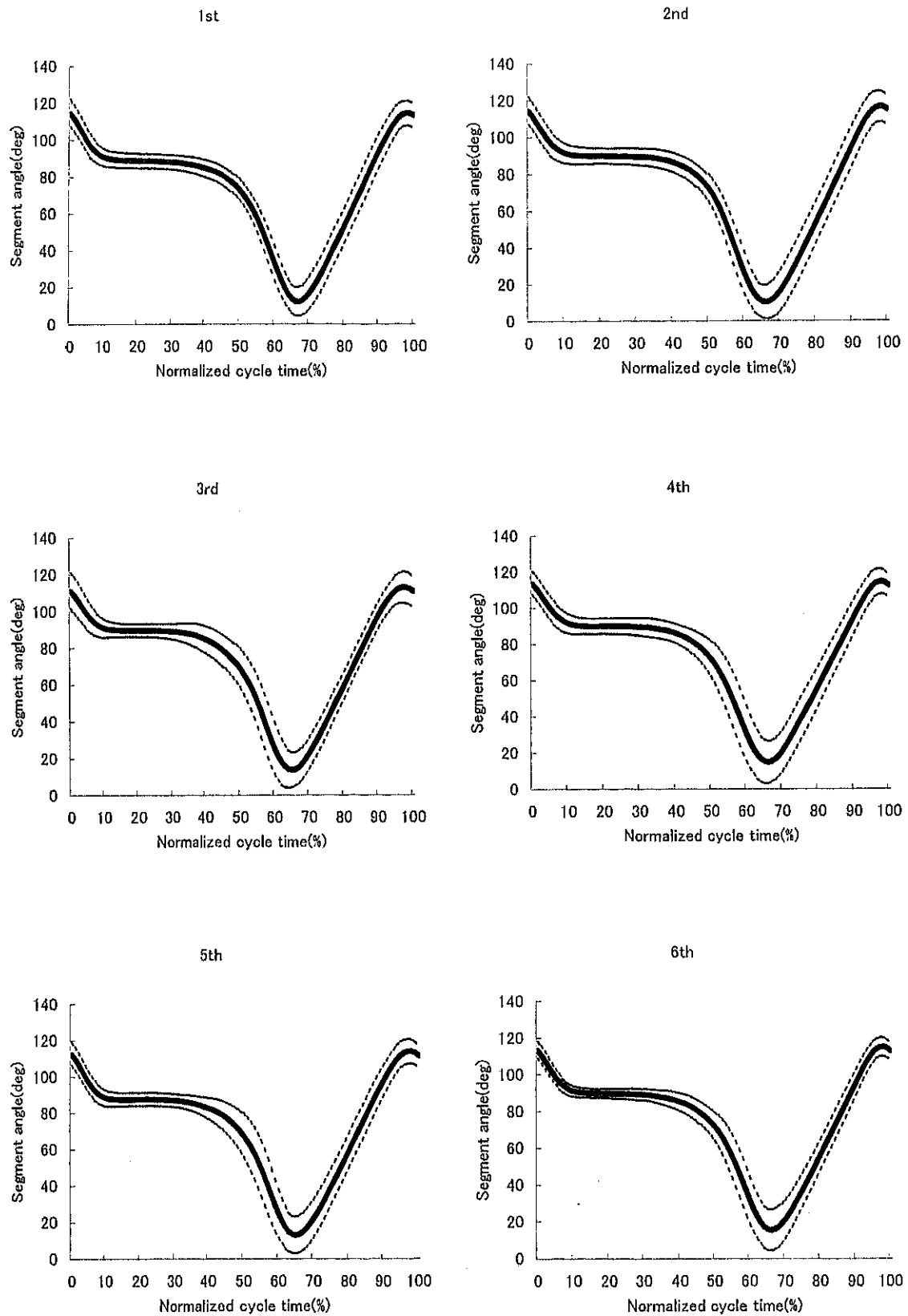


Figure 18-1 Averaged patterns of the foot angle : Girls

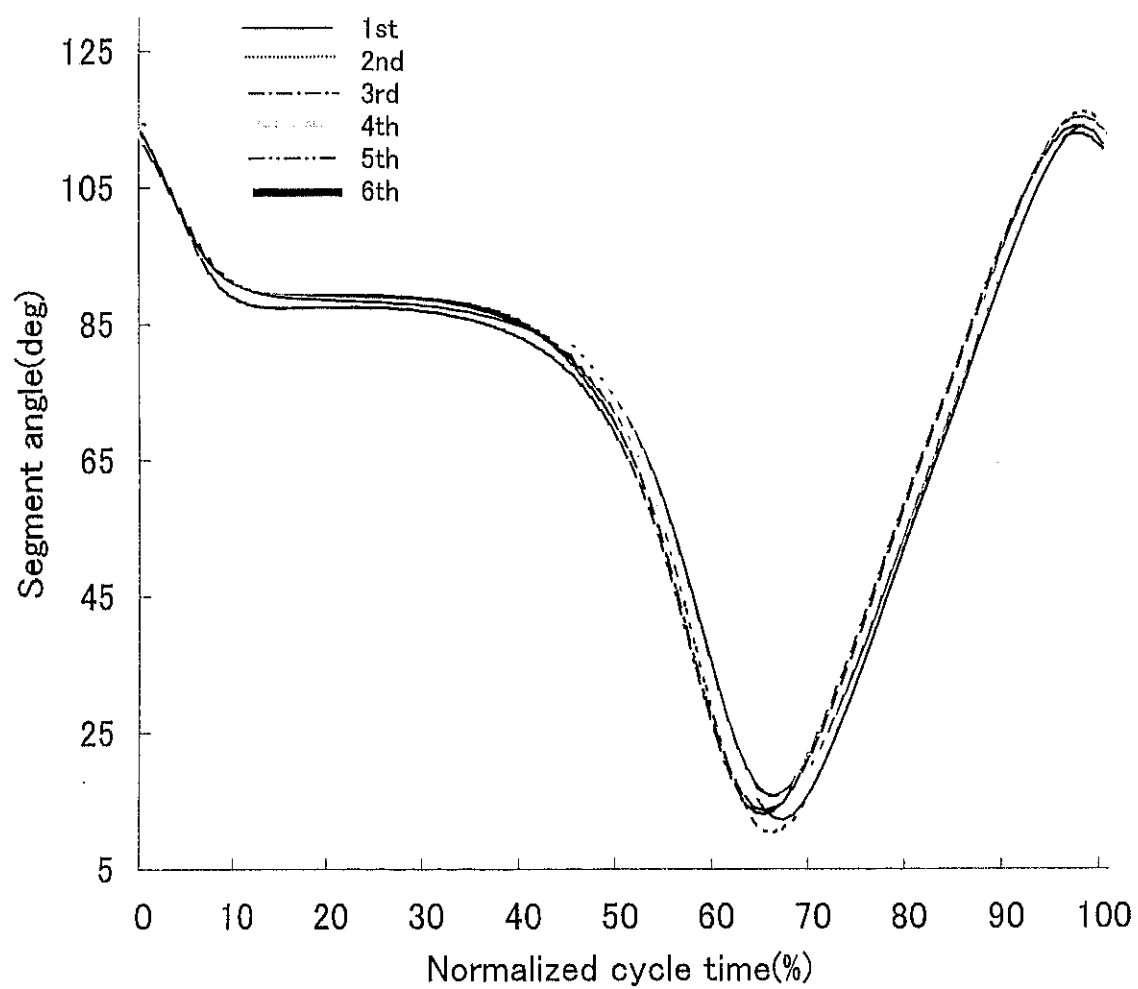


Figure 18-2 Comparison of the foot angle : Girls

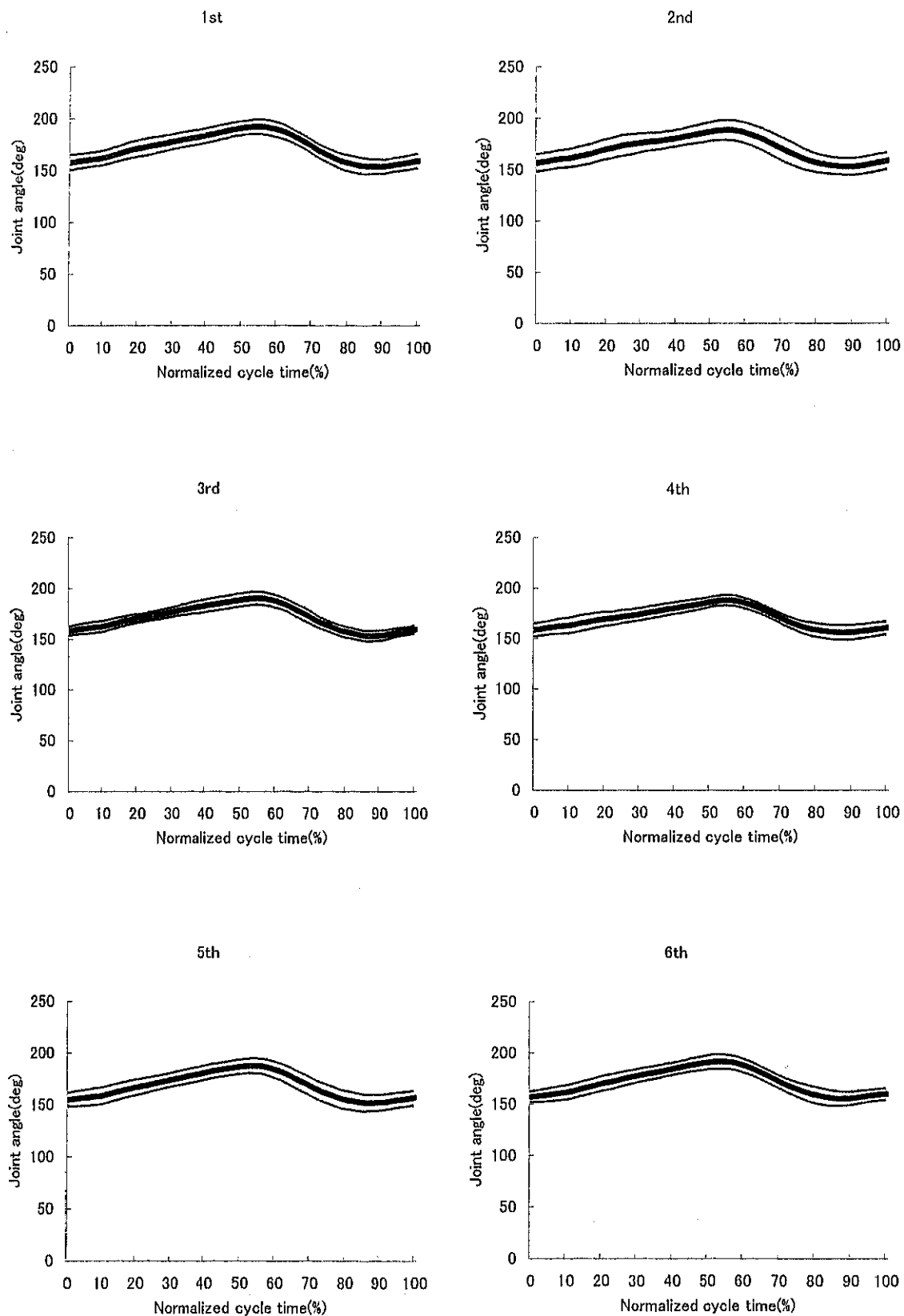


Figure 19-1 Averaged patterns of the hip joint angle : Boys

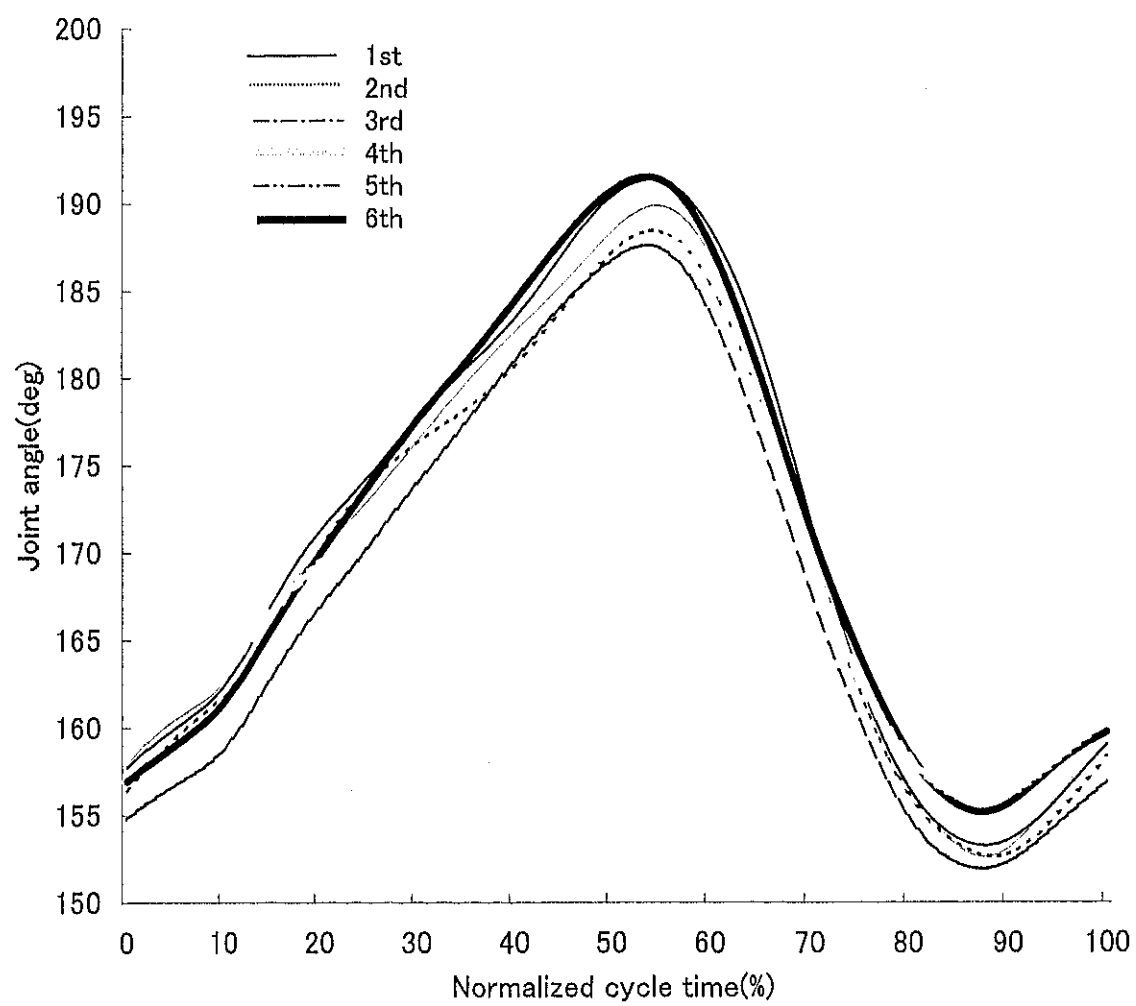


Figure 19-2 Comparison of the hip joint angle : Boys

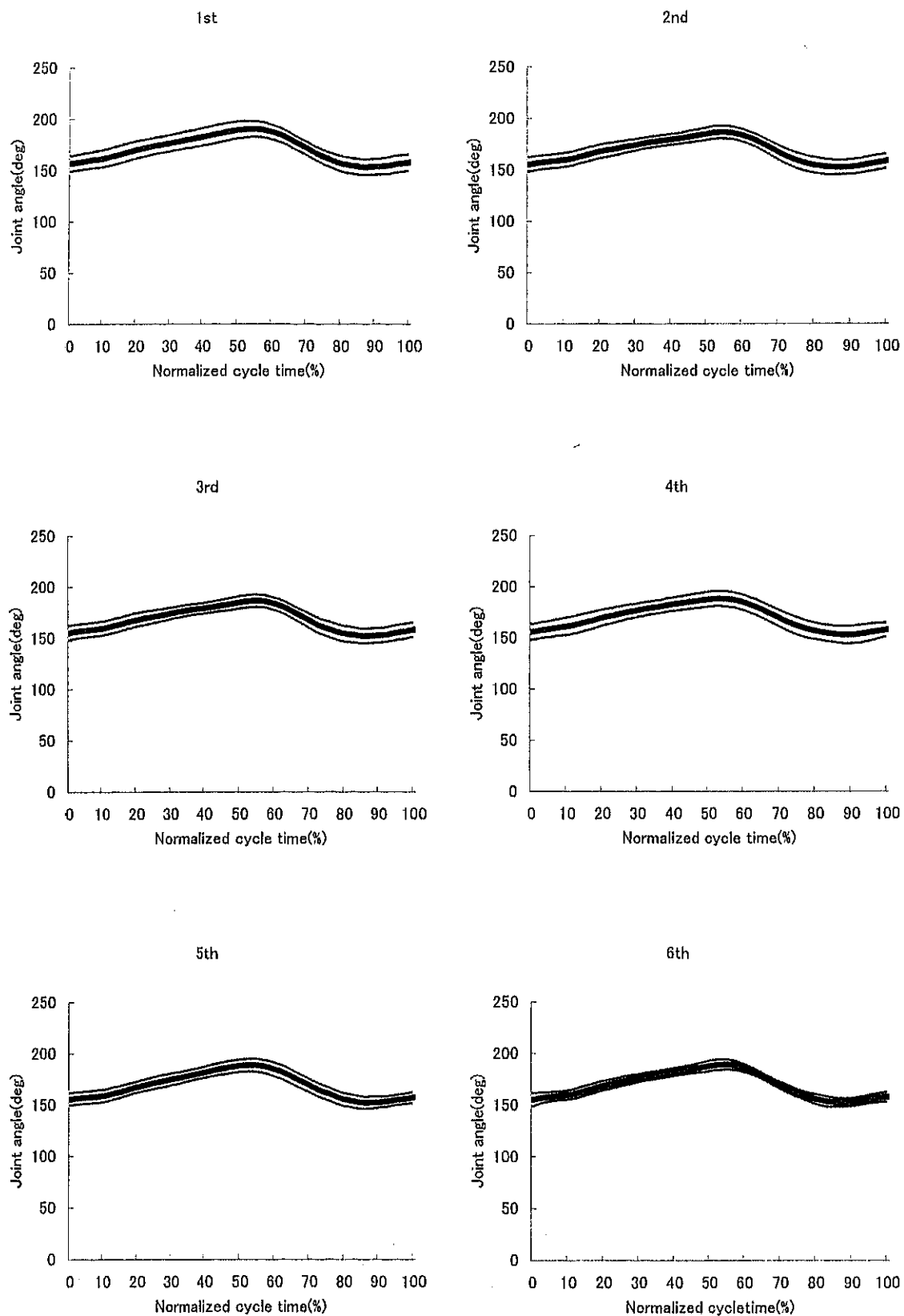


Figure 20-1 Averaged patterns of the hip joint angle : Girls

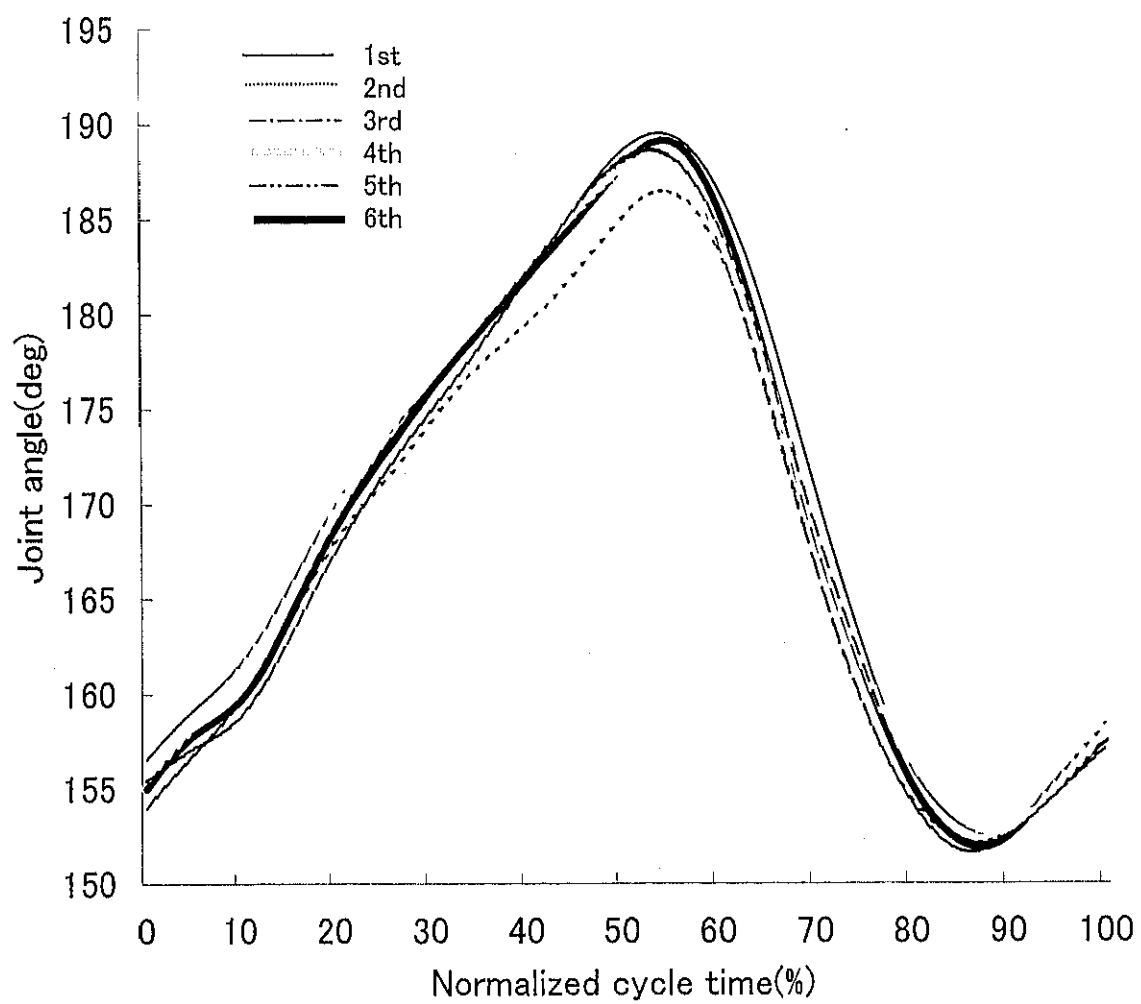


Figure 20-2 Comparison of the hip joint angle : Girls

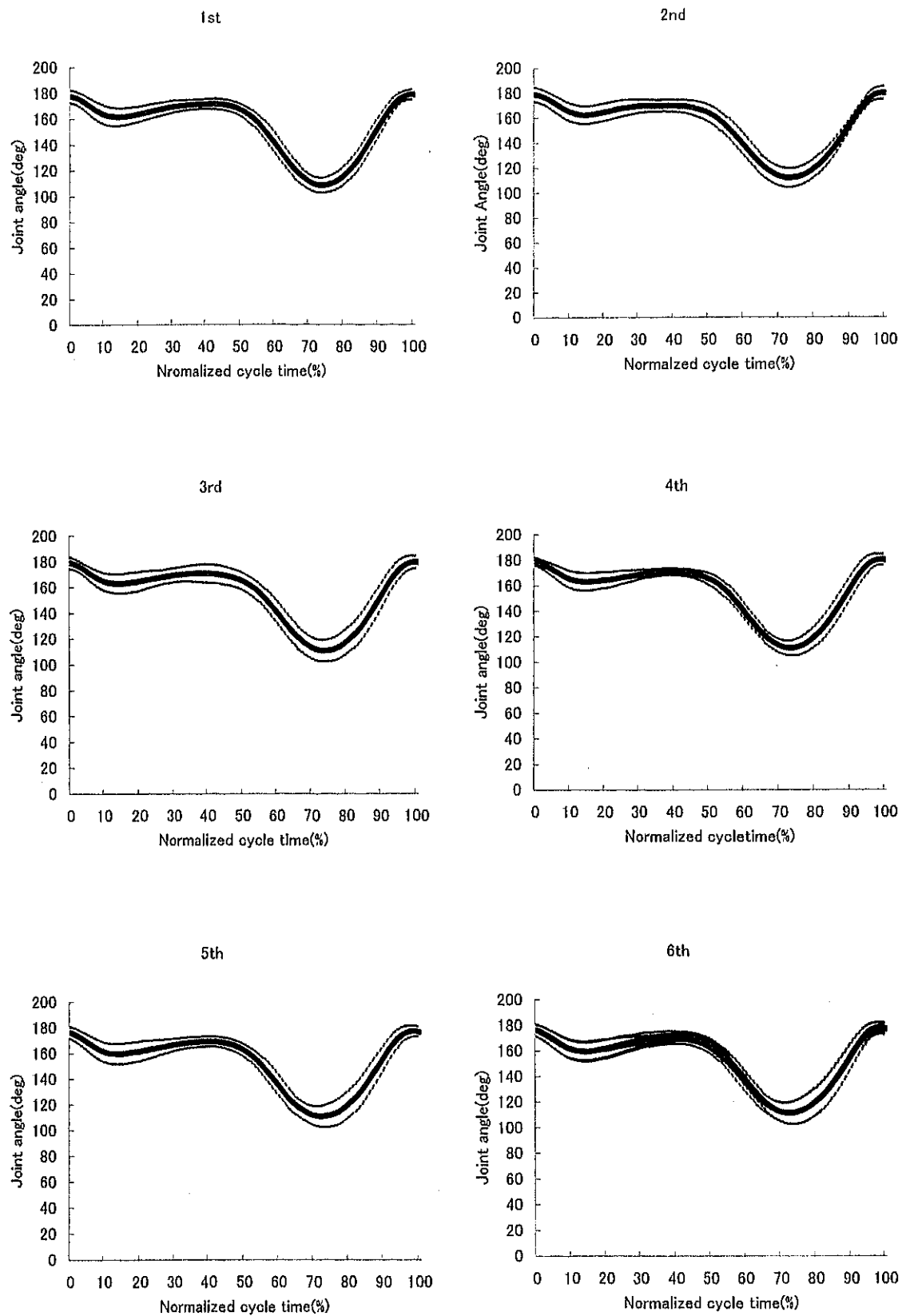


Figure 21-1 Averaged patterns of the knee joint angle : Boys

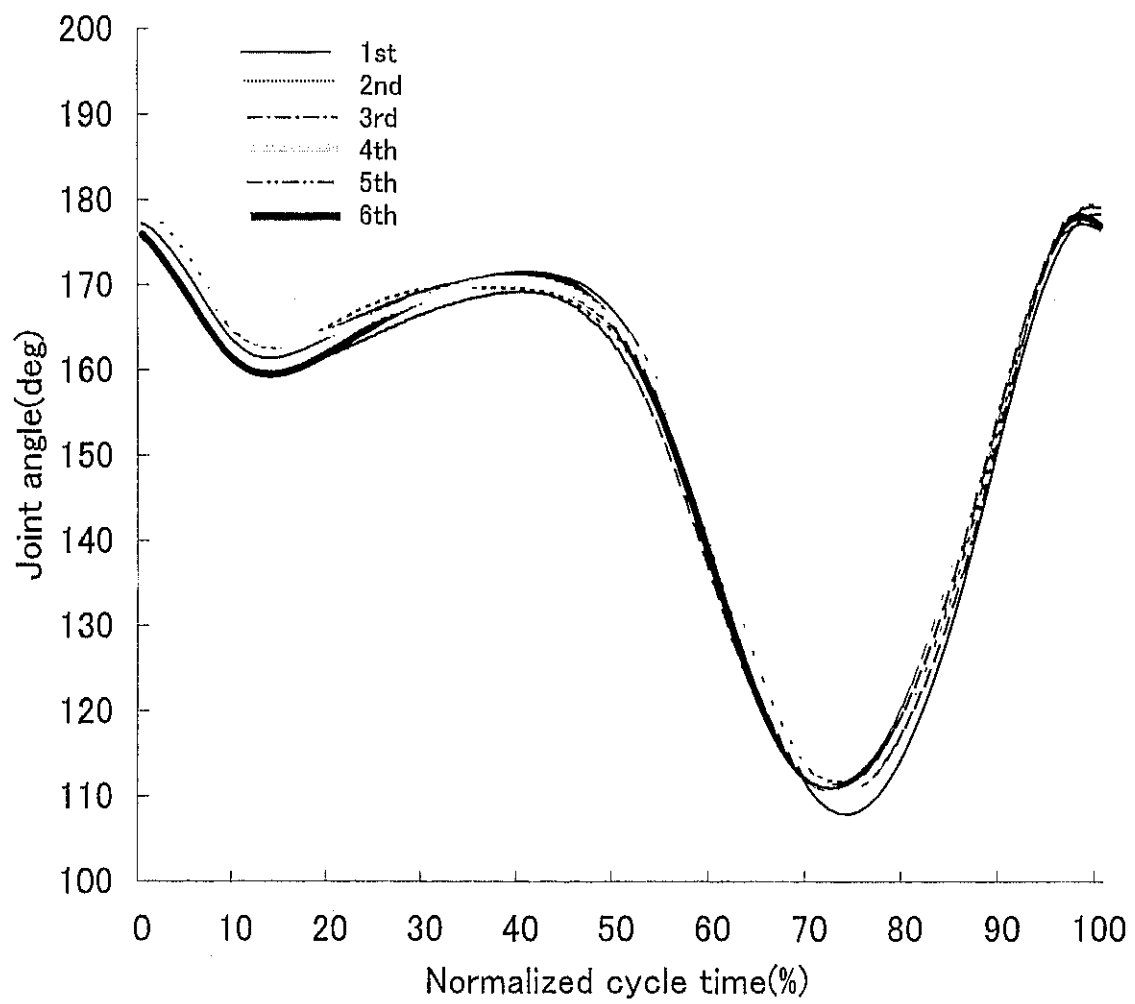


Figure 21-2 Comparison of the knee joint angle : Boys

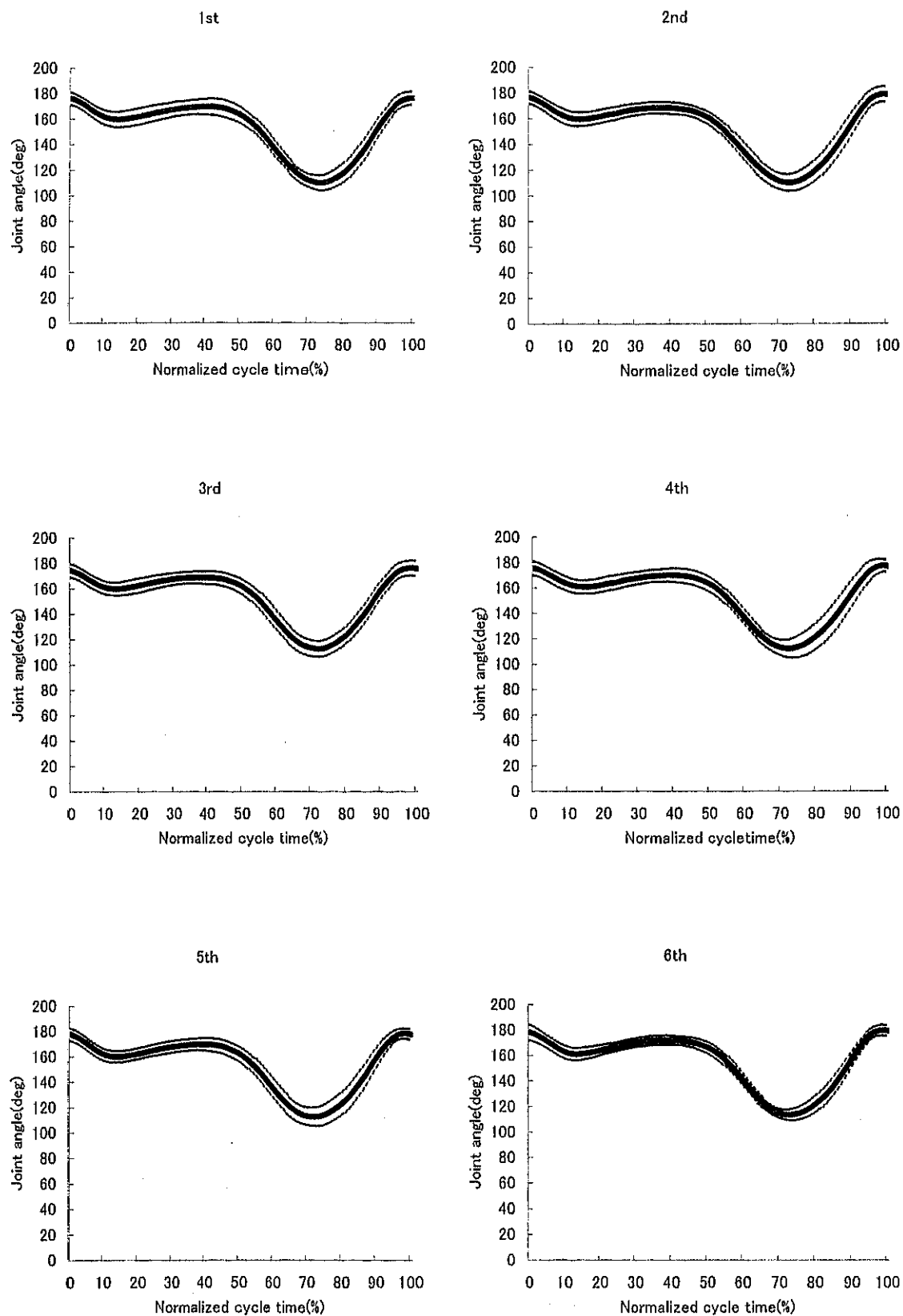


Figure 22-1 Averaged patterns of the knee joint angle : Girls

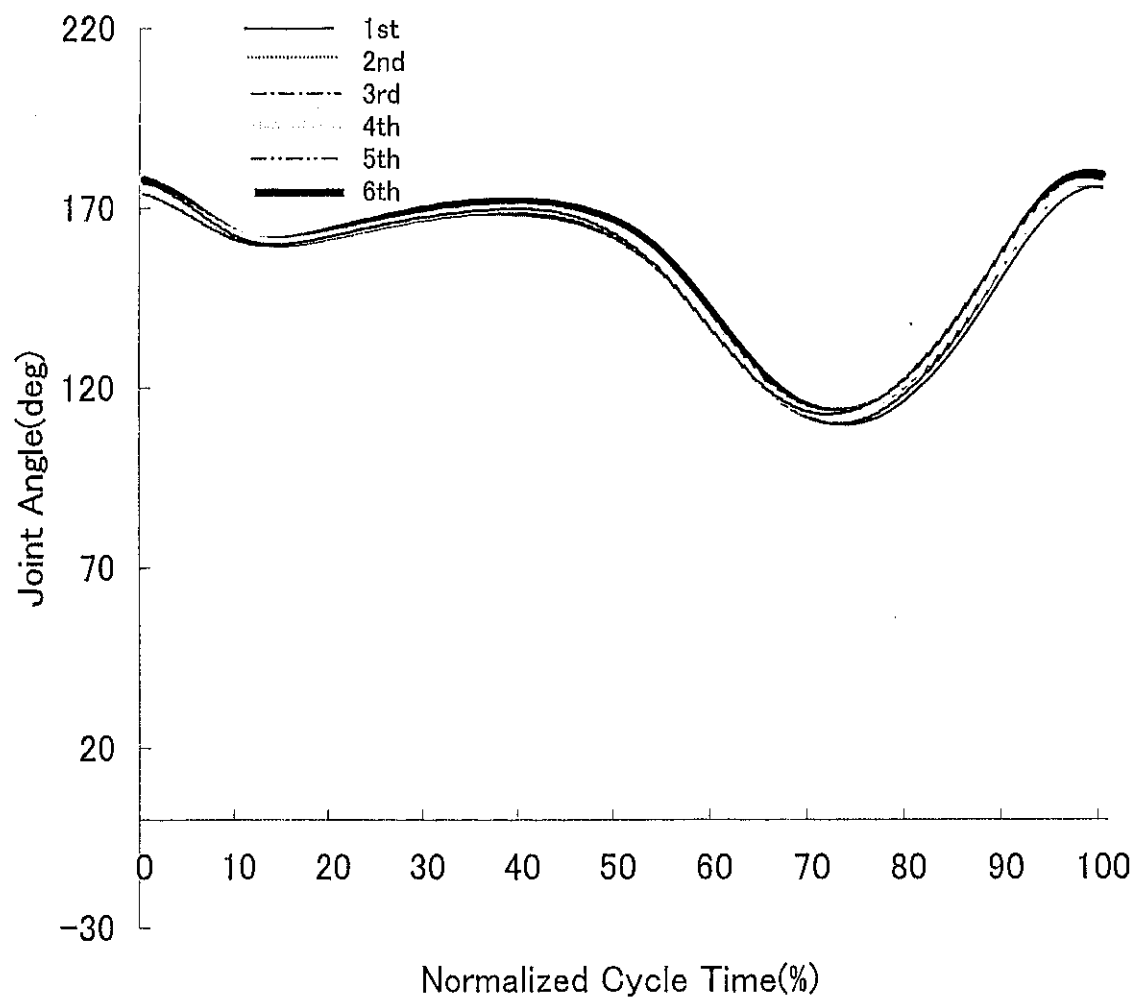


Figure 22-2 Comparison of the knee joint angle : Girls

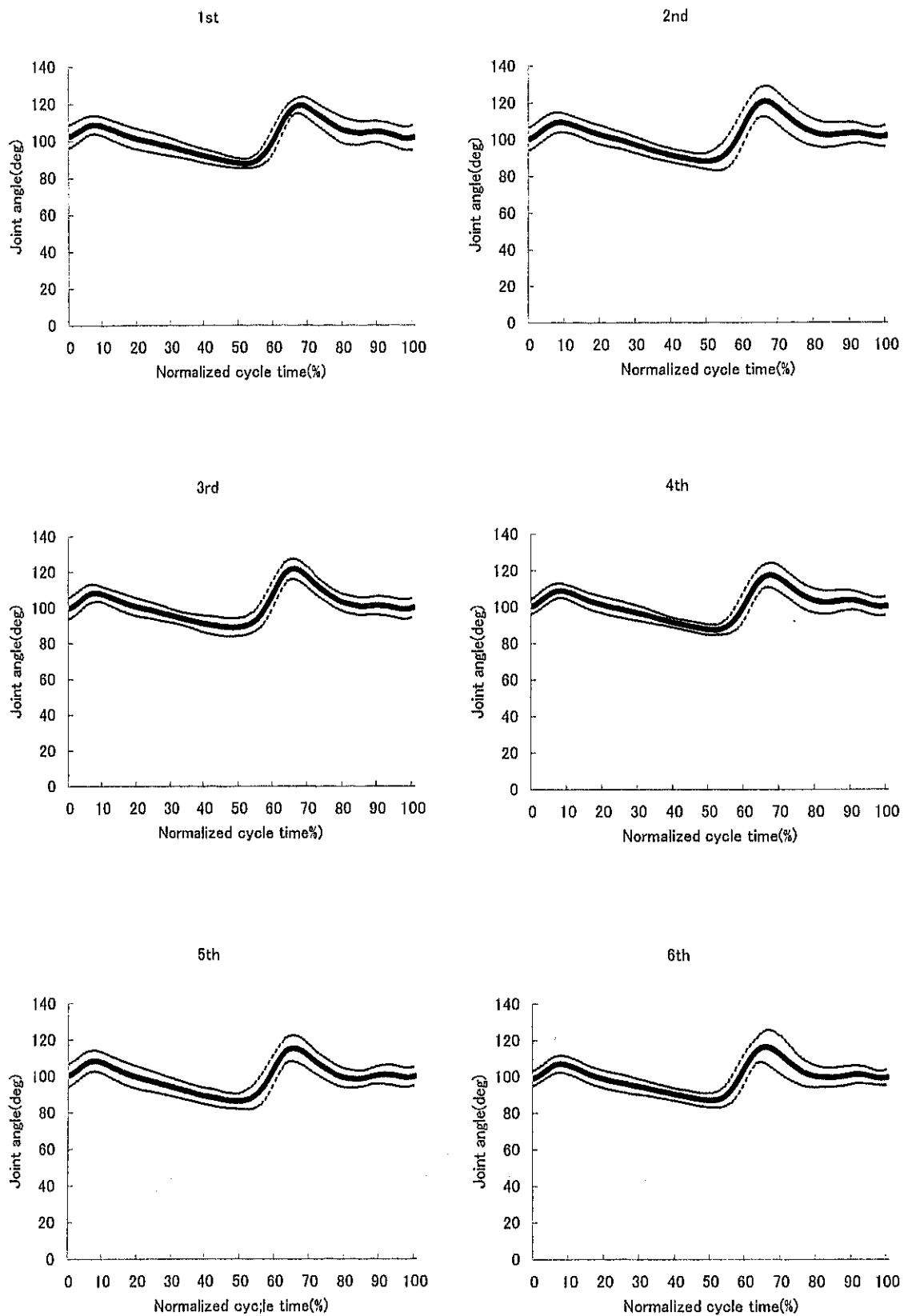


Figure 23-1 Averaged patterns of the ankle joint angle : Boys

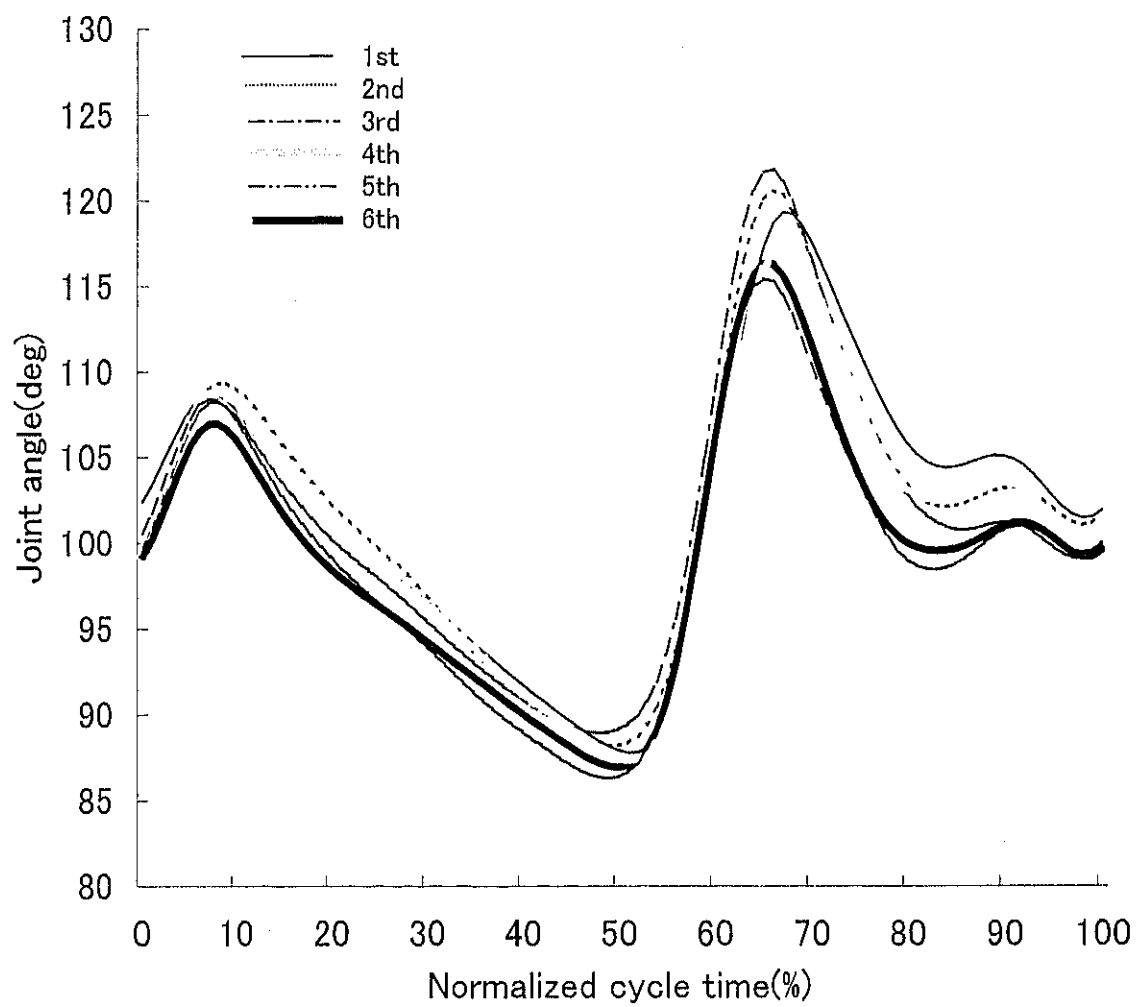


Figure 23-2 Comparison of the ankle joint angle : Boys

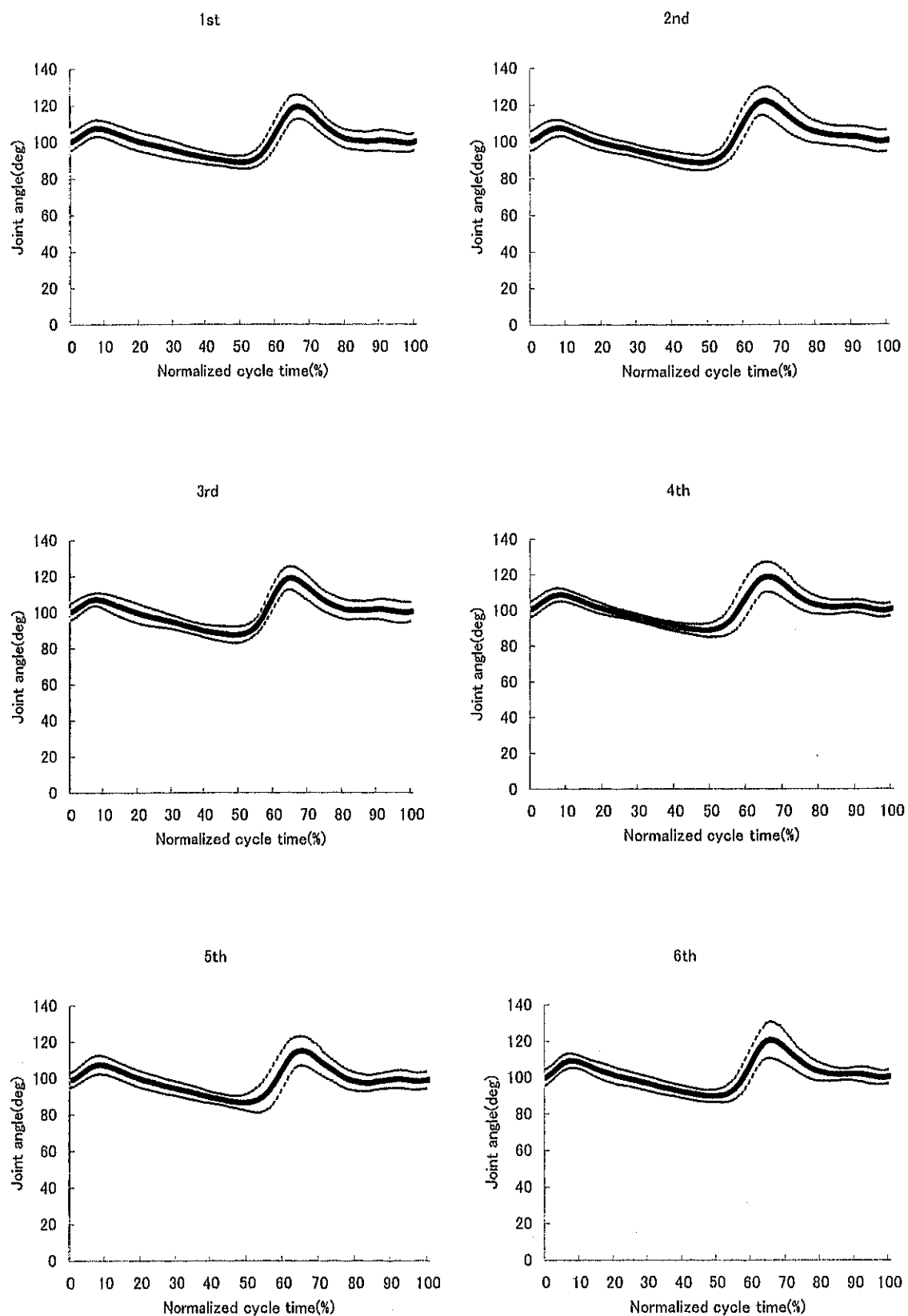


Figure 24-1 Averaged patterns of the ankle joint angle : Girls

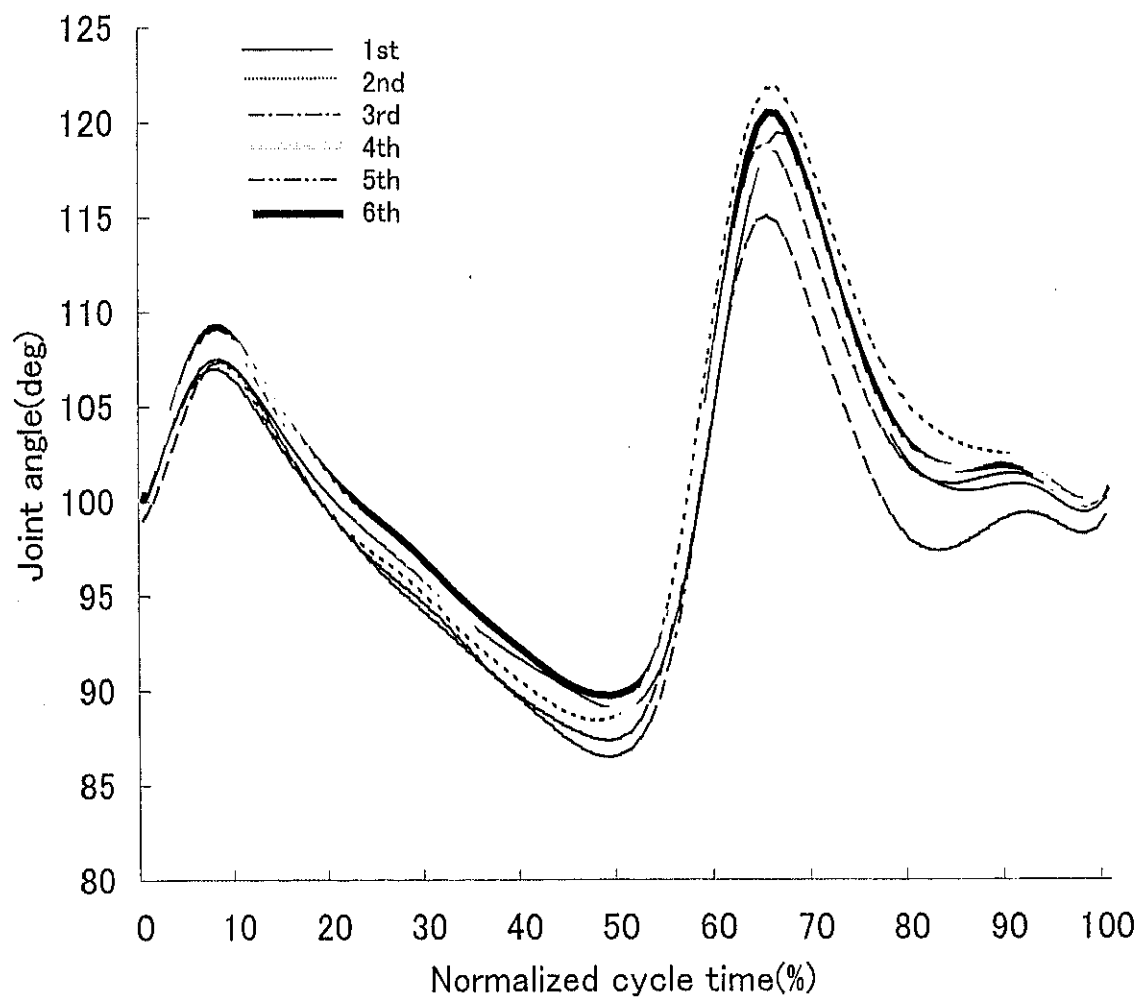


Figure 24-2 Comparison of the ankle joint angle : Girls

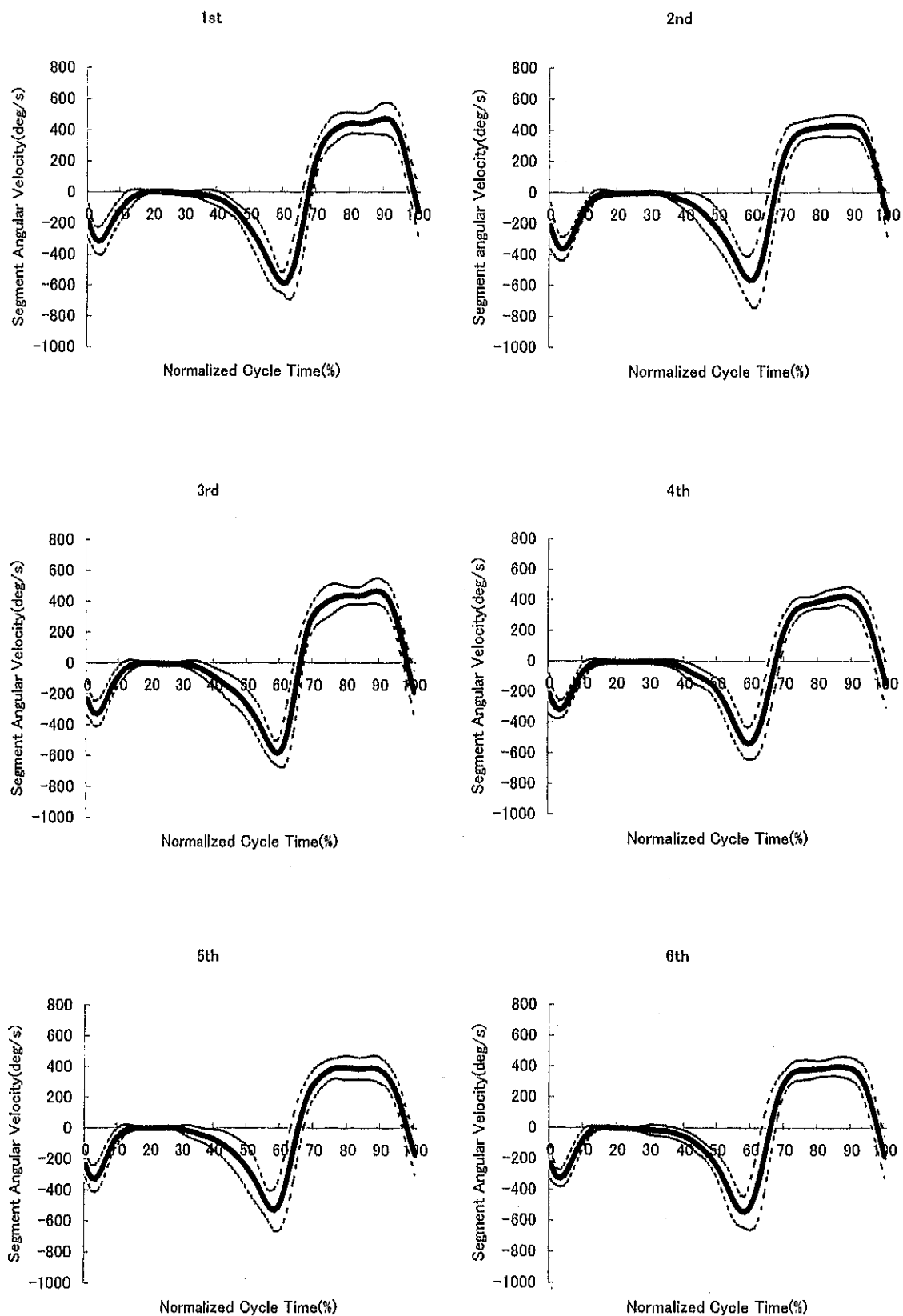


Figure 25-1 Averaged patterns of the trunk angular velocity : Boys

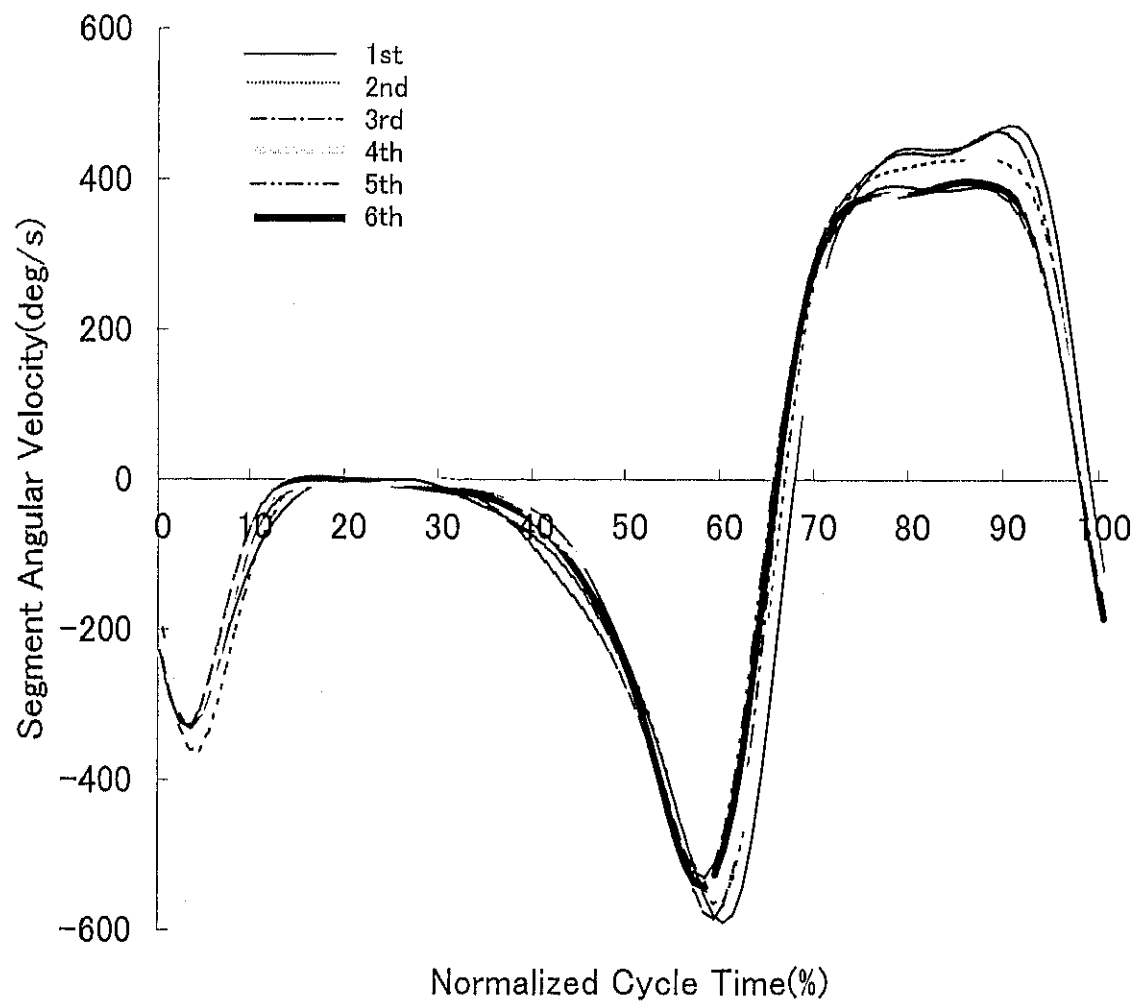


Figure 25-2 Comparison of the trunk angular velocity : Boys

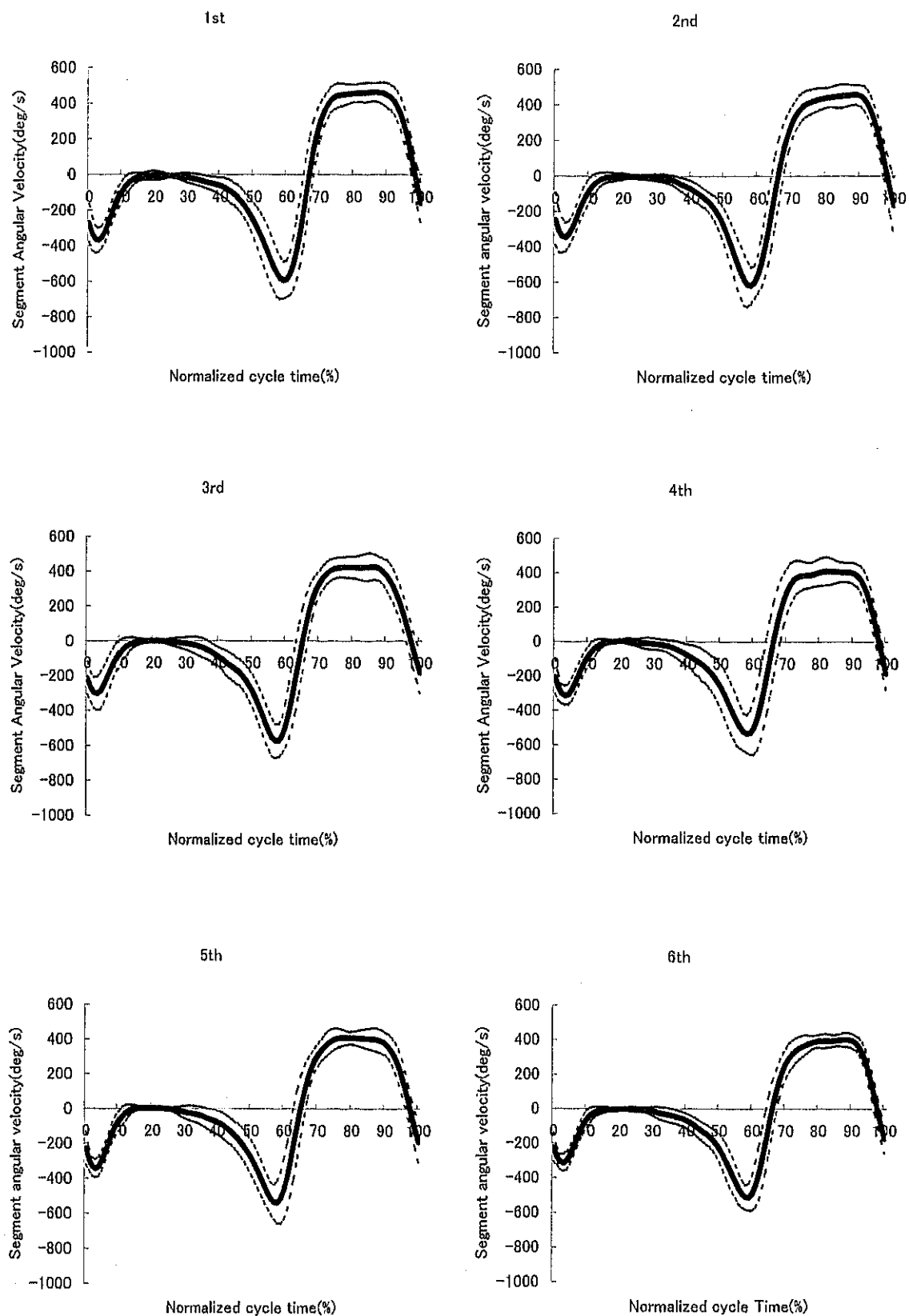


Figure 26-1 Averaged patterns of the trunk angular velocity : Girls

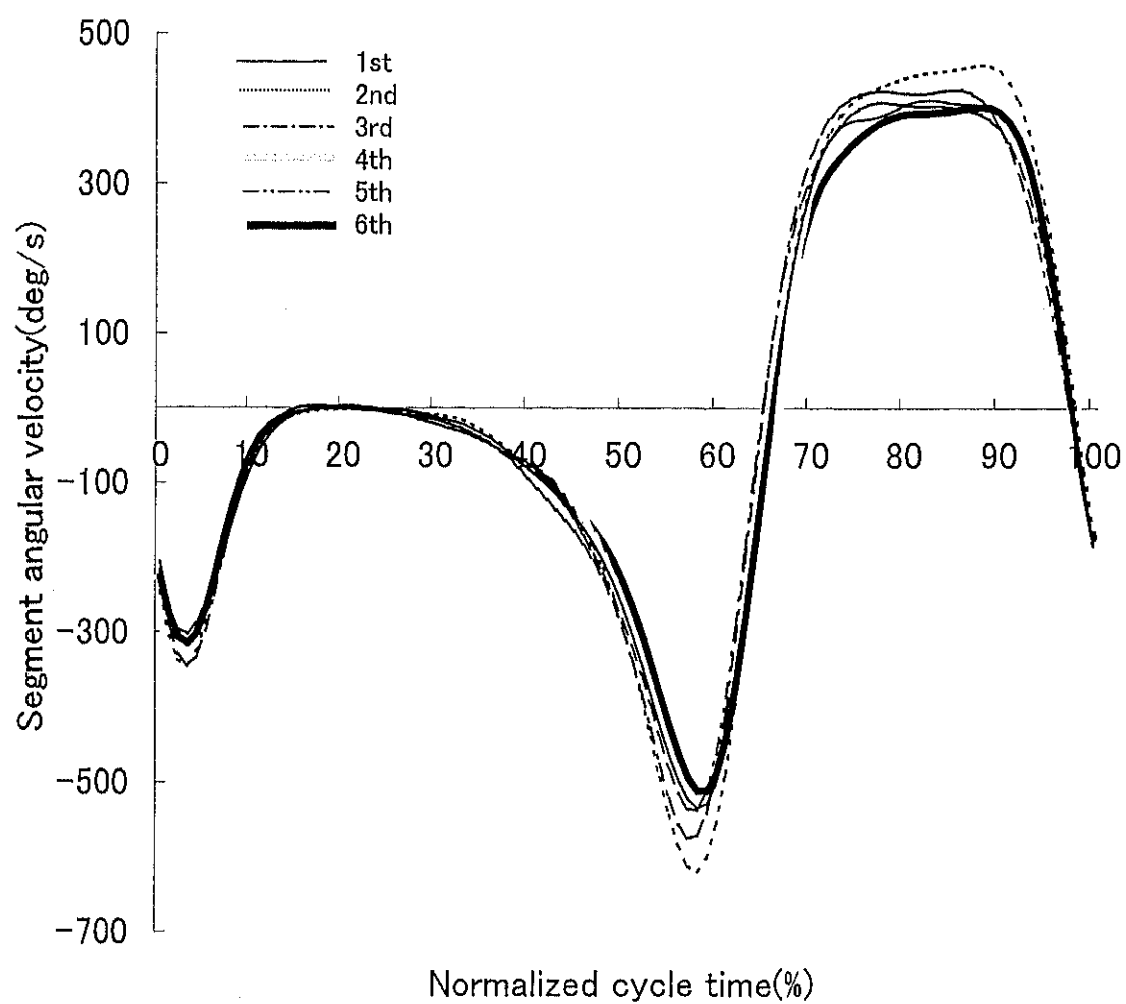


Figure 26-2 Comparison of the trunk angular velocity : Girls

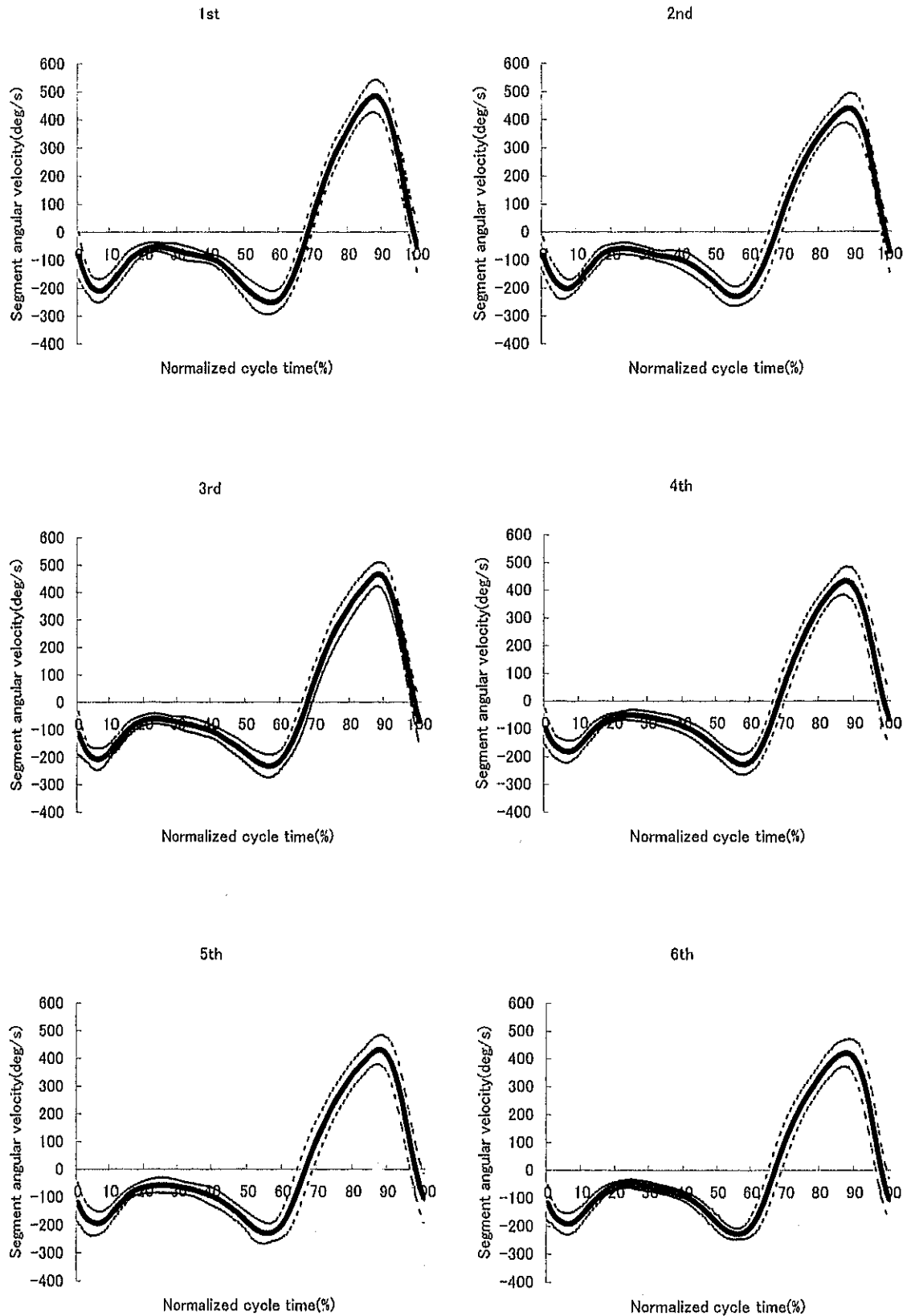


Figure 27-1 Averaged patterns of the thigh angular velocity : Boys

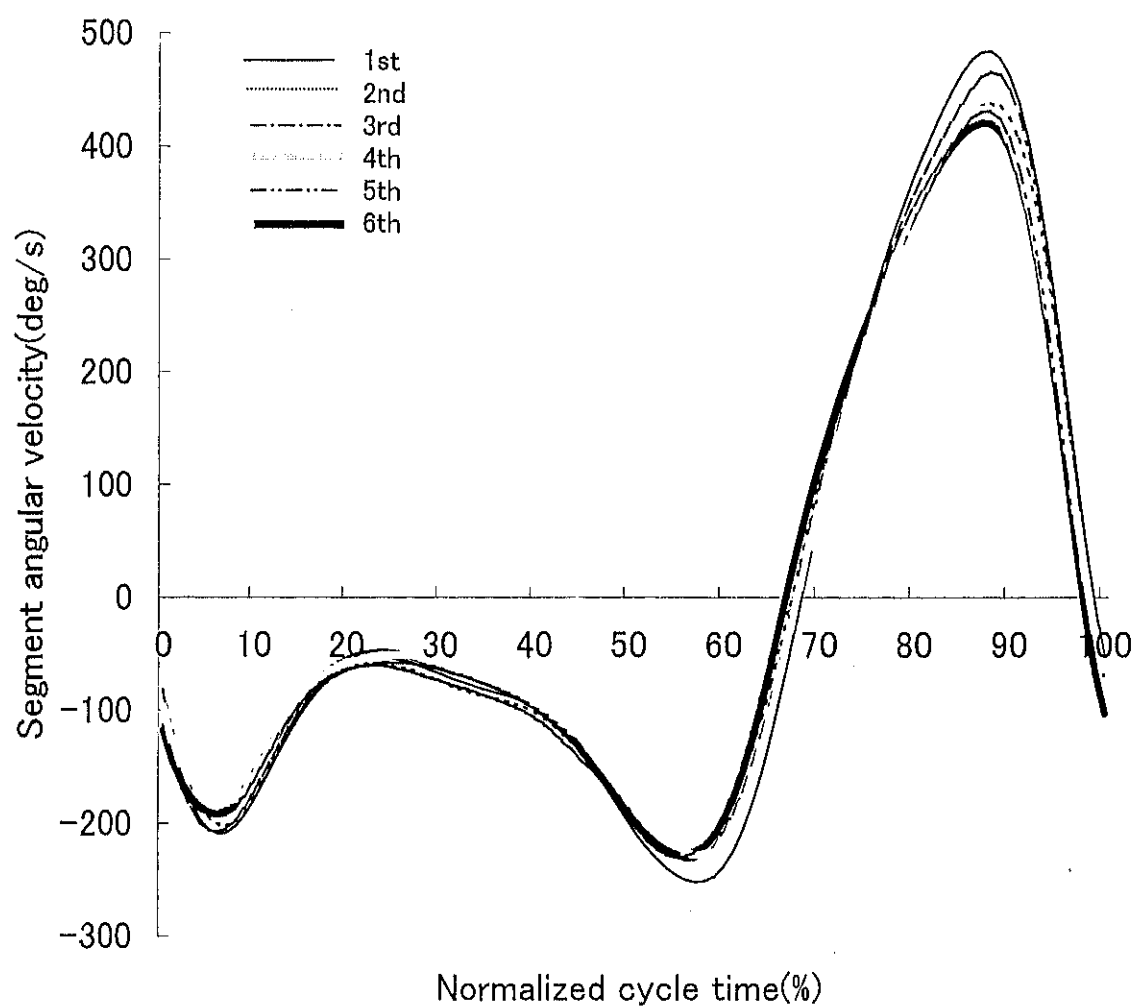


Figure 27-2 Comparison of the thigh angular velocity : Boys

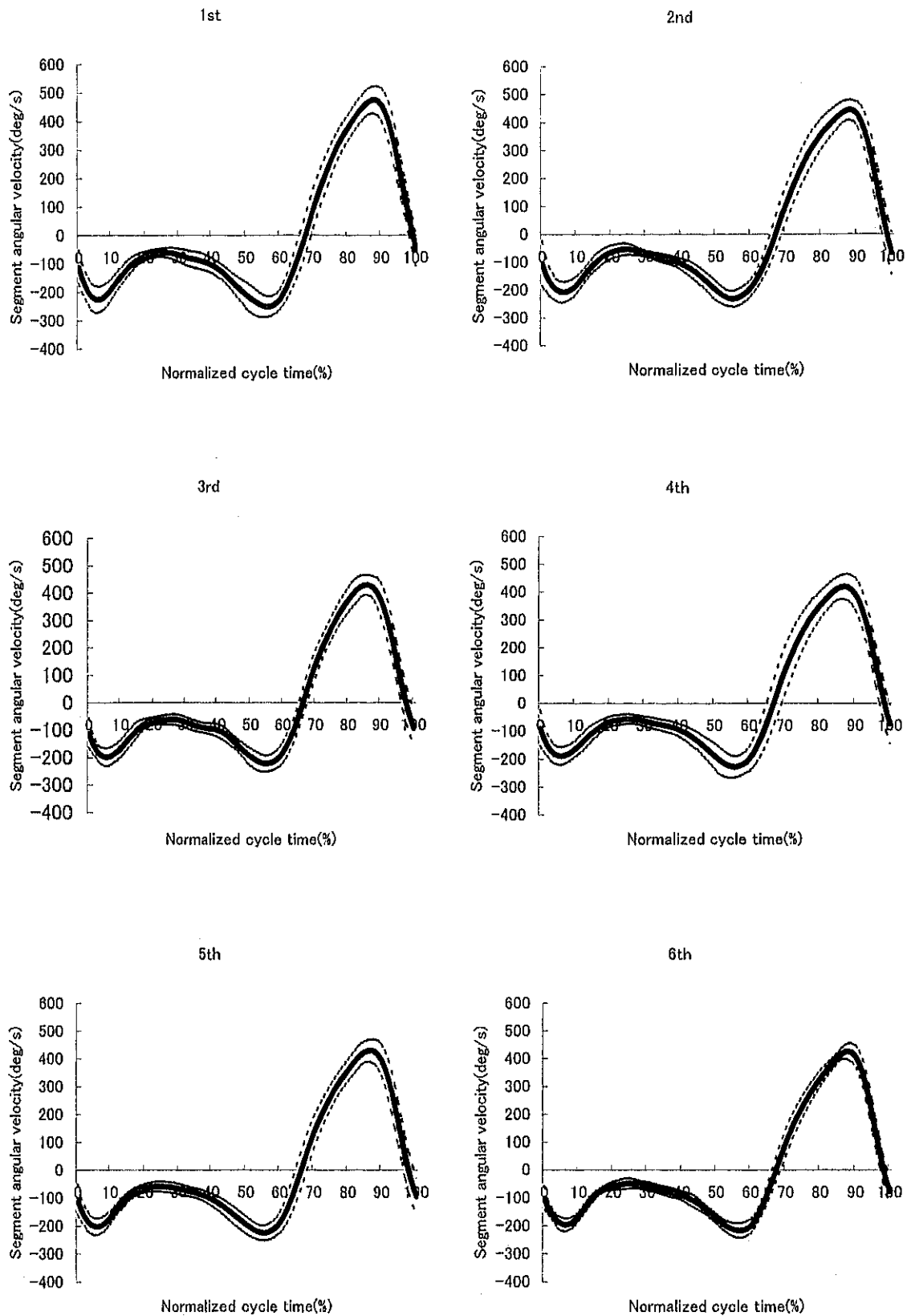


Figure 28-1 Averaged patterns of the thigh angular velocity : Girls

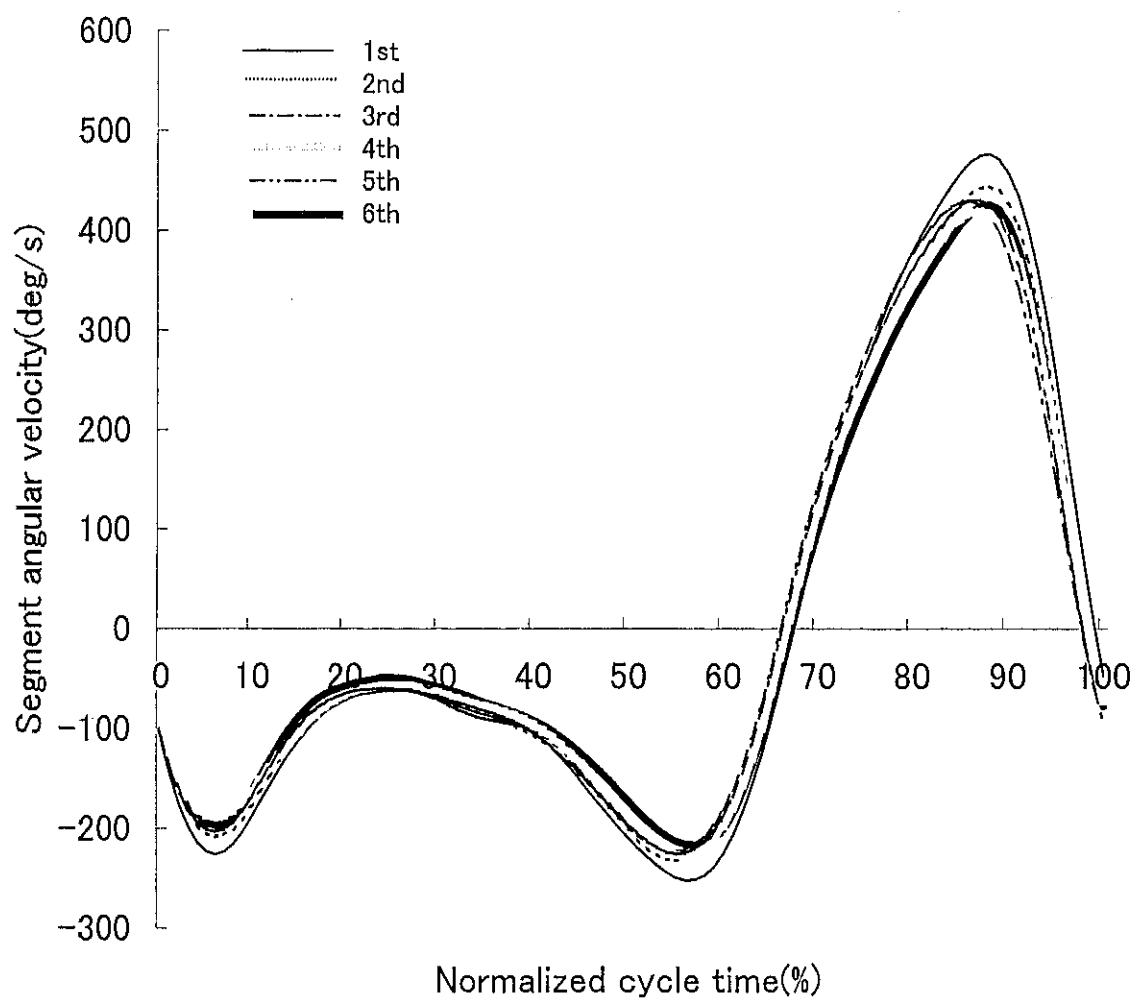


Figure 28-2 Comparison of the thigh angular velocity : Girls

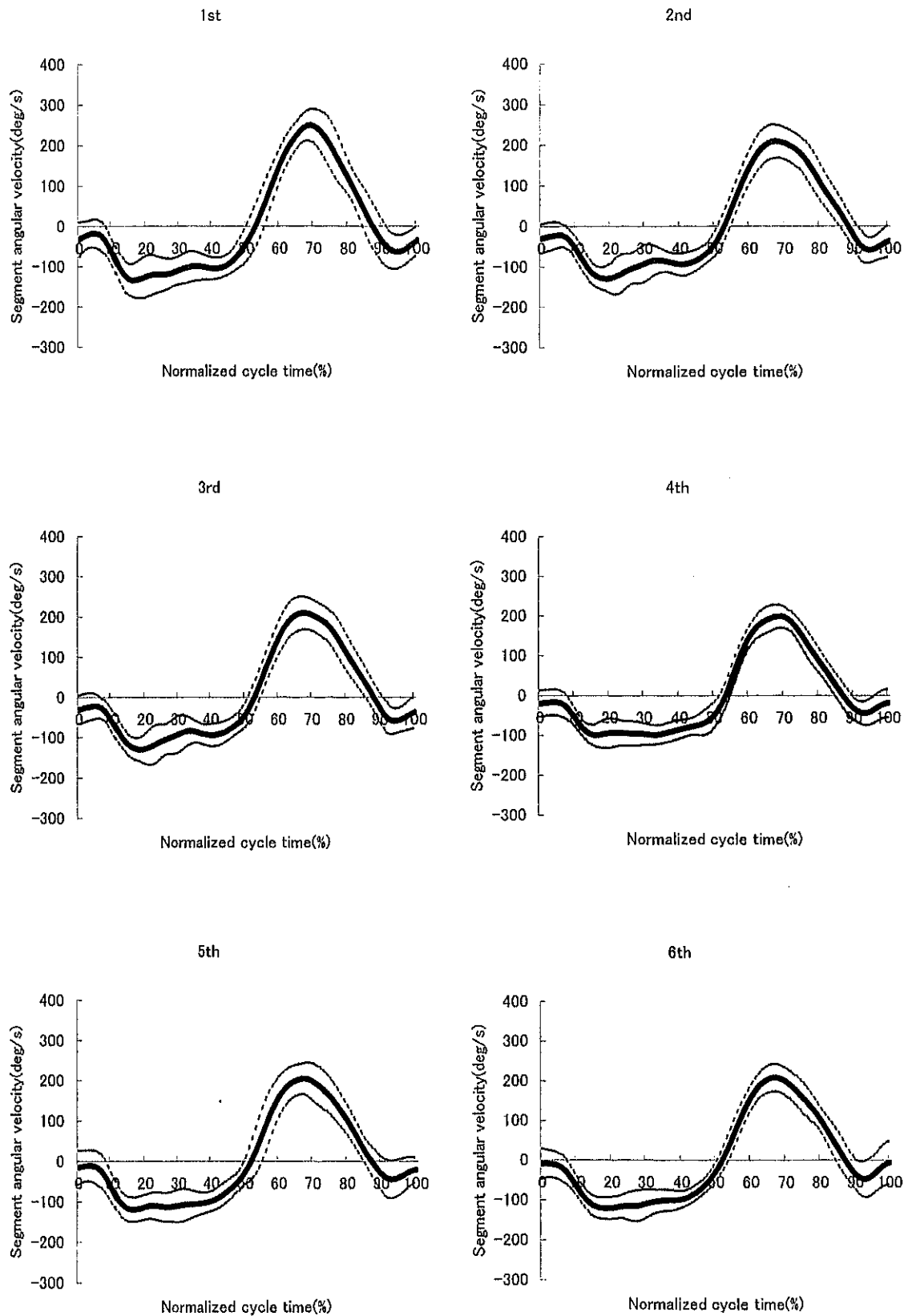


Figure 29-1 Averaged patterns of the shank angular velocity : Boys

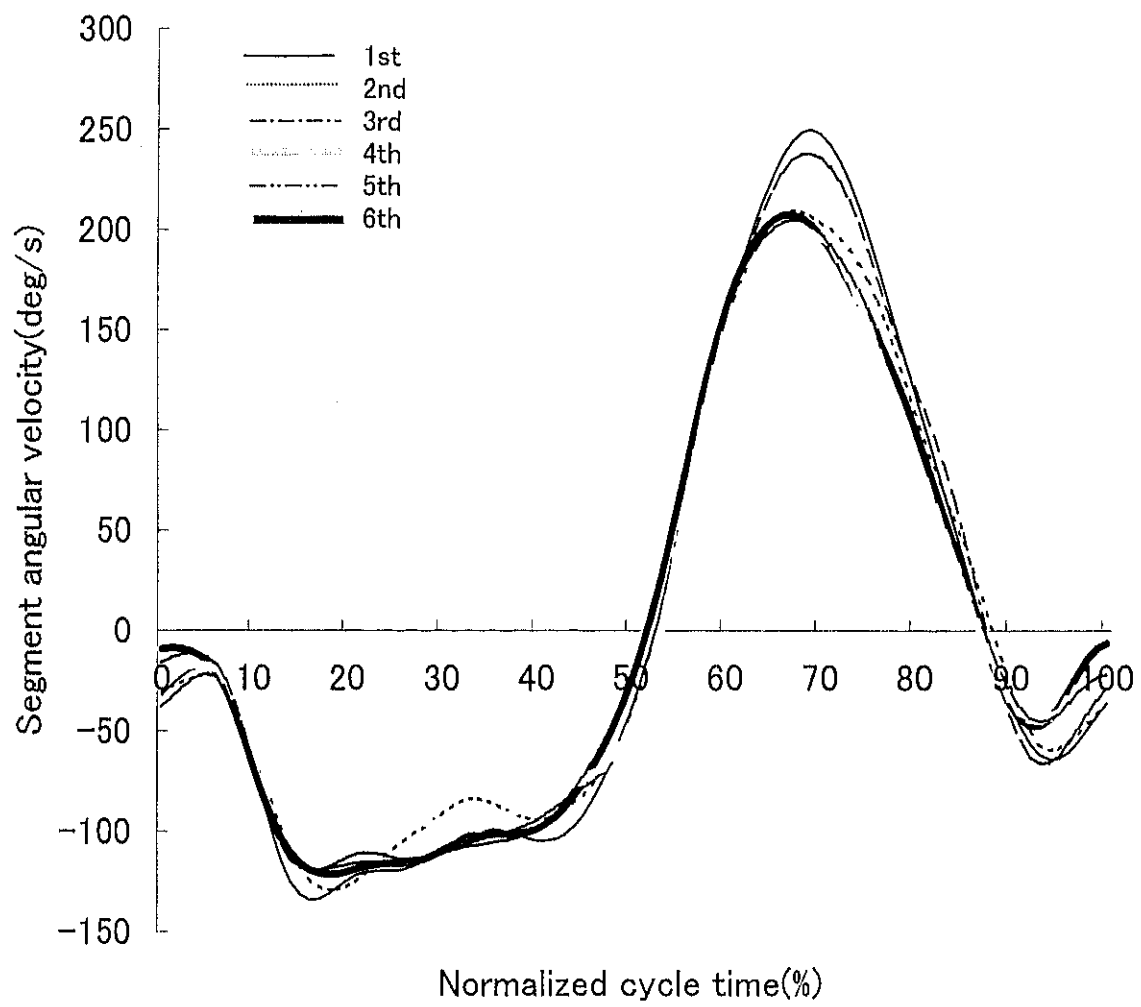


Figure 29-2 Comparison of the shank angular velocity : Boys

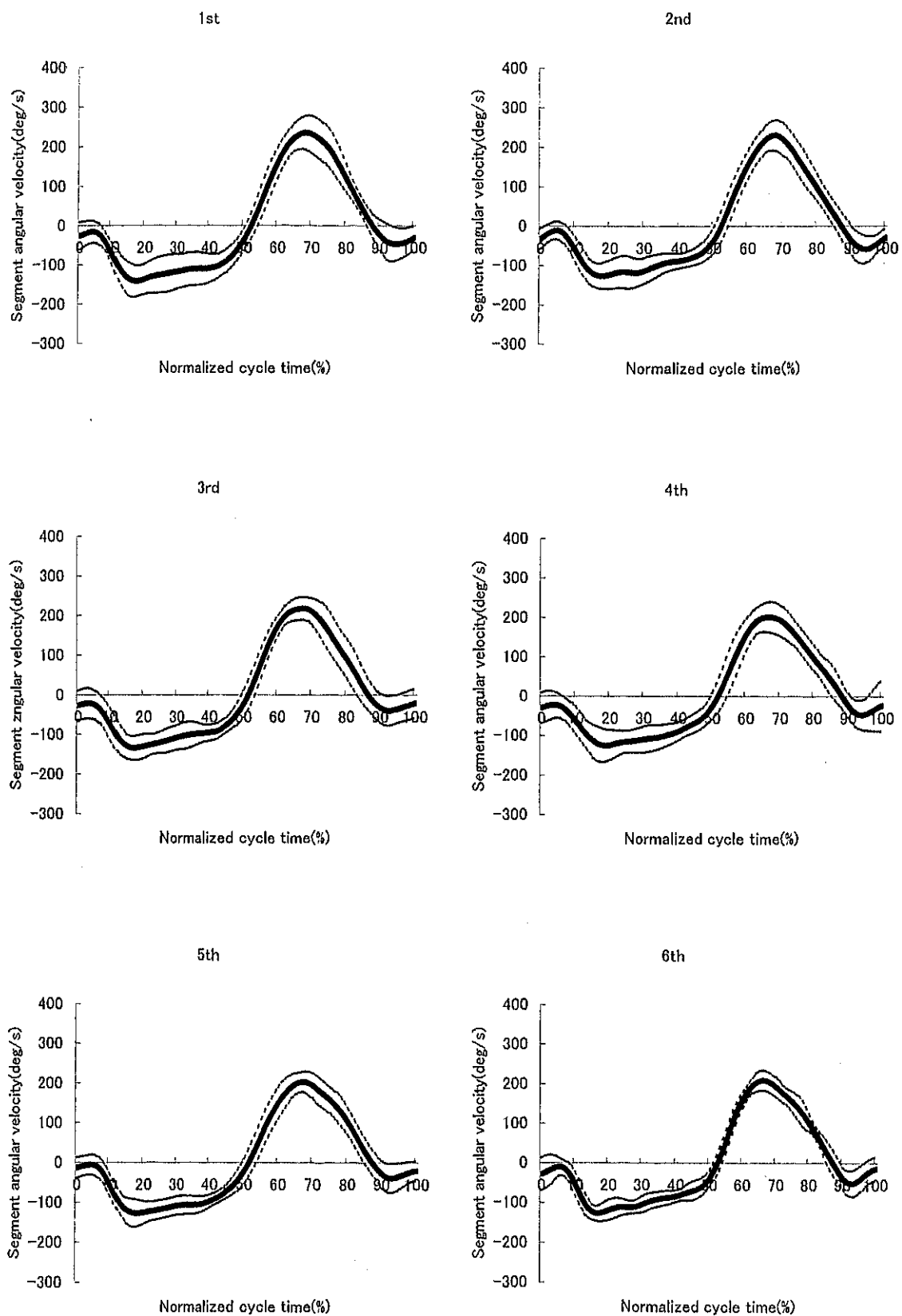


Figure 30-1 Averaged patterns of the shank angular velocity : Girls

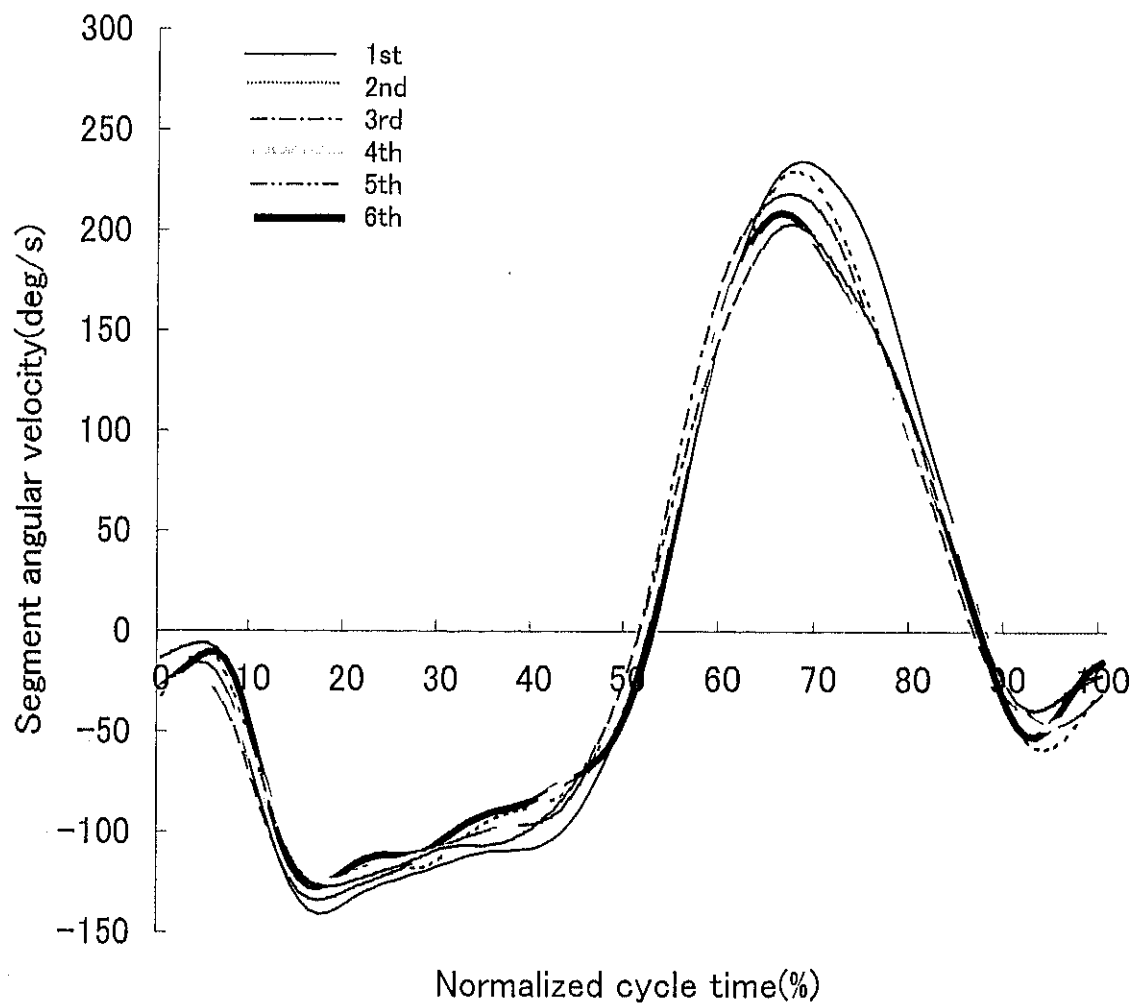


Figure 30-1 Averaged patterns of the shank angular velocity : Girls

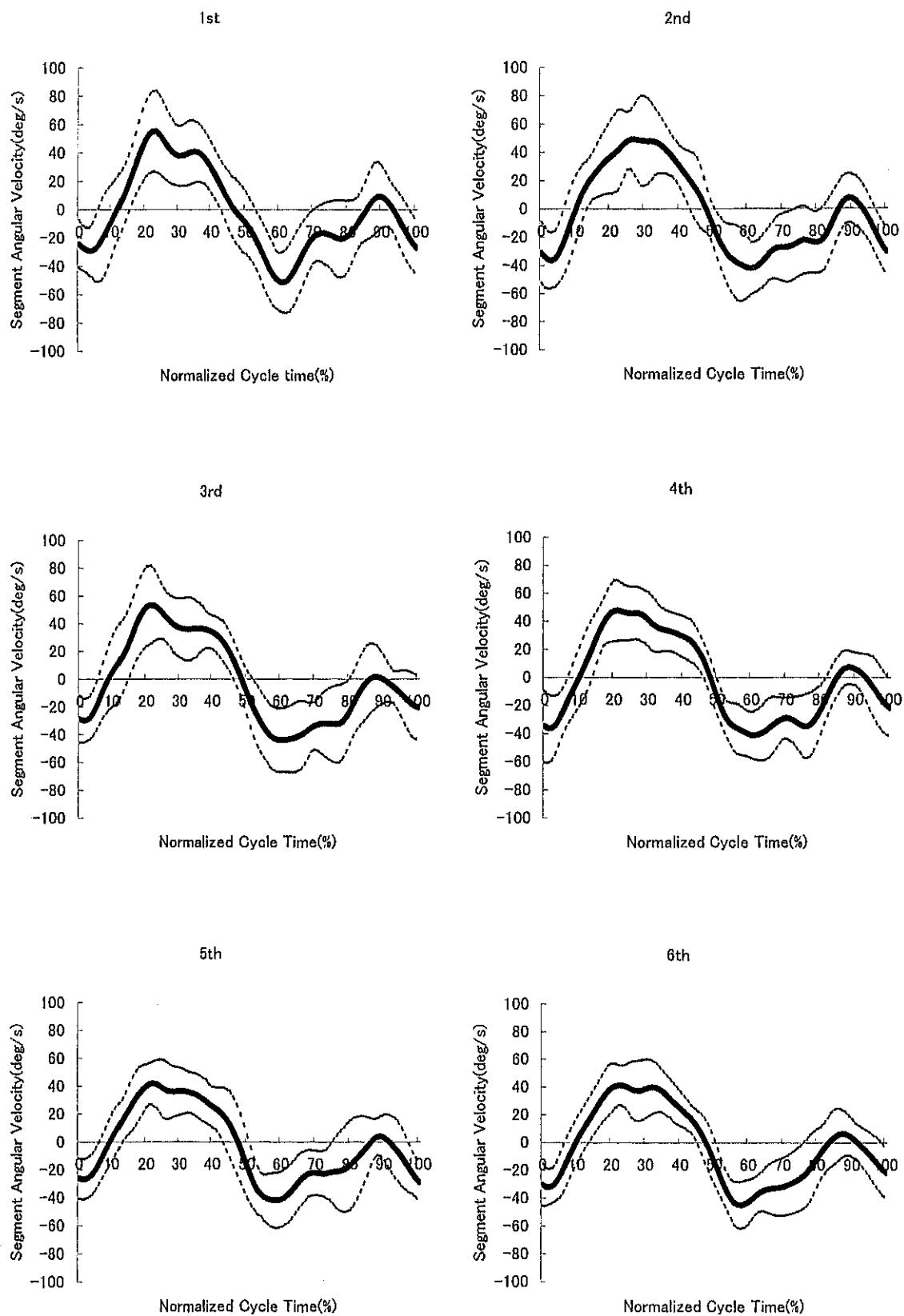


Figure 31-1 Averaged patterns of the foot angular velocity : Boys

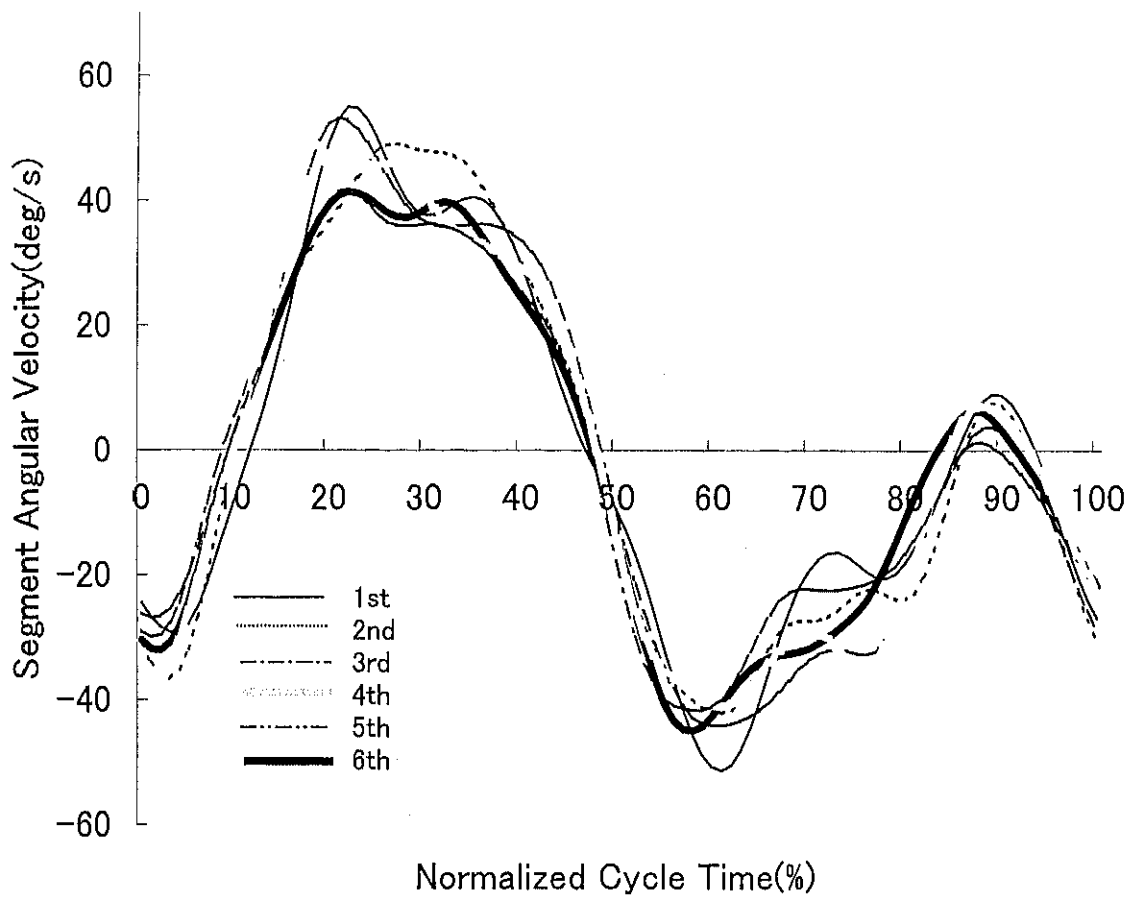


Figure 31-2 Comparison of the foot angular velocity : Boys

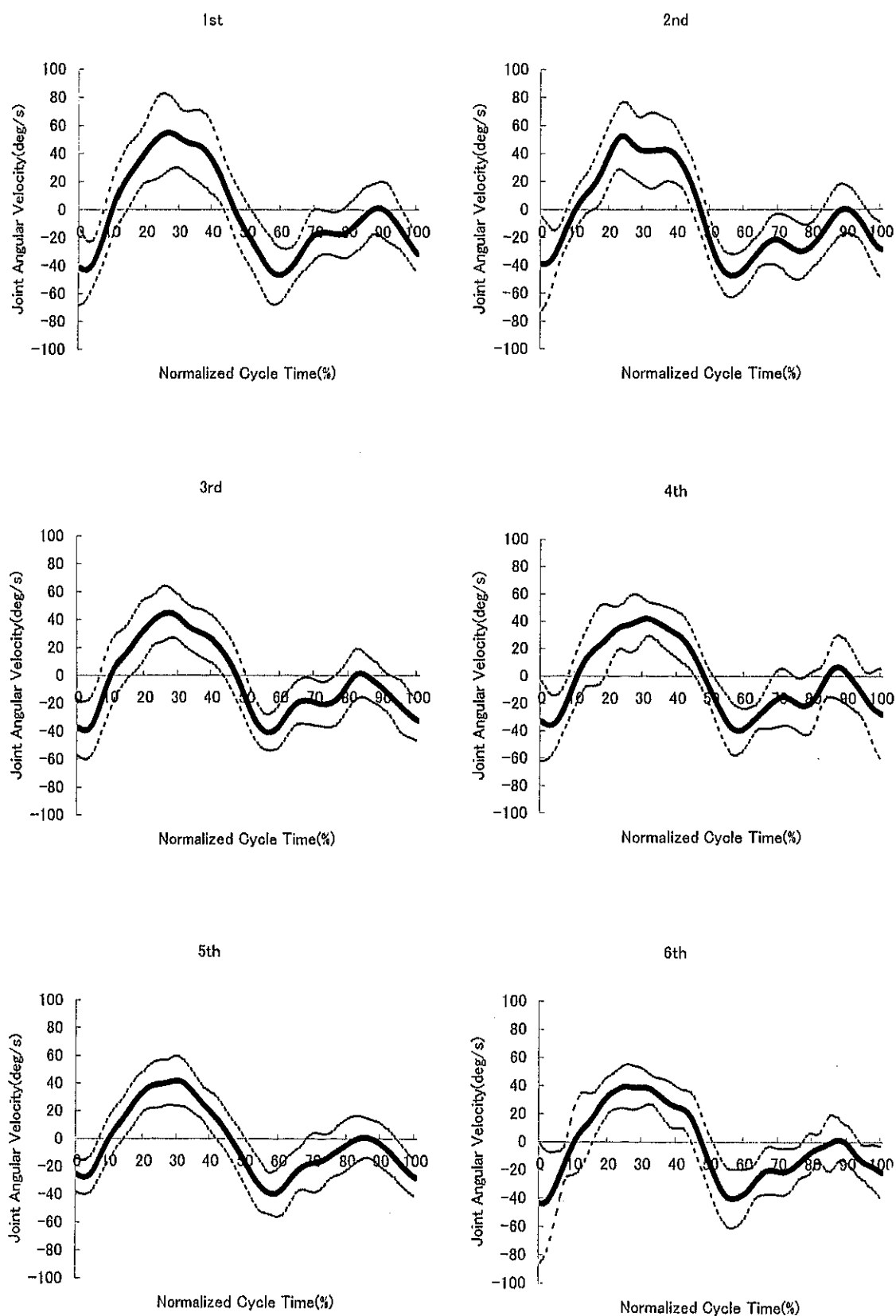


Figure 32-1 Averaged patterns of the foot angular velocity : Girls

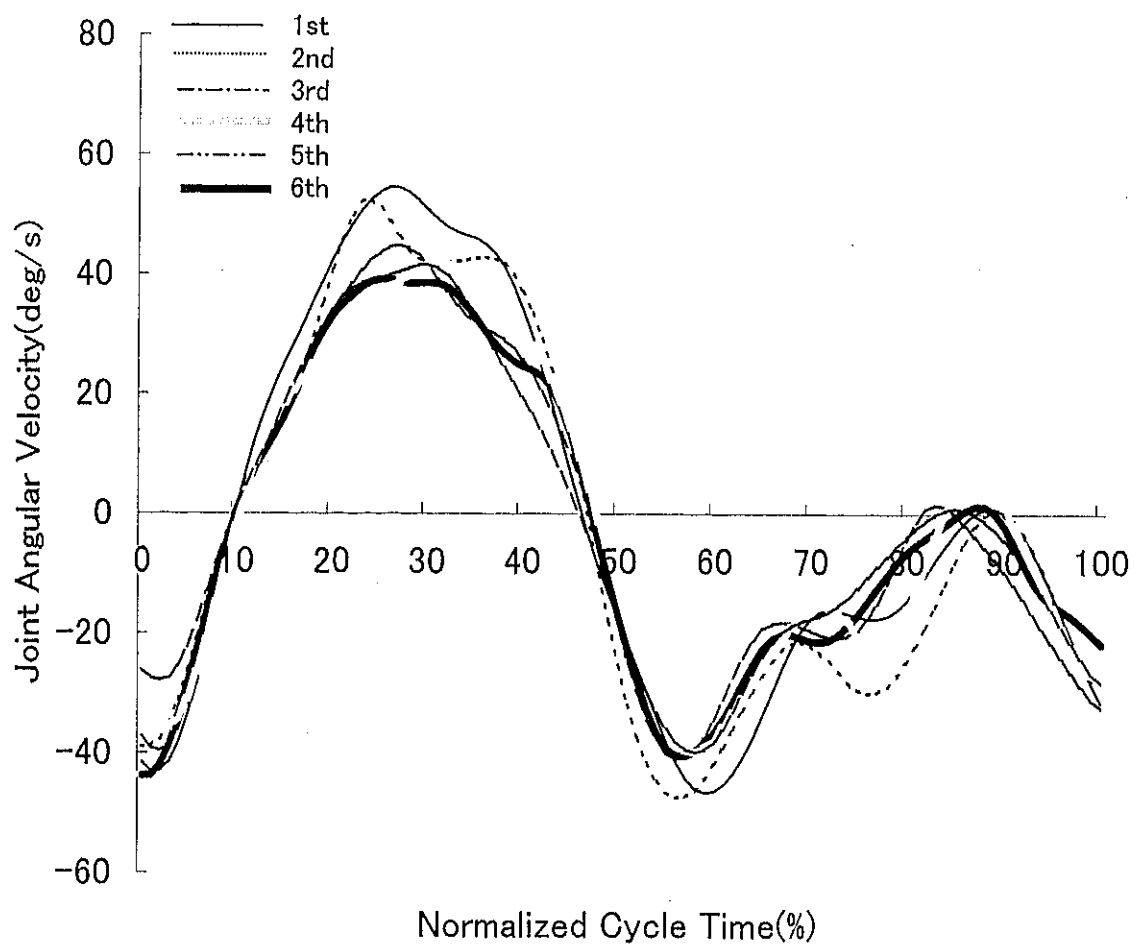


Figure 32-2 Comparison of the foot angular velocity : Girls

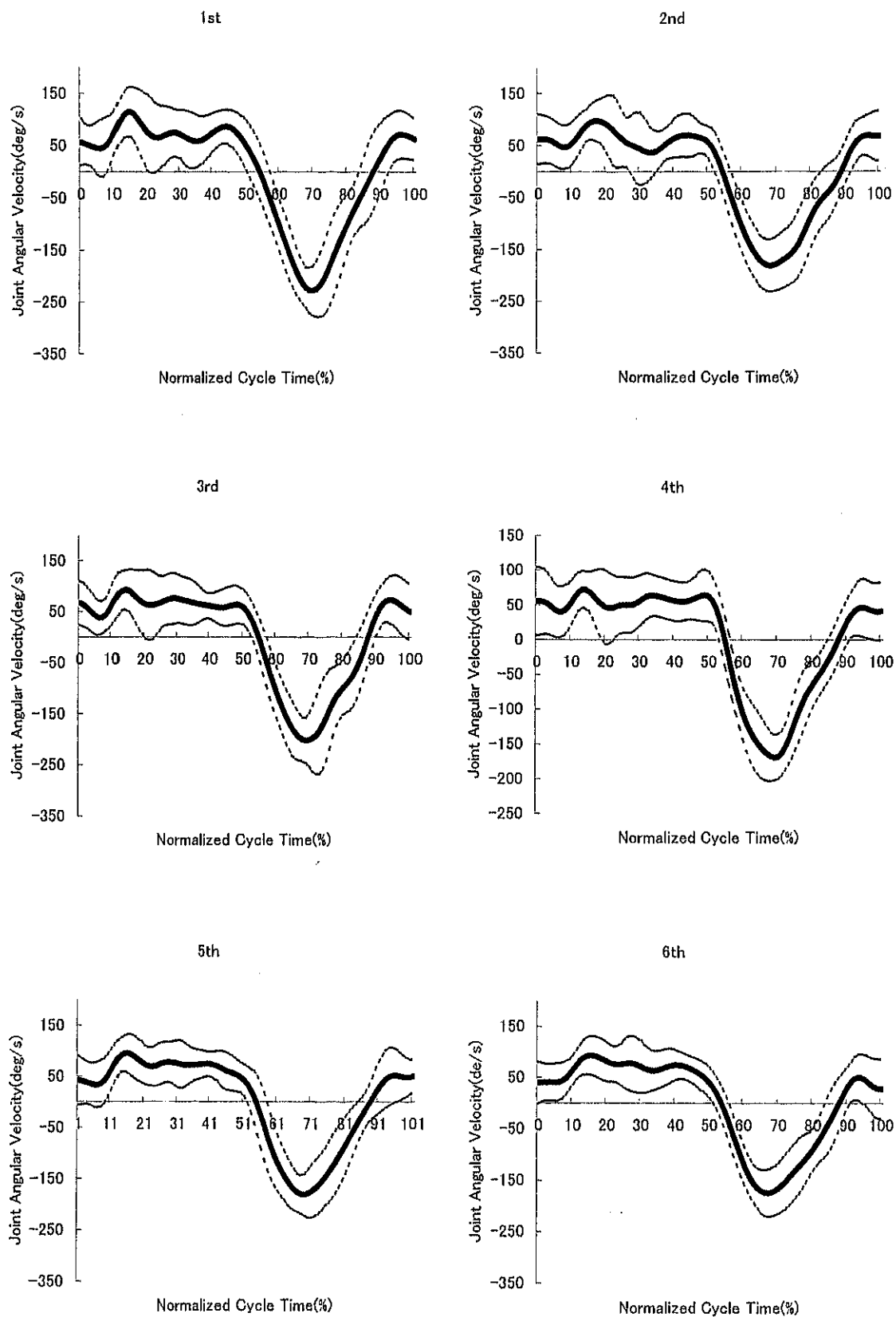


Figure 33-1 Averaged patterns of the hip joint angular velocity : Boys

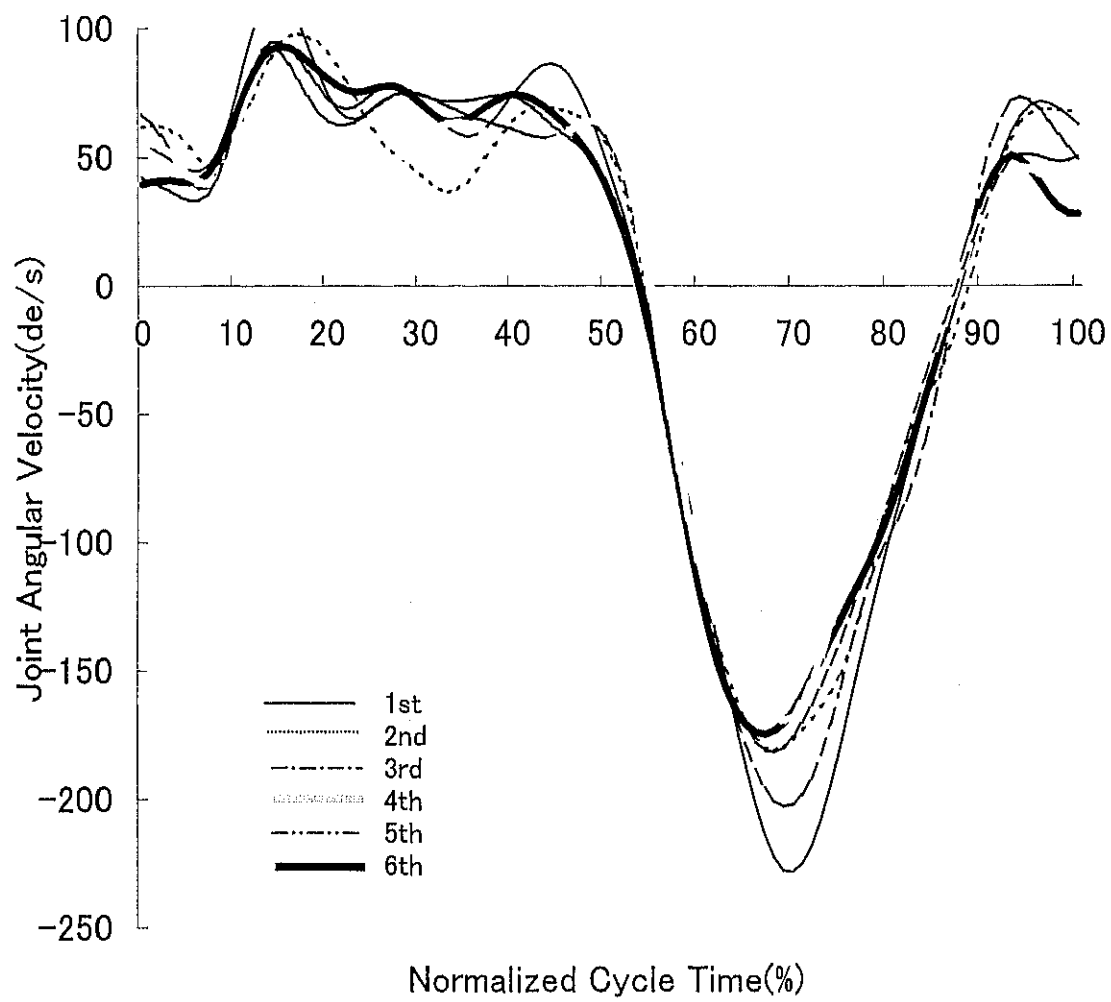


Figure 33-2 Comparison of the hip joint angular velocity : Boys

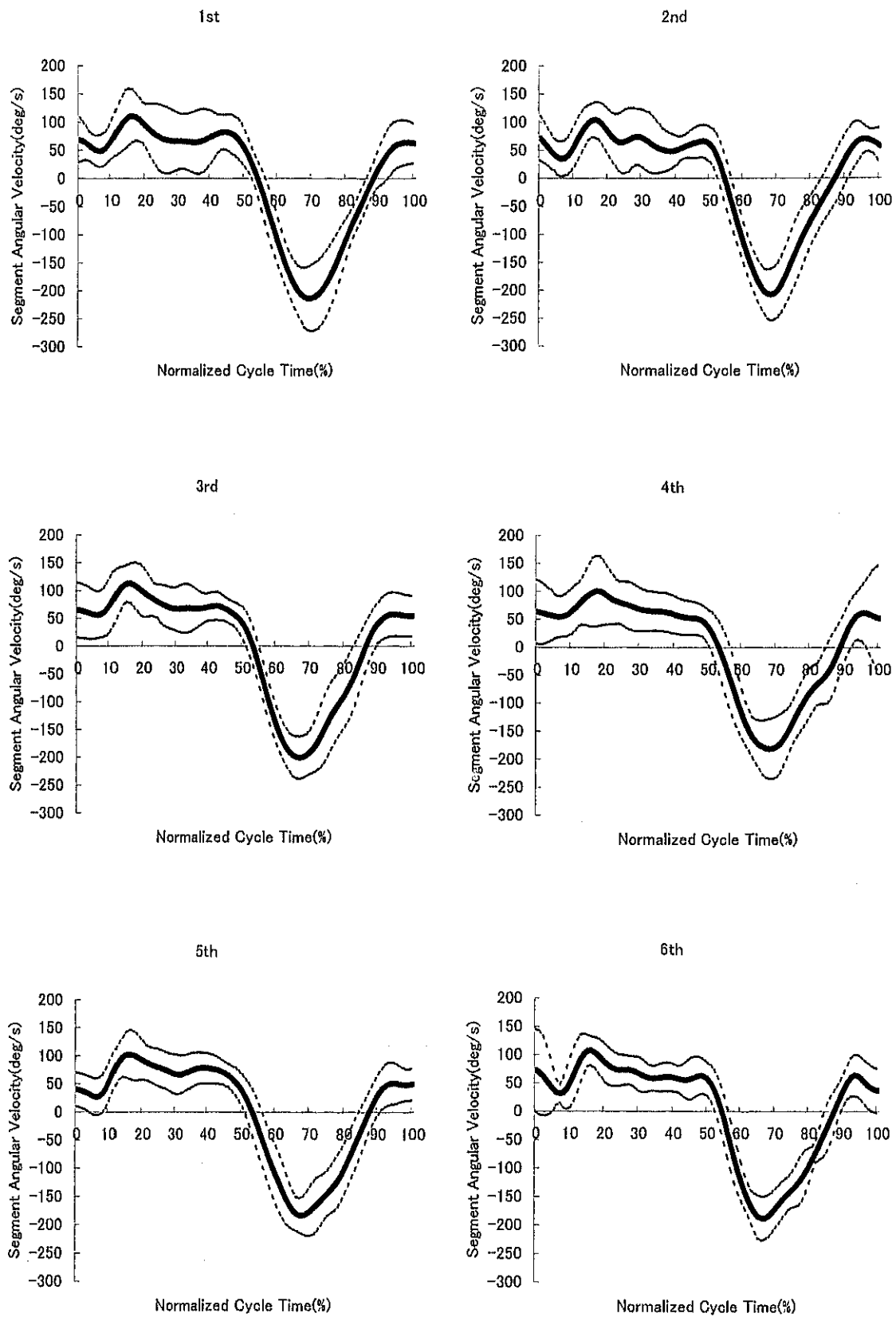


Figure 34-1 Averaged patterns of the hip joint angular velocity : Girls

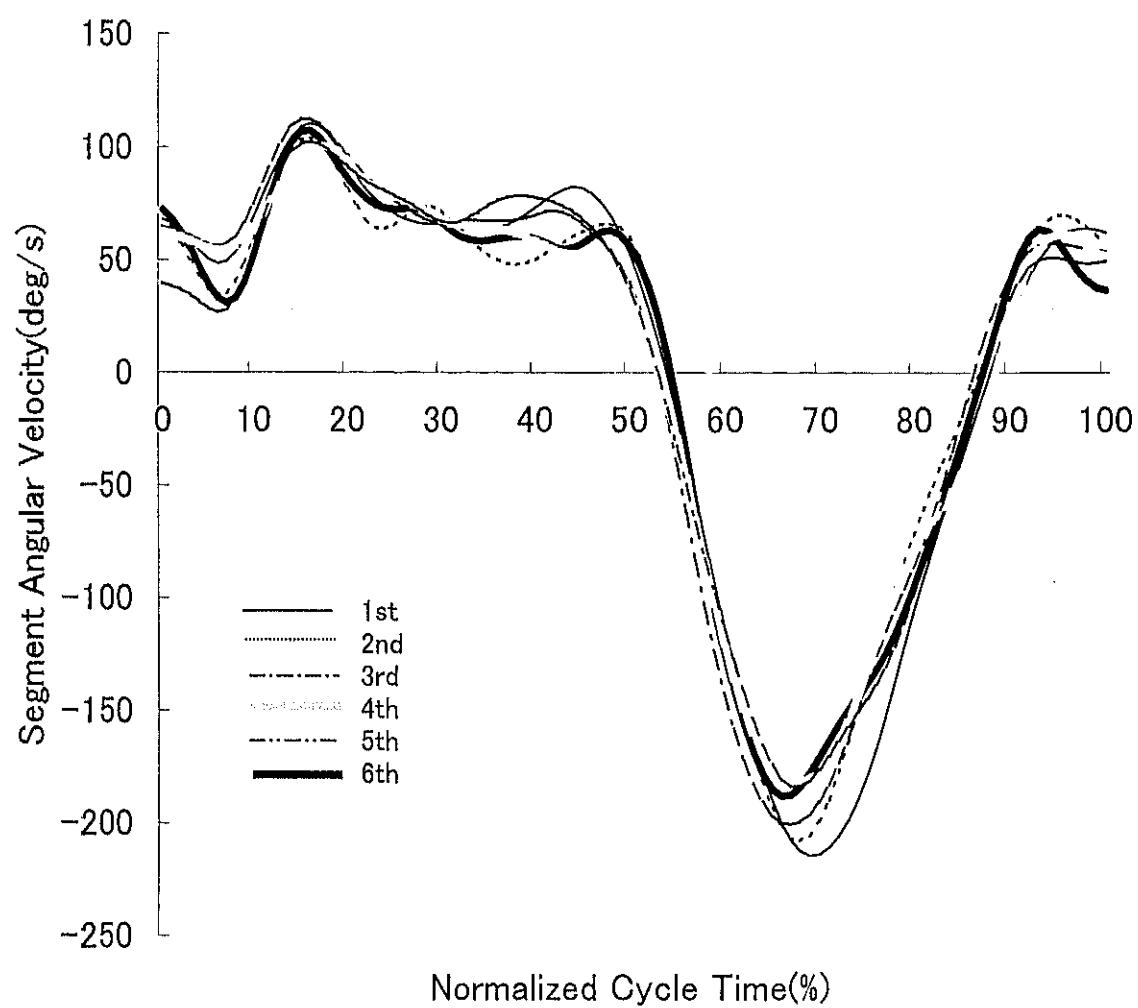


Figure 34-2 Comparison of the hip joint angular velocity : Girls

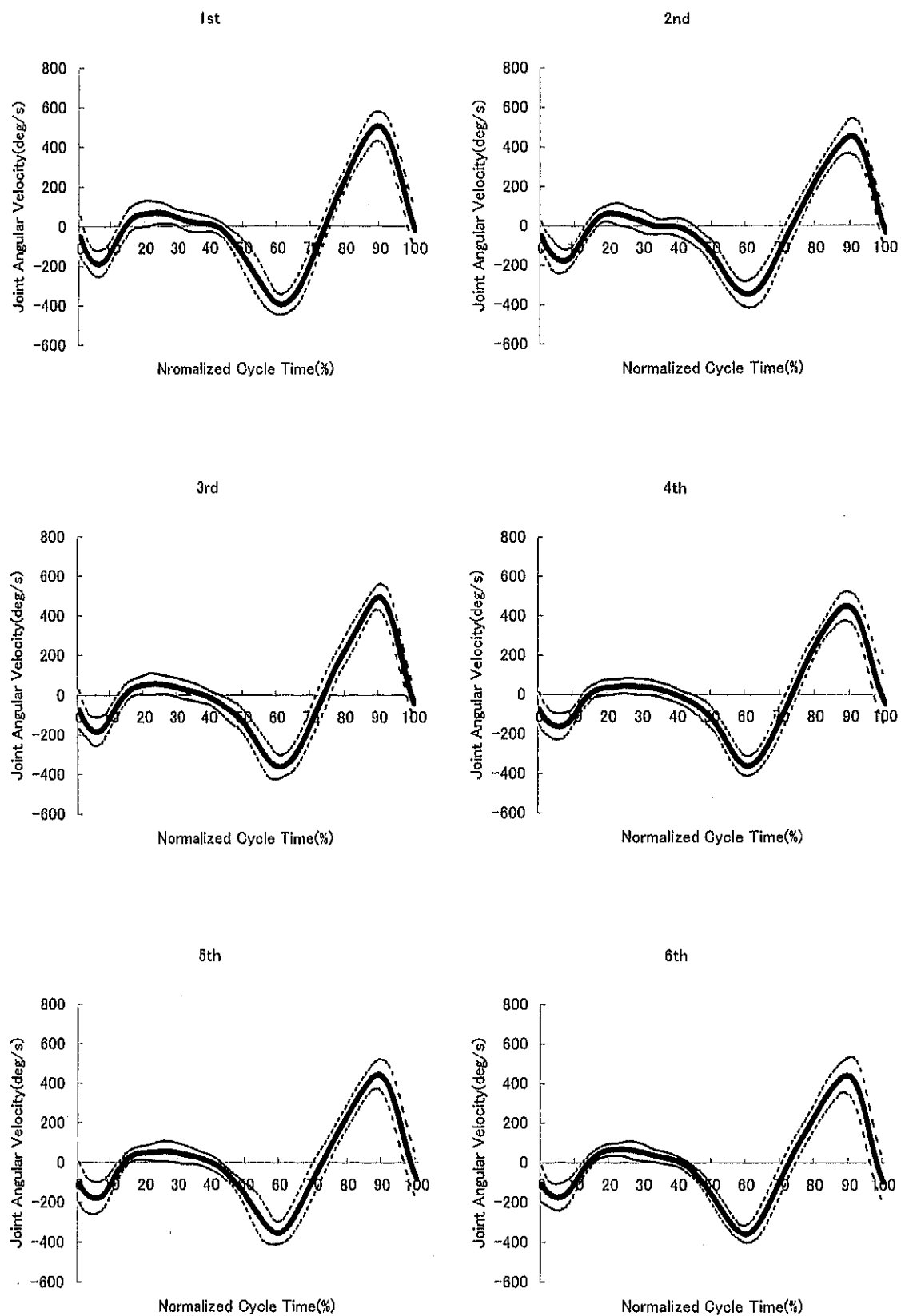


Figure 35-1 Averaged patterns of the knee joint angular velocity : Boys

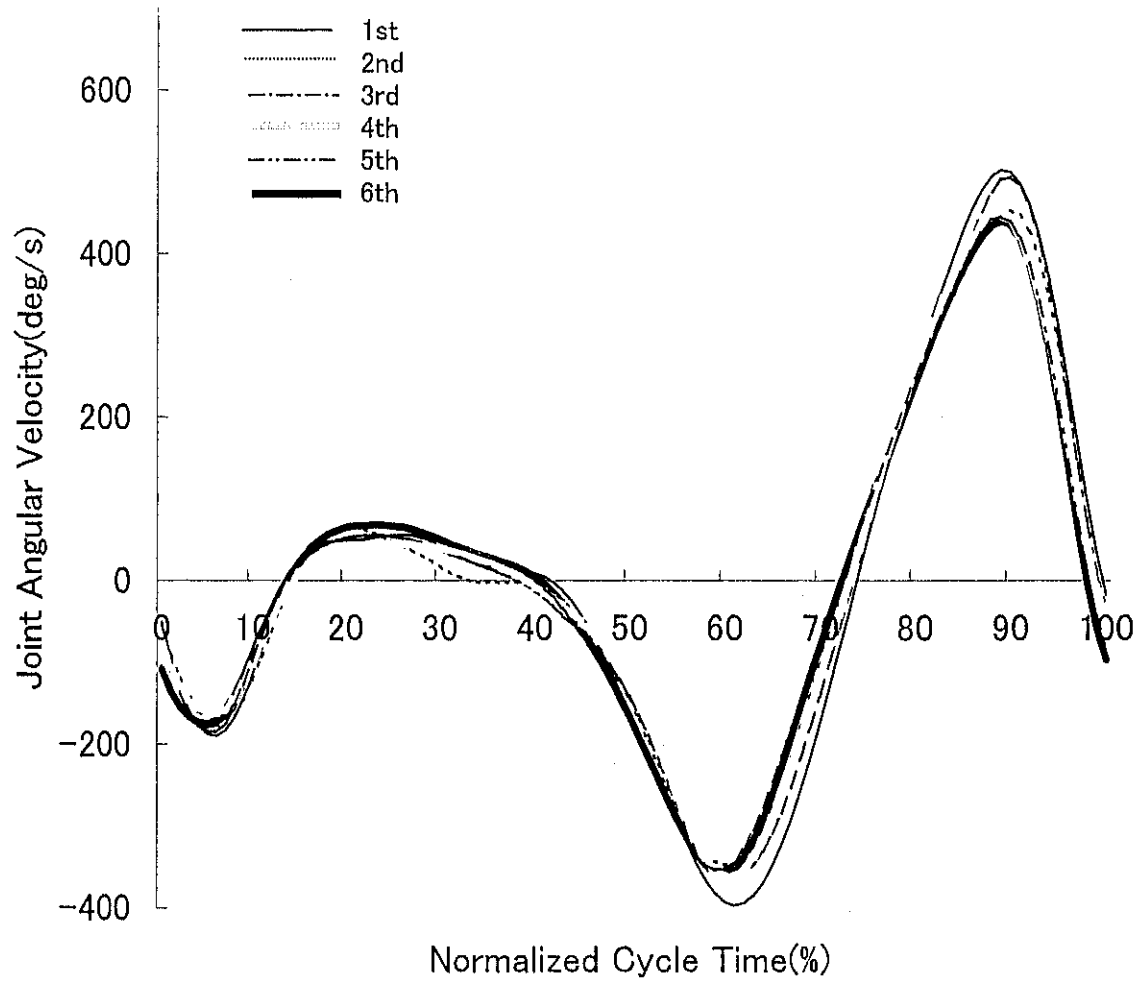


Figure 35-2 Comparison of the knee joint angular velocity : Boys

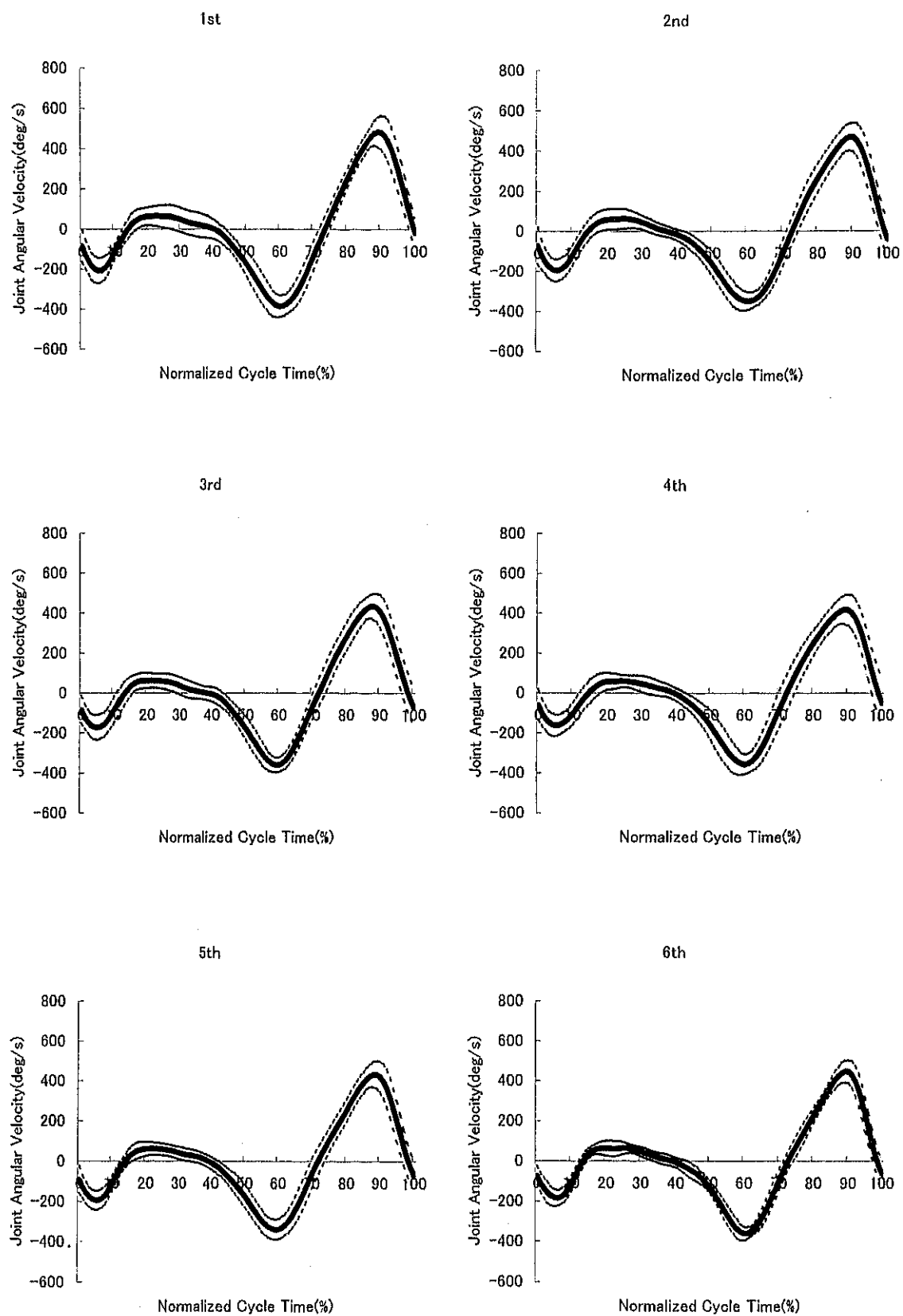


Figure 36-1 Averaged patterns of the knee joint angular velocity : Girls

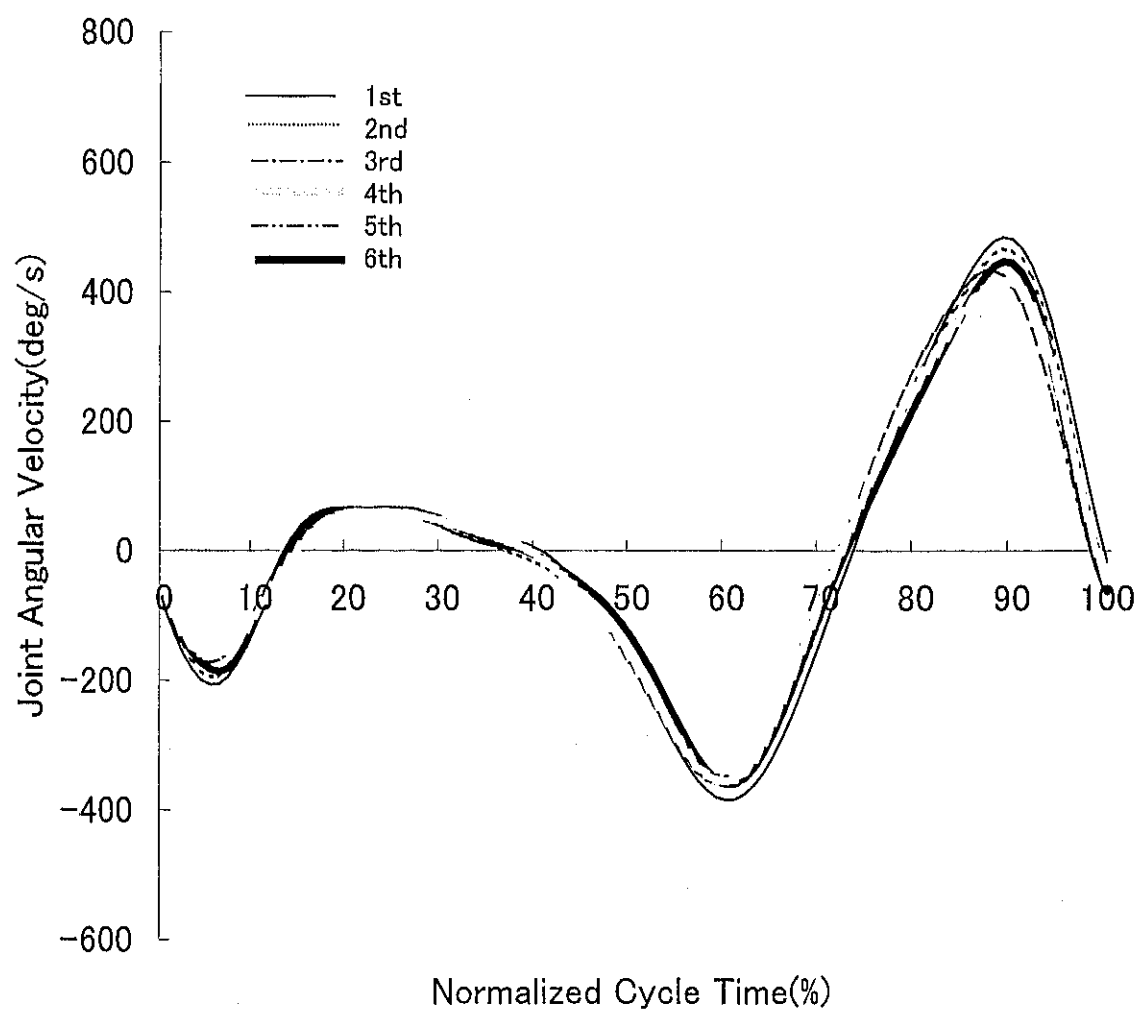


Figure 36-2 Comparison of the knee joint angular velocity : Girls

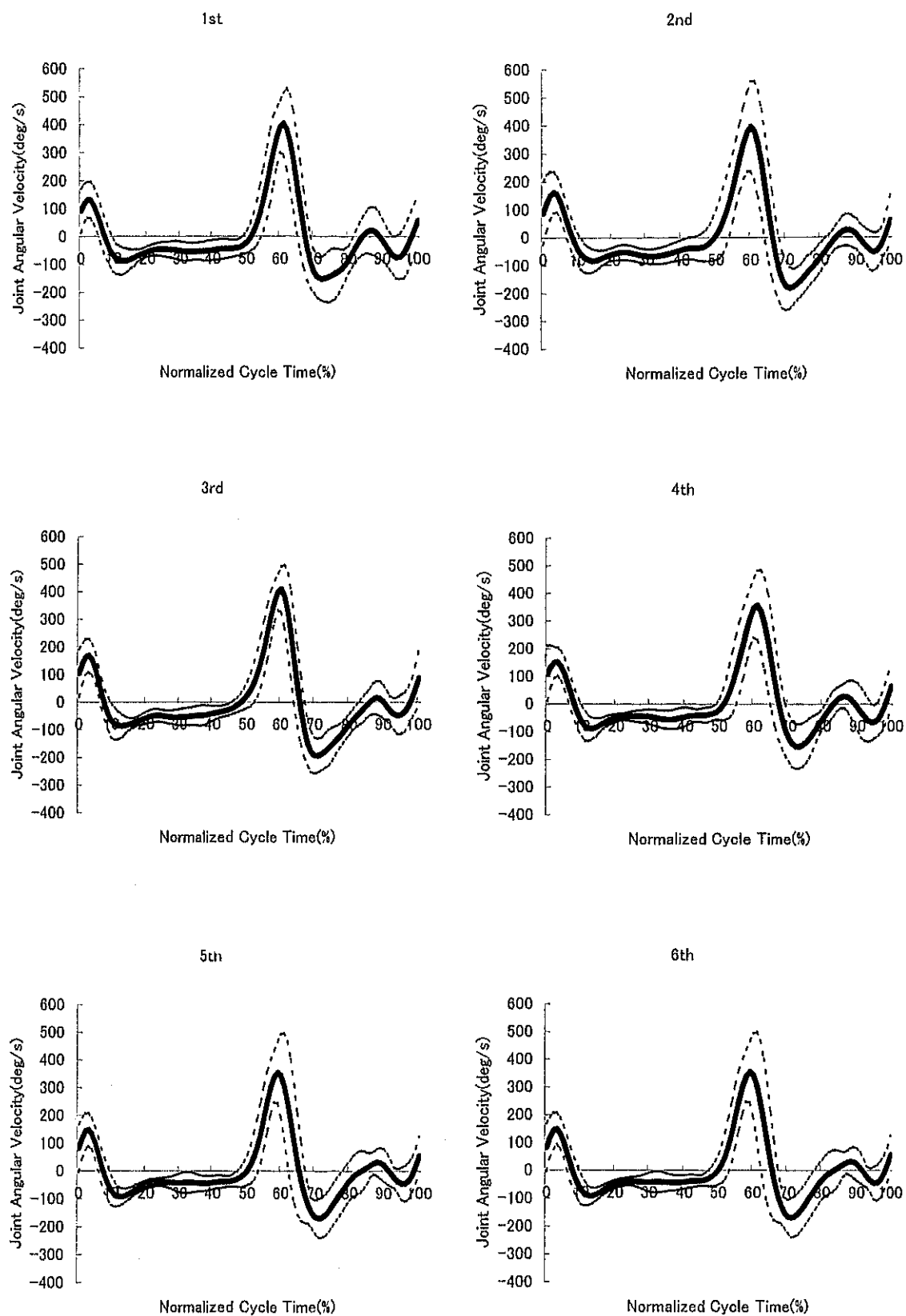


Figure 37-1 Averaged patterns of the ankle joint angular velocity : Boys

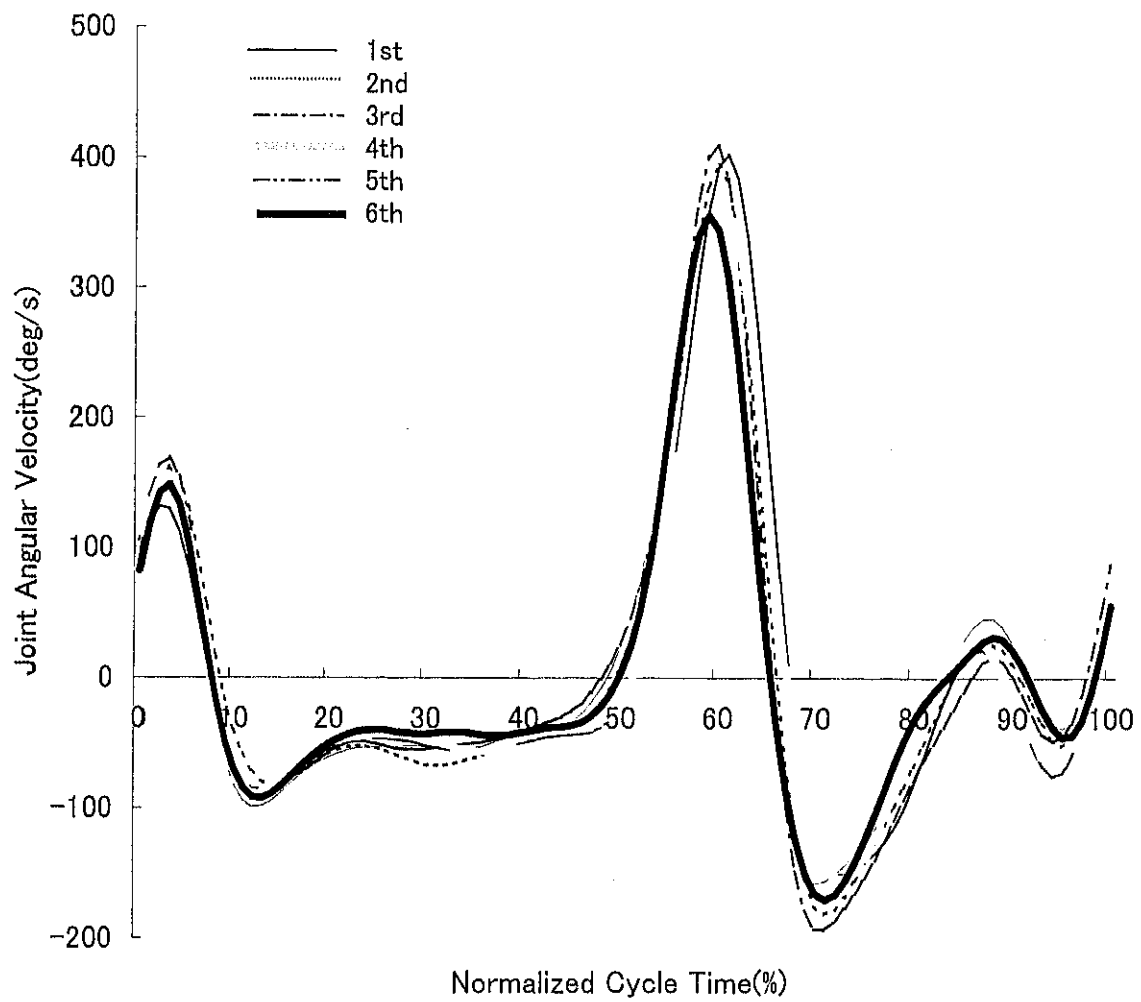


Figure 37-2 Comparison of the ankle joint angular velocity : Boys

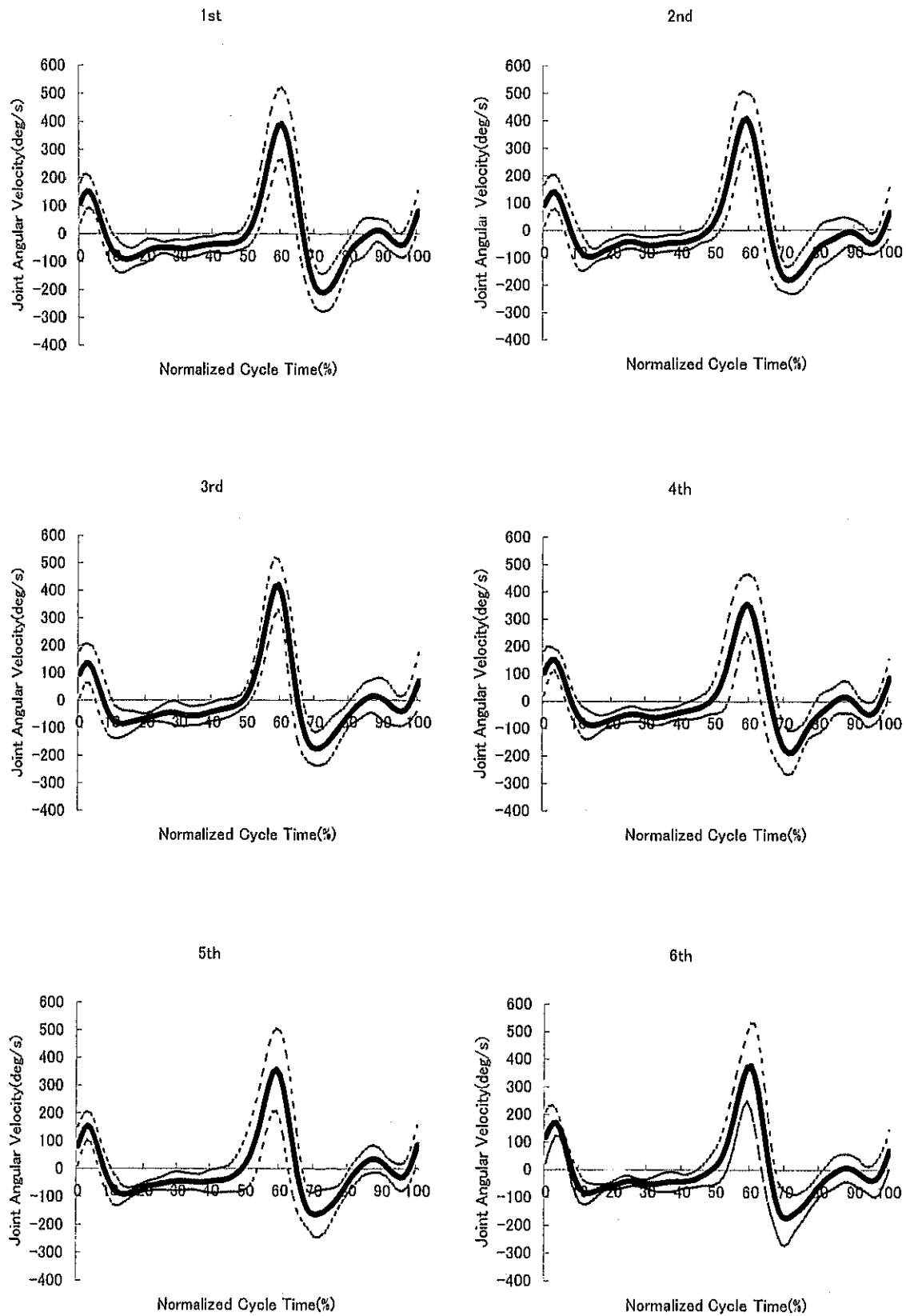


Figure 38-1 Averaged patterns of the ankle joint angular velocity : Girls

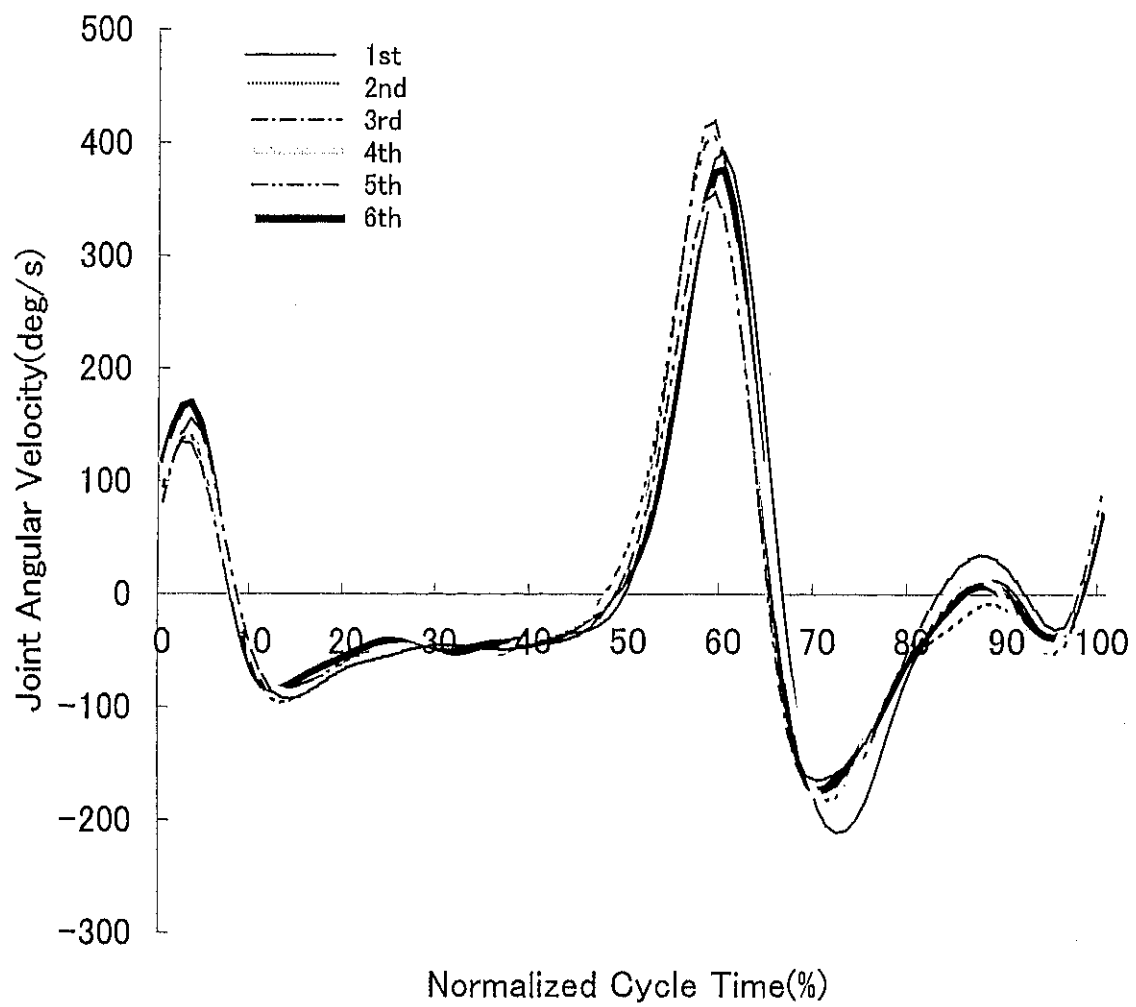


Figure 38-2 Comparison of the ankle joint angular velocity : Girls

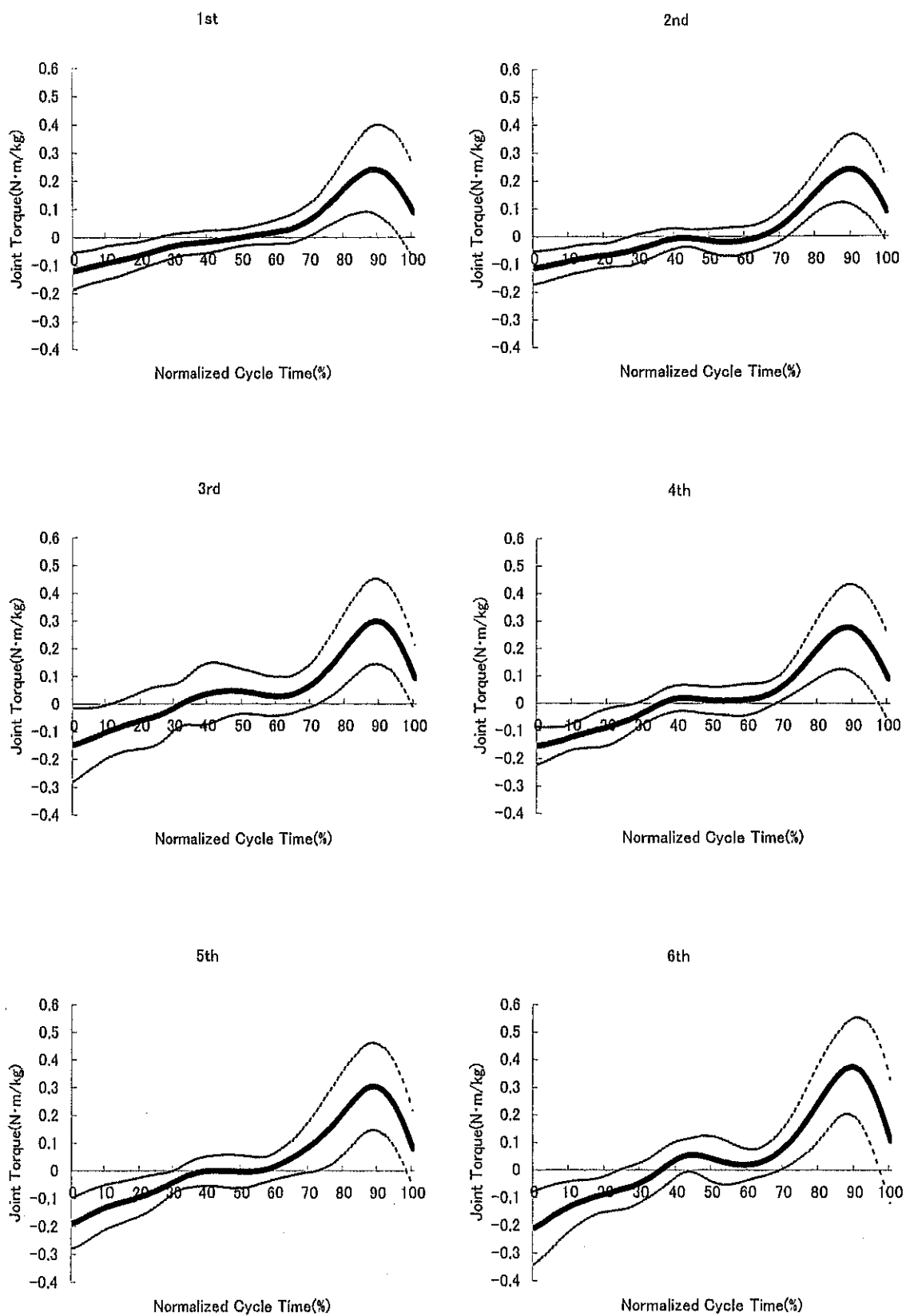


Figure 39-1 Averaged patterns of the hip joint torque : Boys

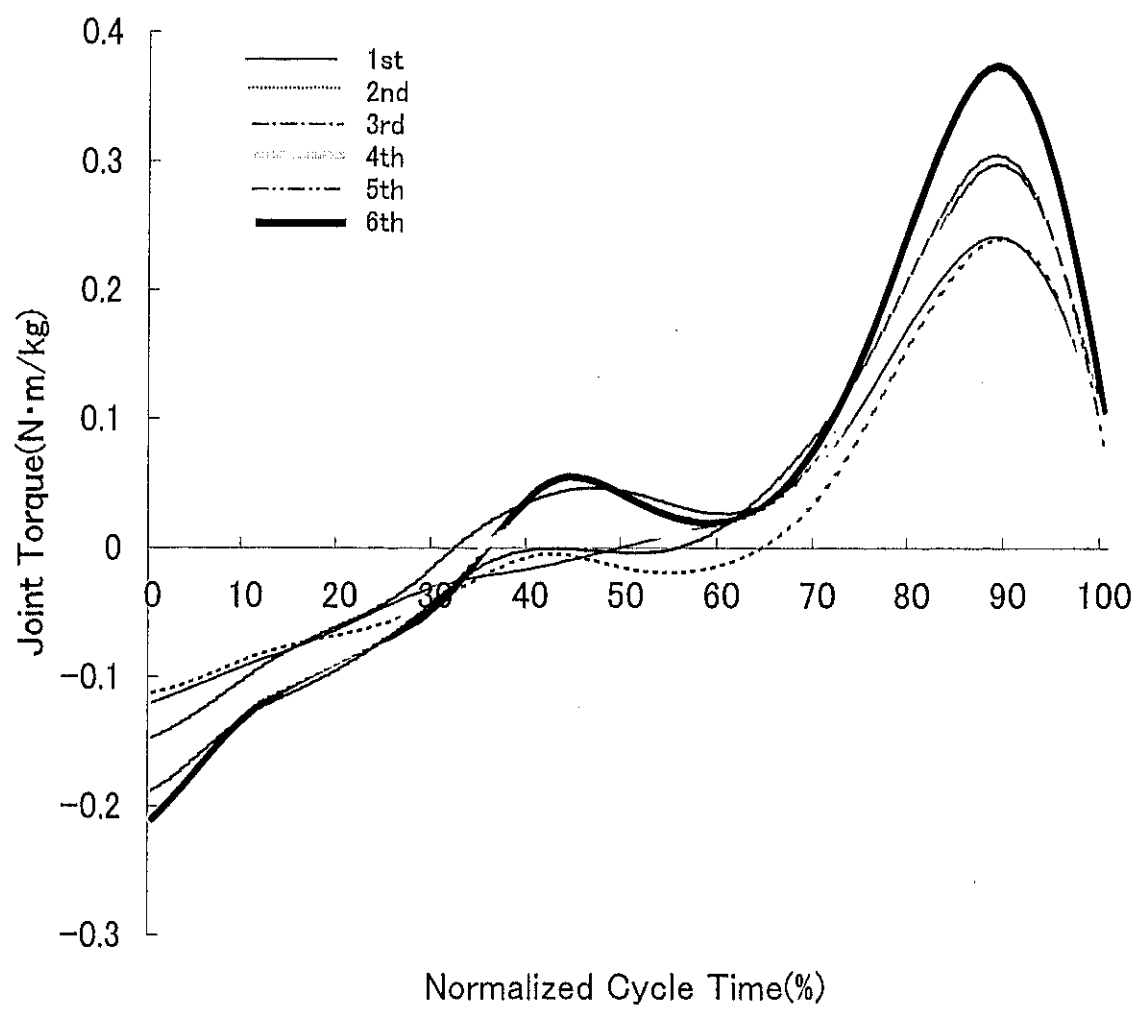


Figure 39-2 Comparison of the hip joint torque : Boys

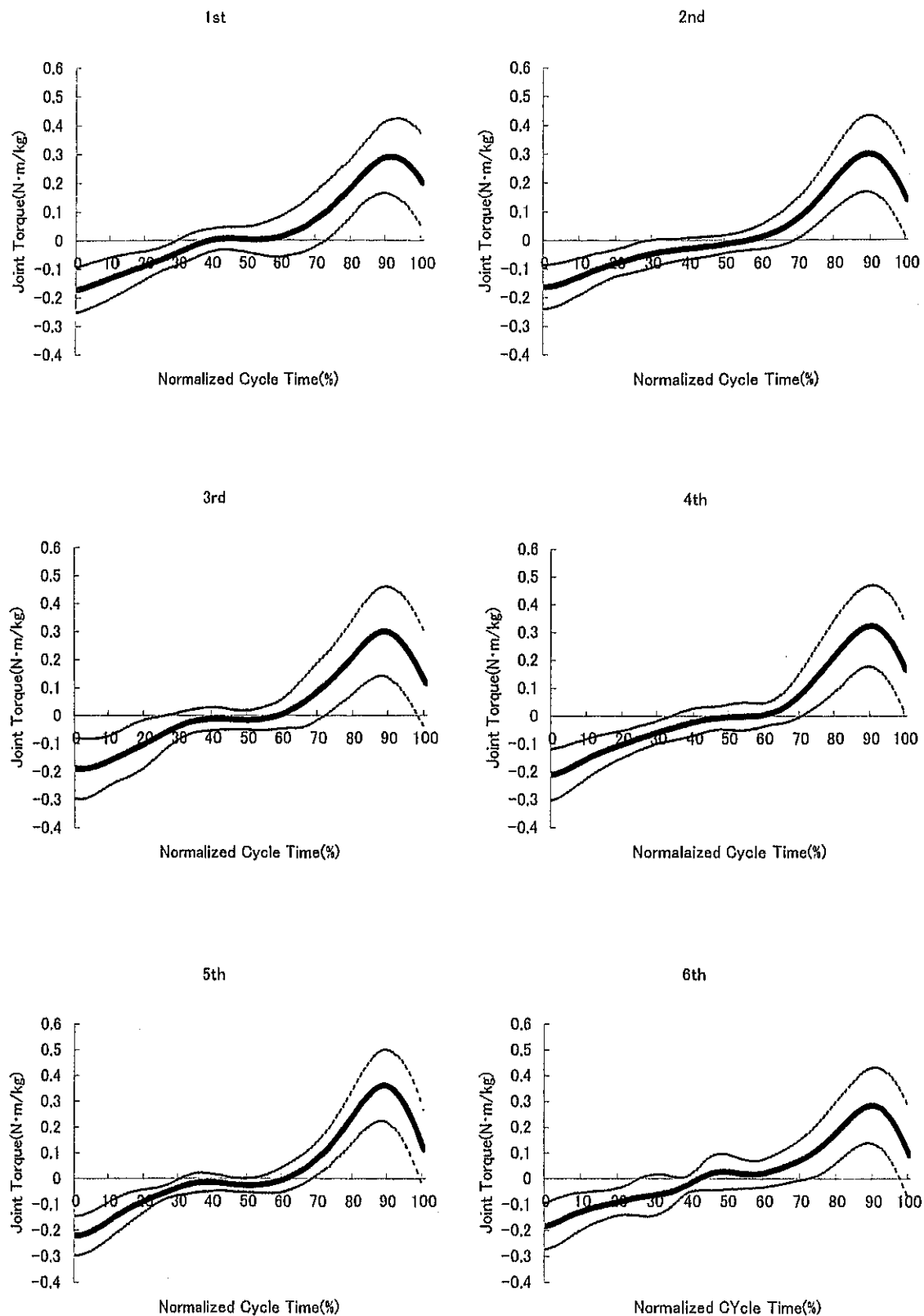


Figure 40-1 Averaged patterns of the hip joint torque : Girls

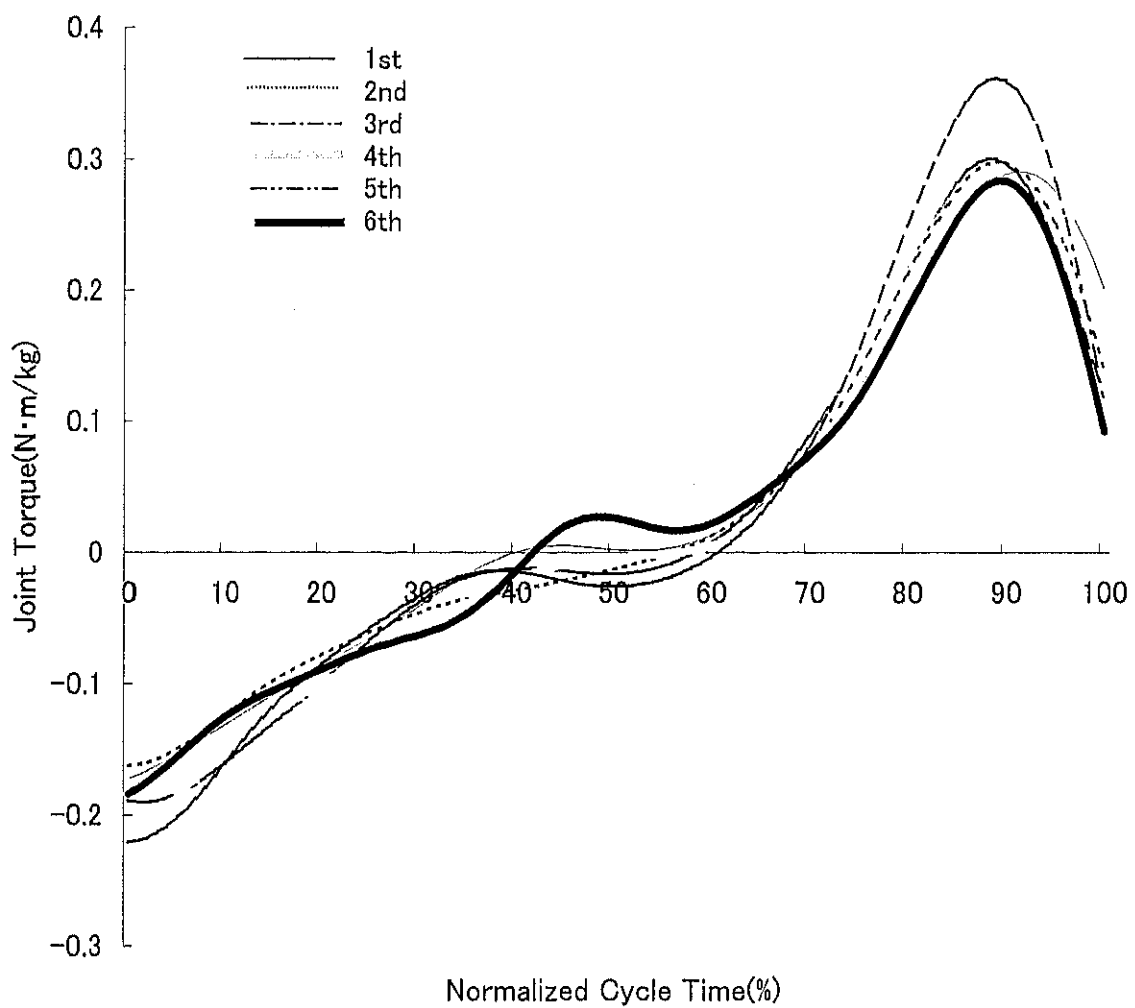


Figure 40-2 Comparison of the hip joint torque : Girls

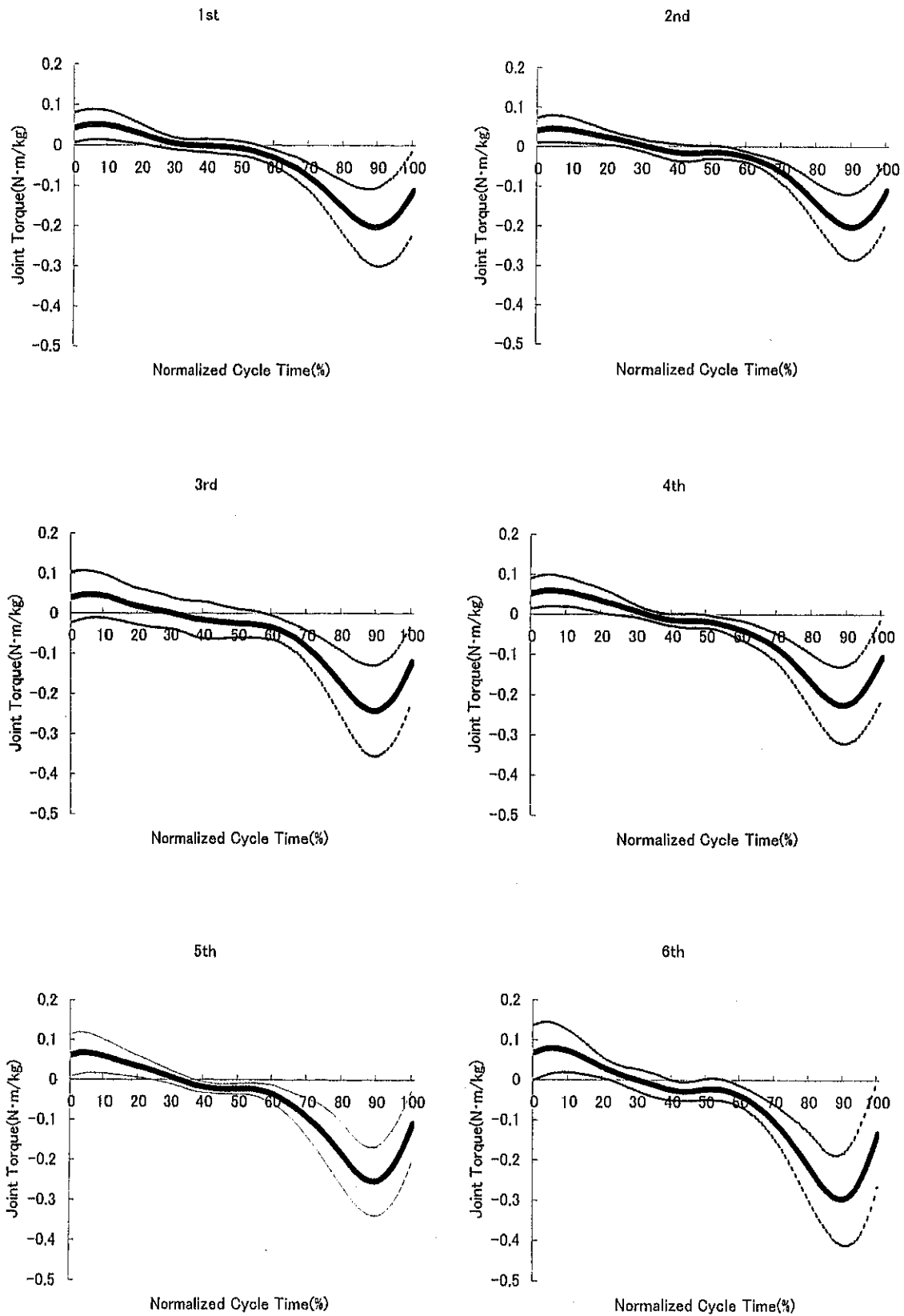


Figure 41-1 Averaged patterns of the knee joint torque : Boys

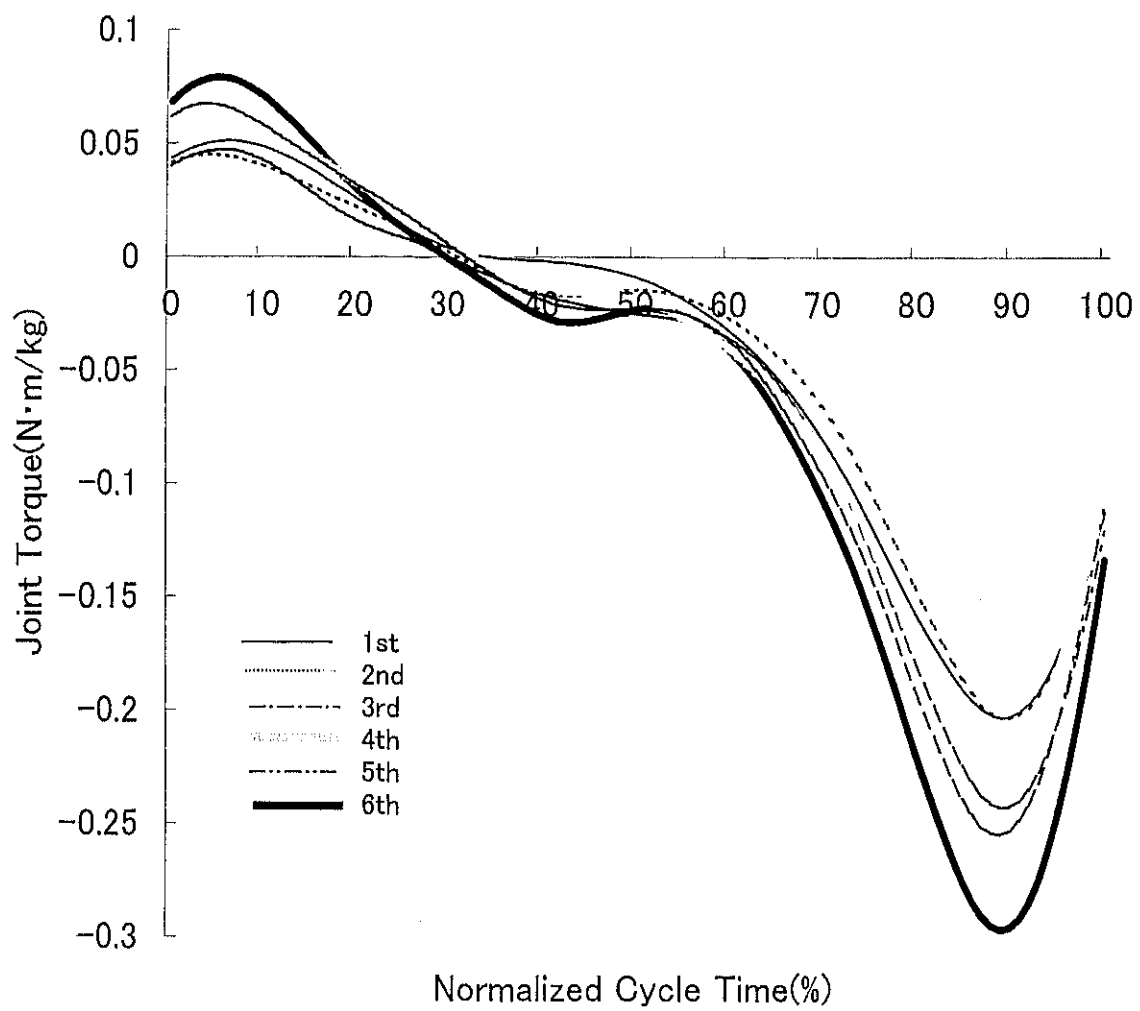


Figure 41-2 Comparison of the knee joint torque : Boys

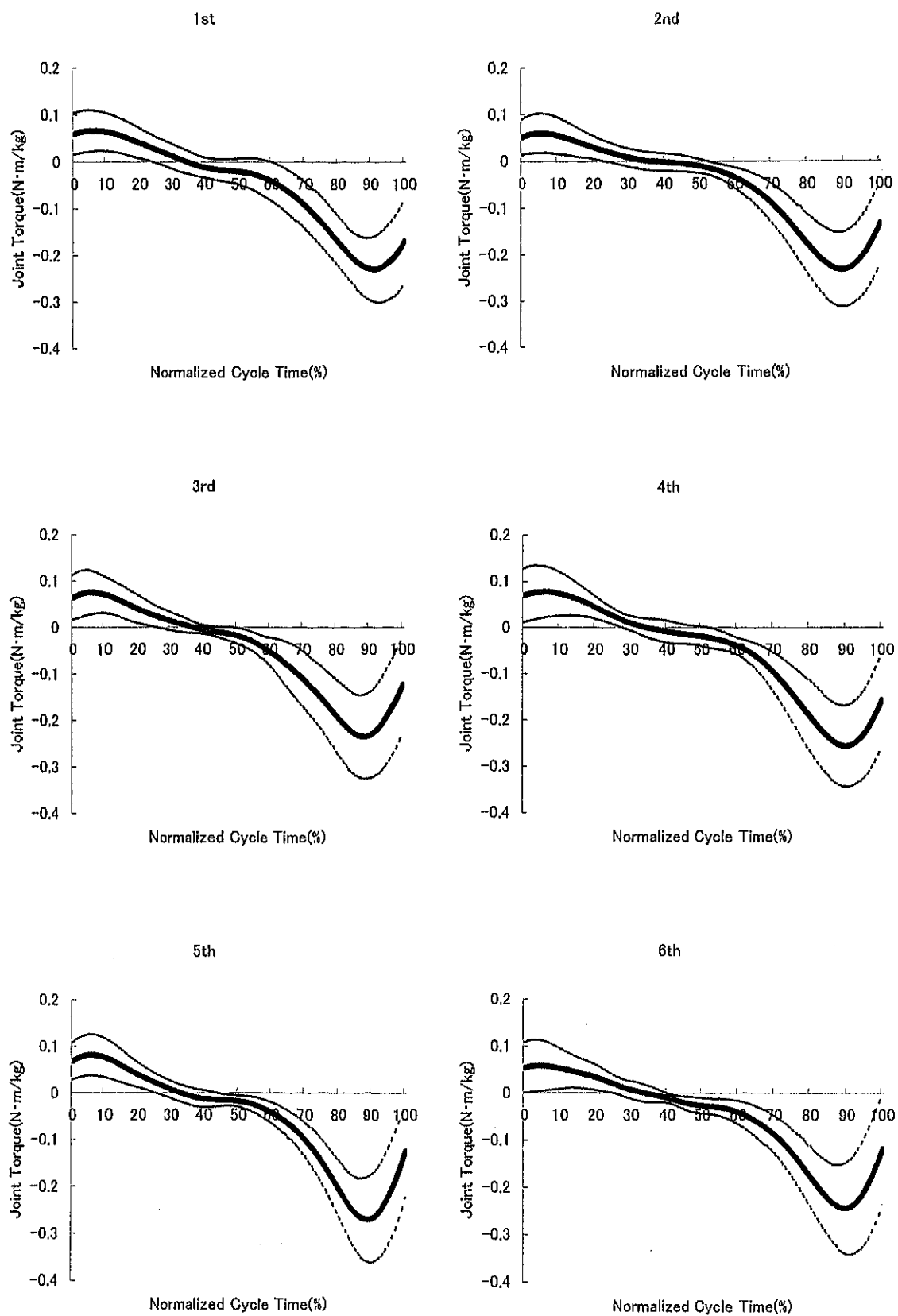


Figure 42-1 Averaged patterns of the knee joint torque : Girls

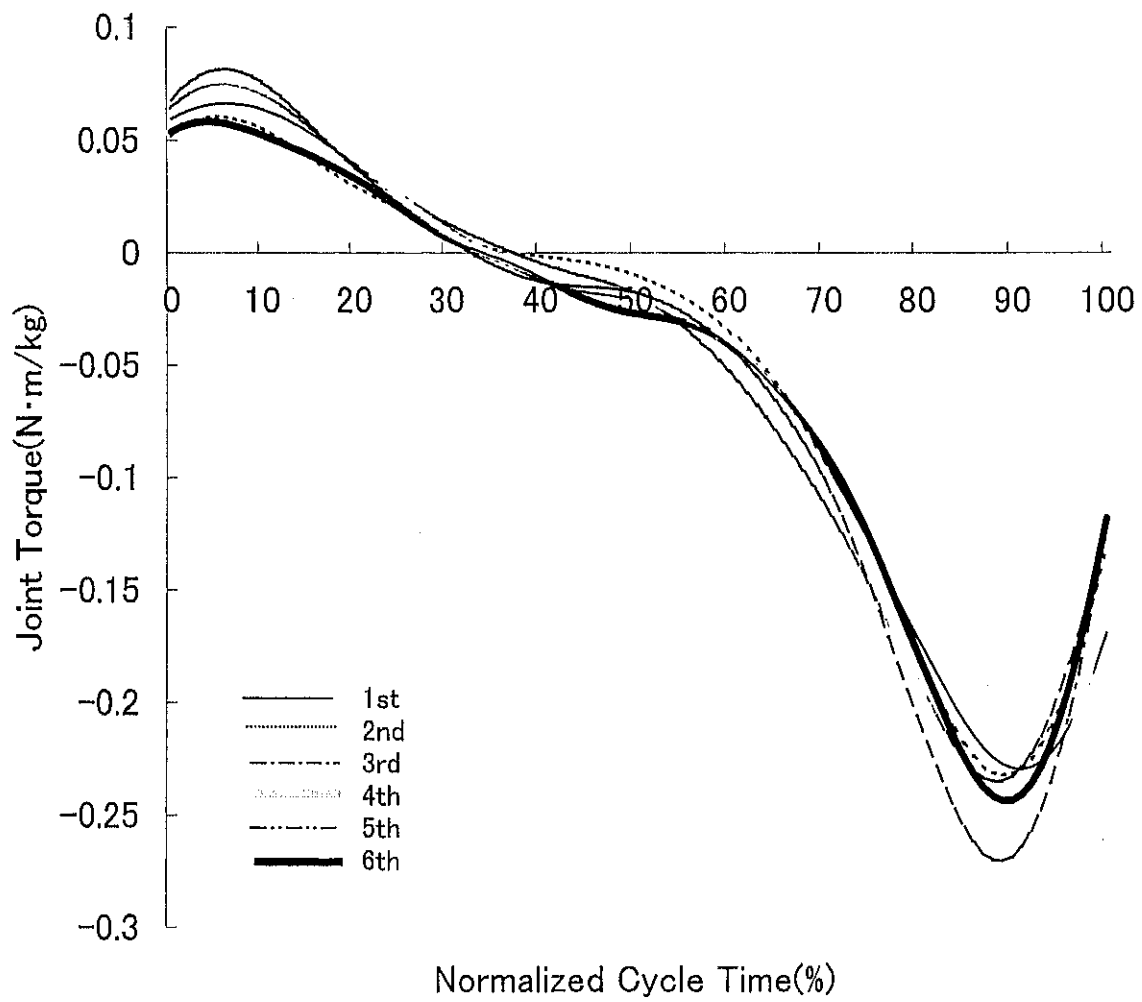


Figure 42-2 Comparison of the knee joint torque : Girls

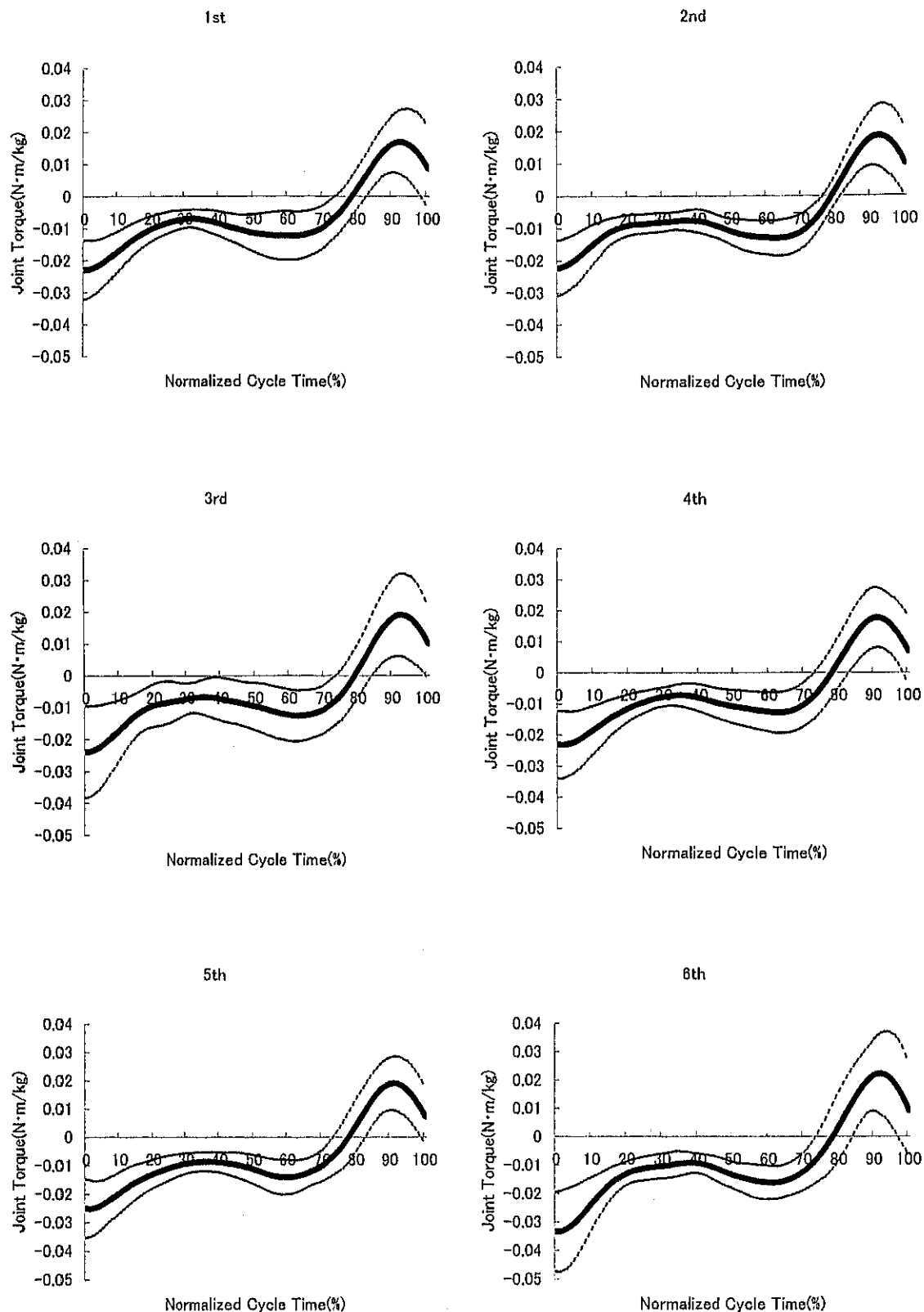


Figure 43-1 Averaged patterns of the ankle joint torque : Boys

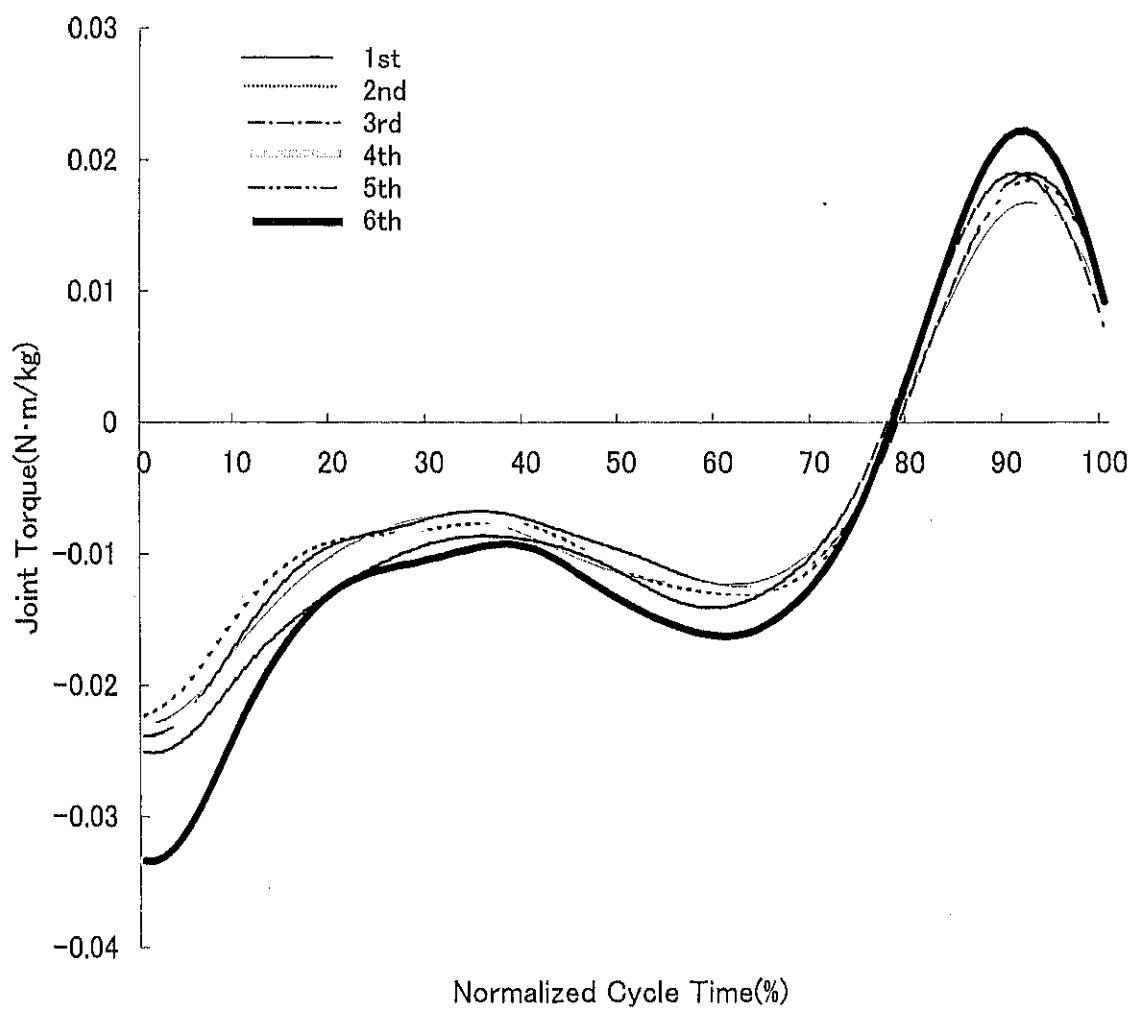


Figure 43-2 Comparison of the ankle joint torque : Boys

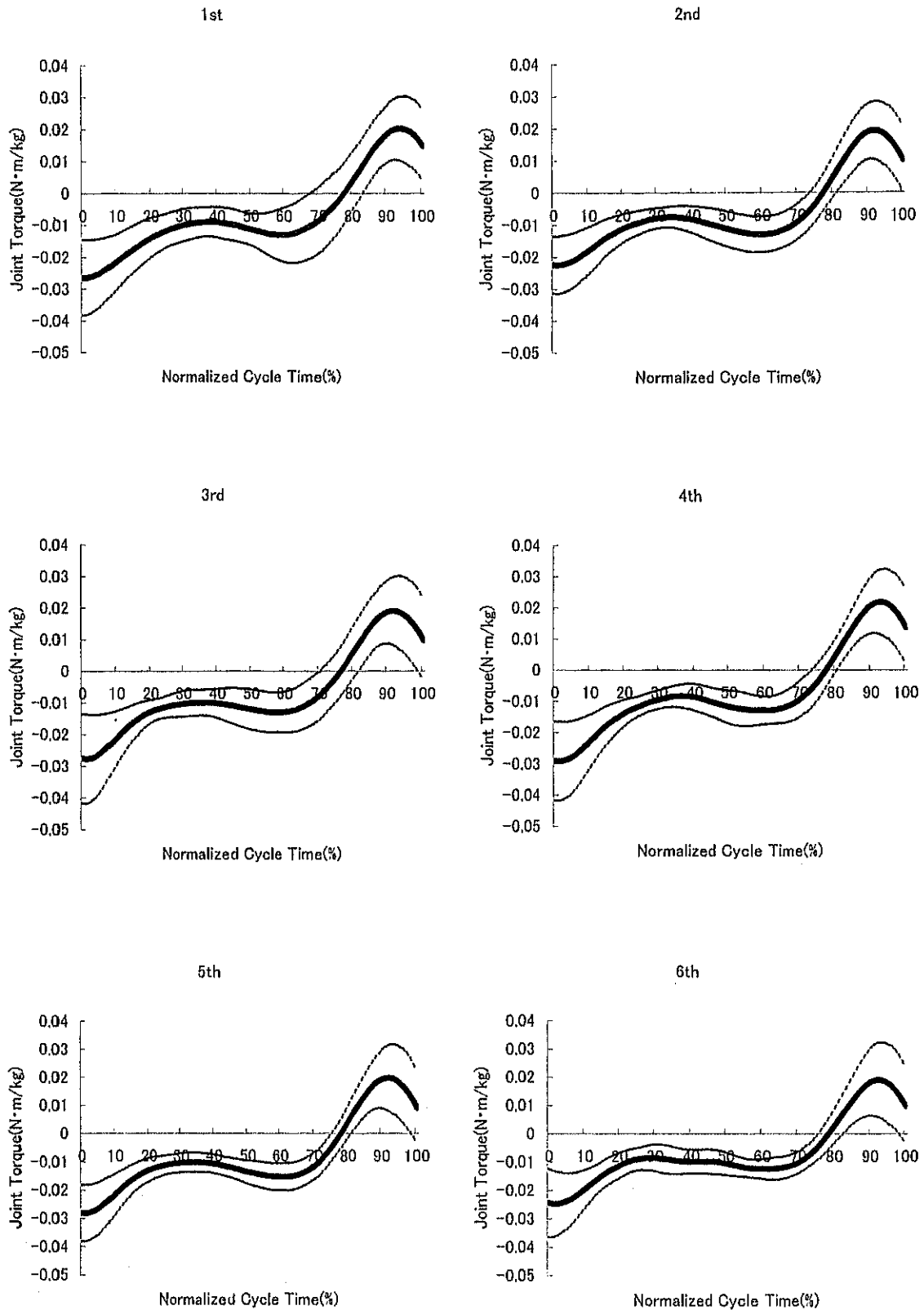


Figure 44-1 Averaged patterns of the ankle joint torque : Girls

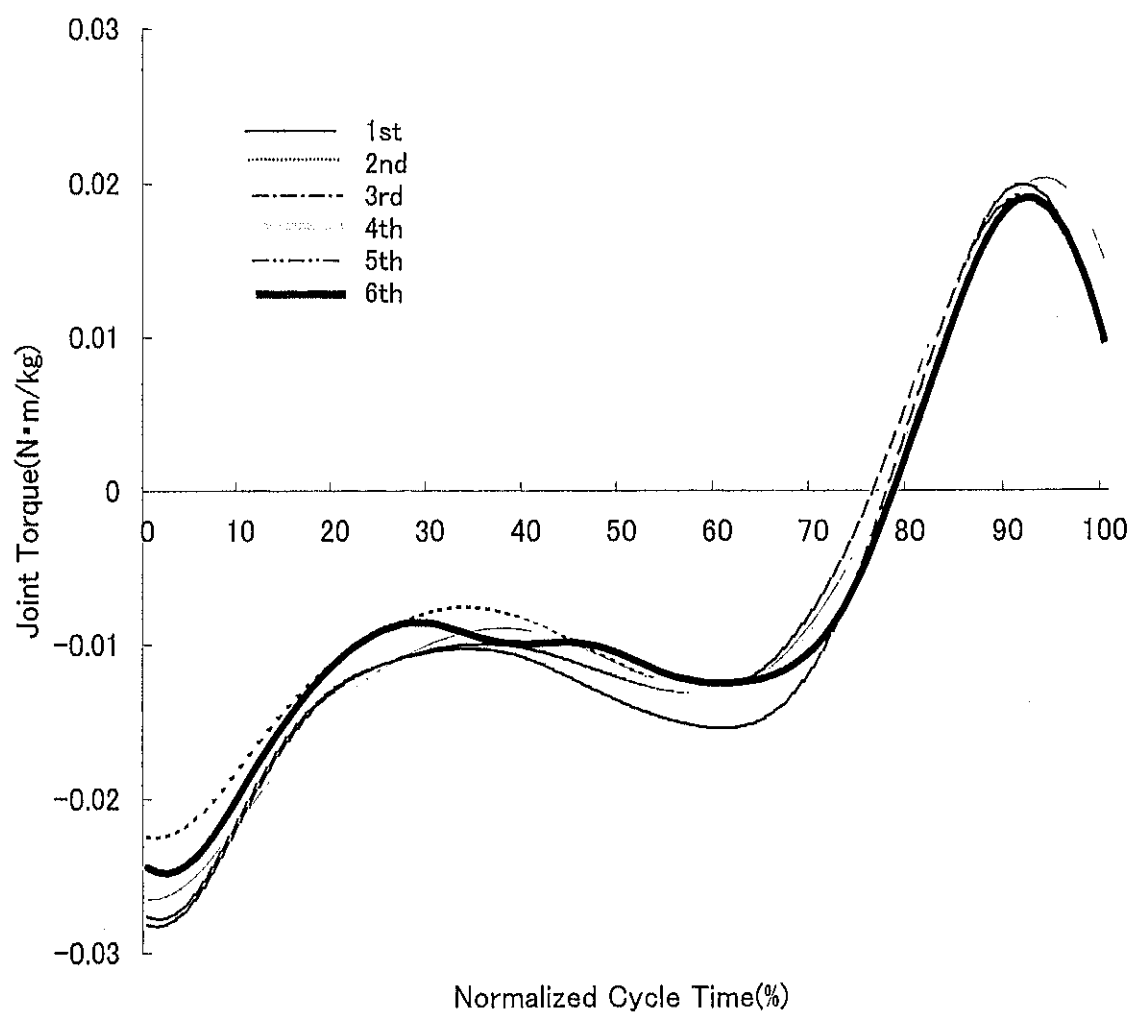


Figure 44-2 Comparison of the ankle joint torque : Girls

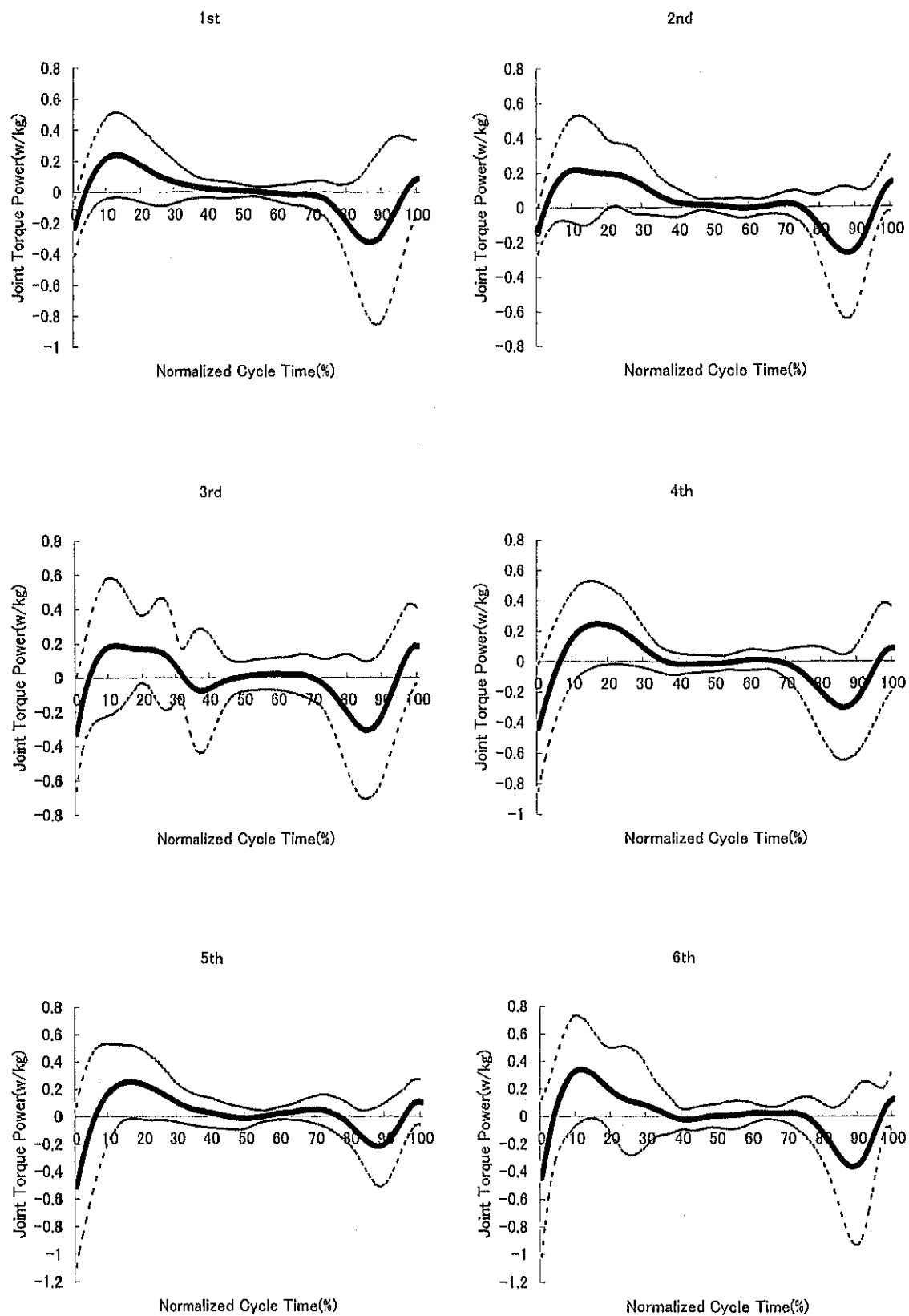


Figure 45-1 Averaged patterns of the joint torque power of the hip joint : Boys

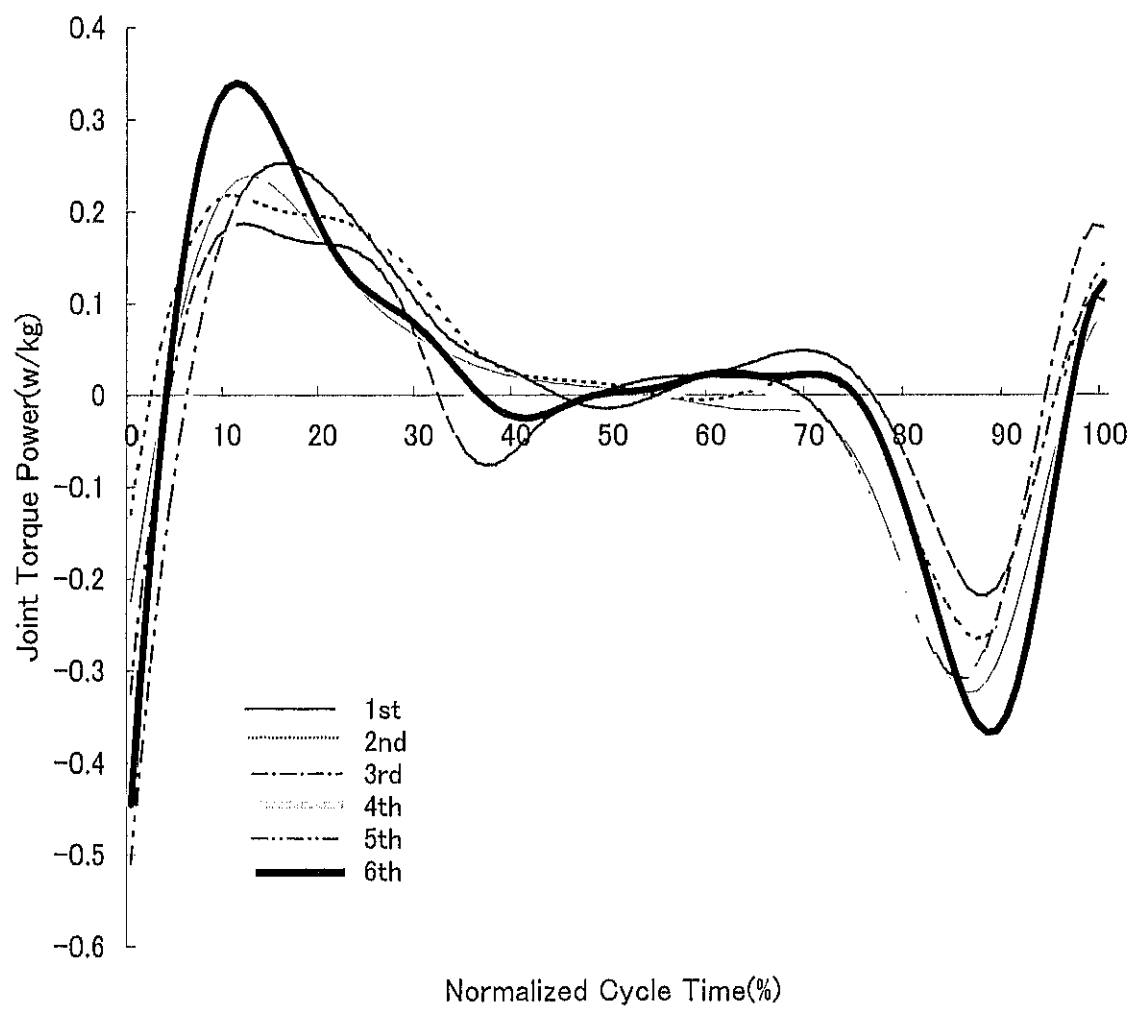


Figure 45-2 Comparison of the joint torque power of the hip joint : Boys

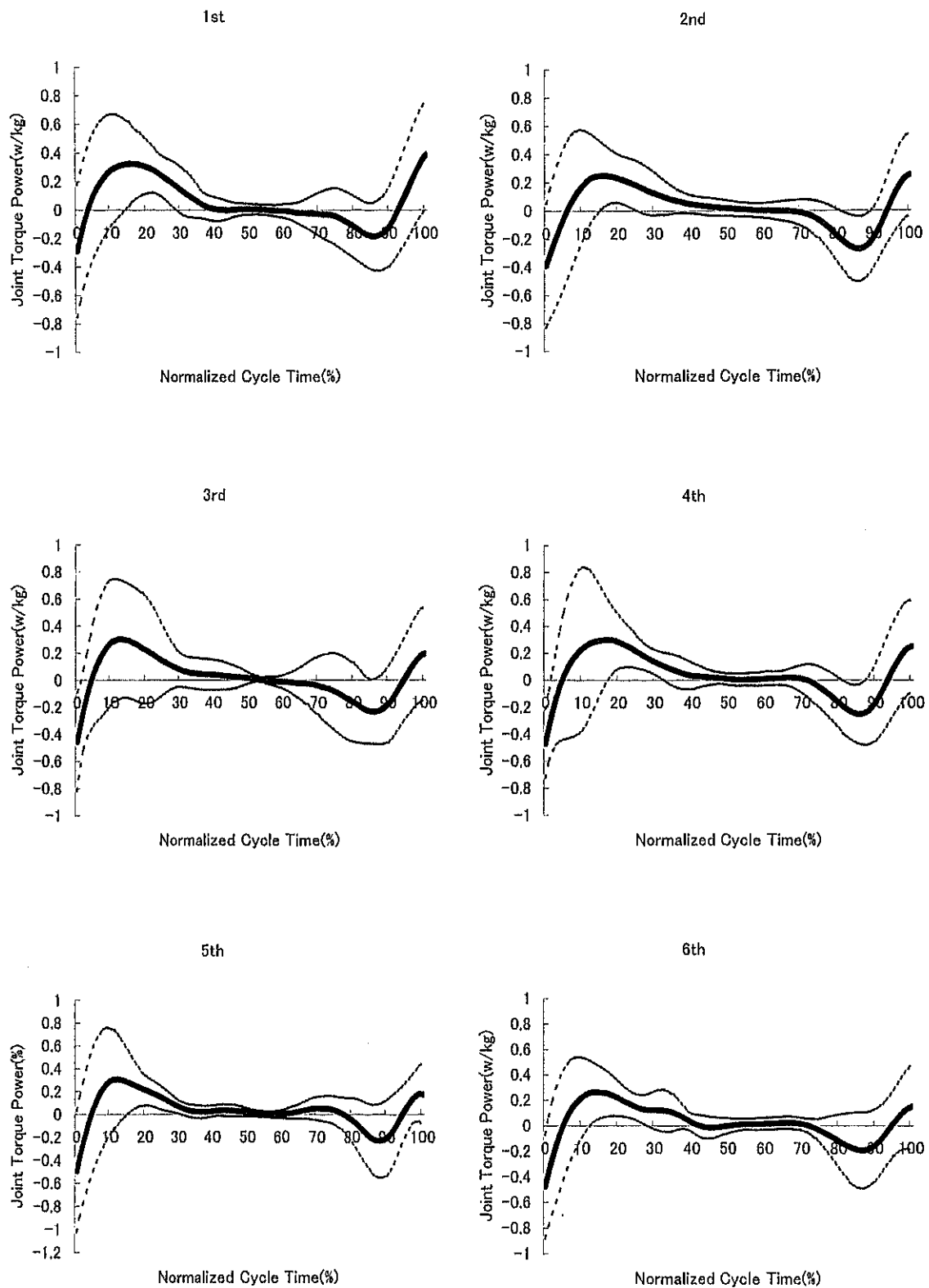


Figure 46-1 Averaged patterns of the joint torque power of the hip joint : Girls

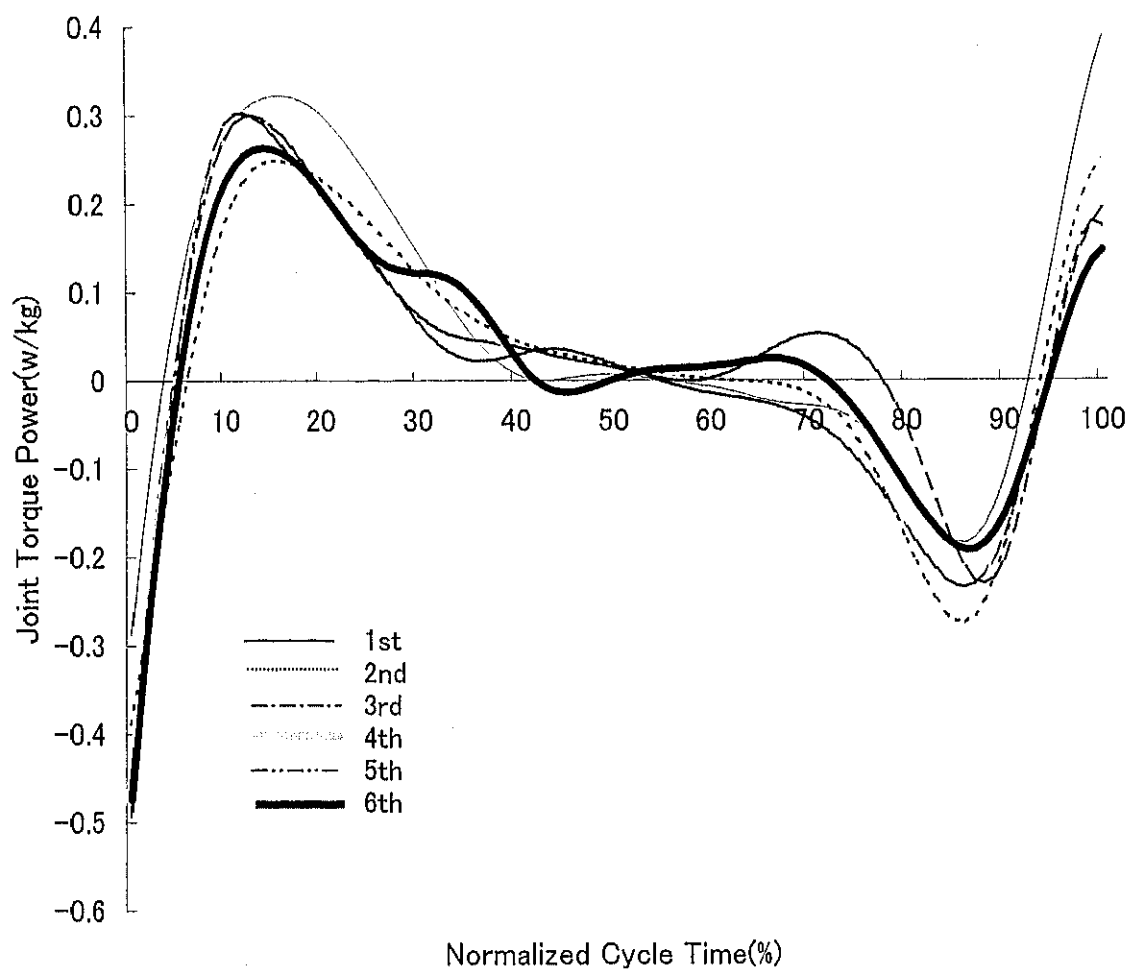


Figure 46-2 Comparison of the joint torque power of the hip joint : Girls

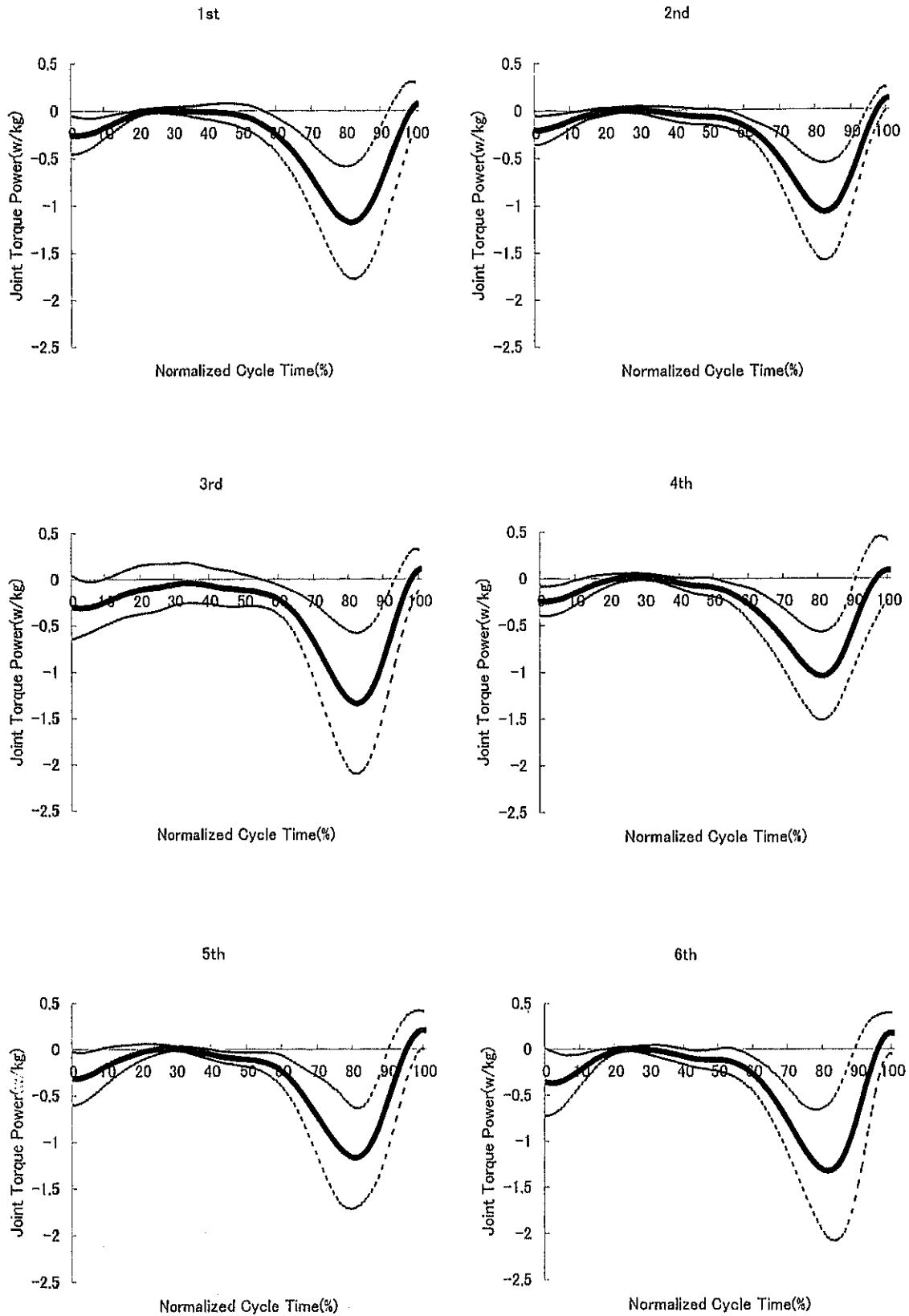


Figure 47-1 Averaged patterns of the joint torque power of the knee joint : Boys

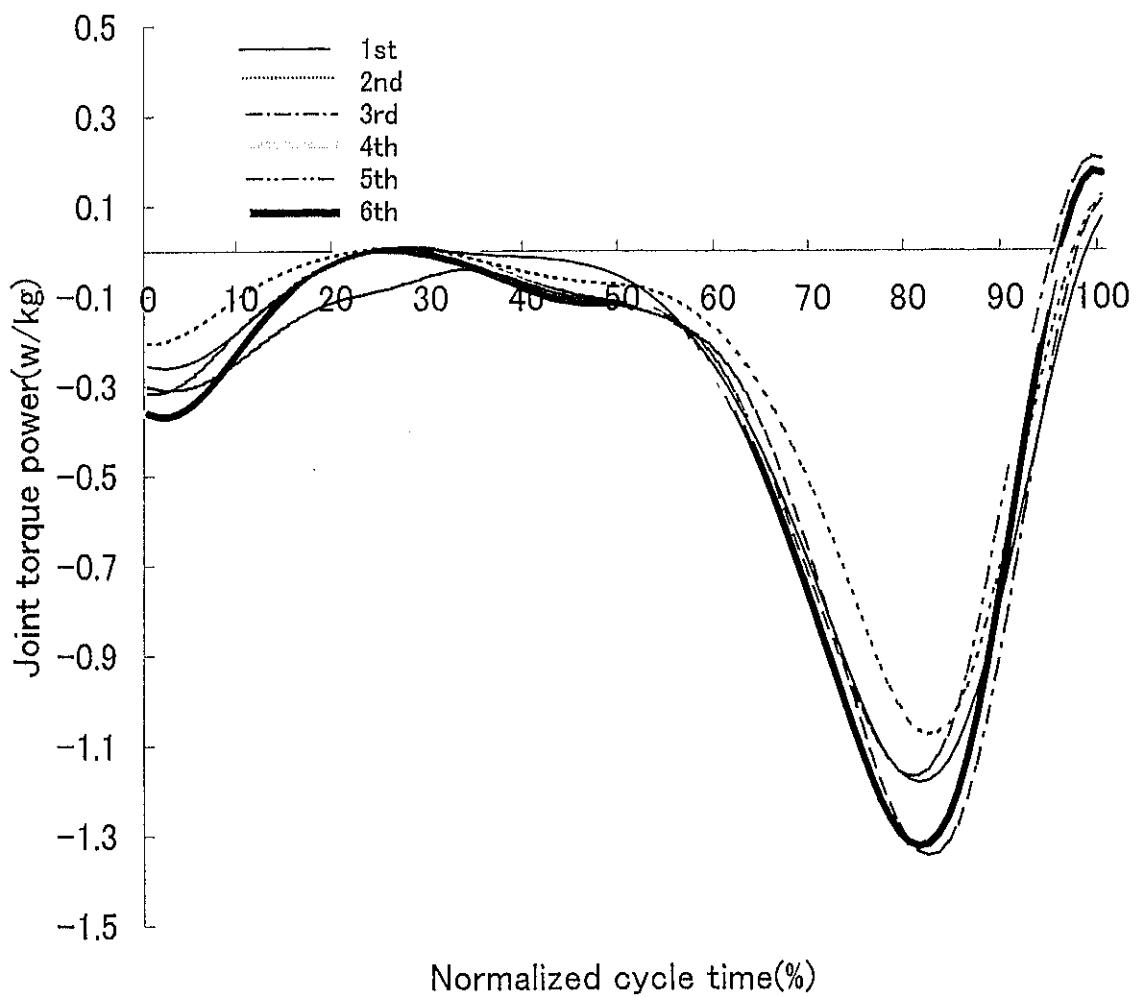


Figure 47-1 Comparison of the joint torque power of the knee joint : Boys

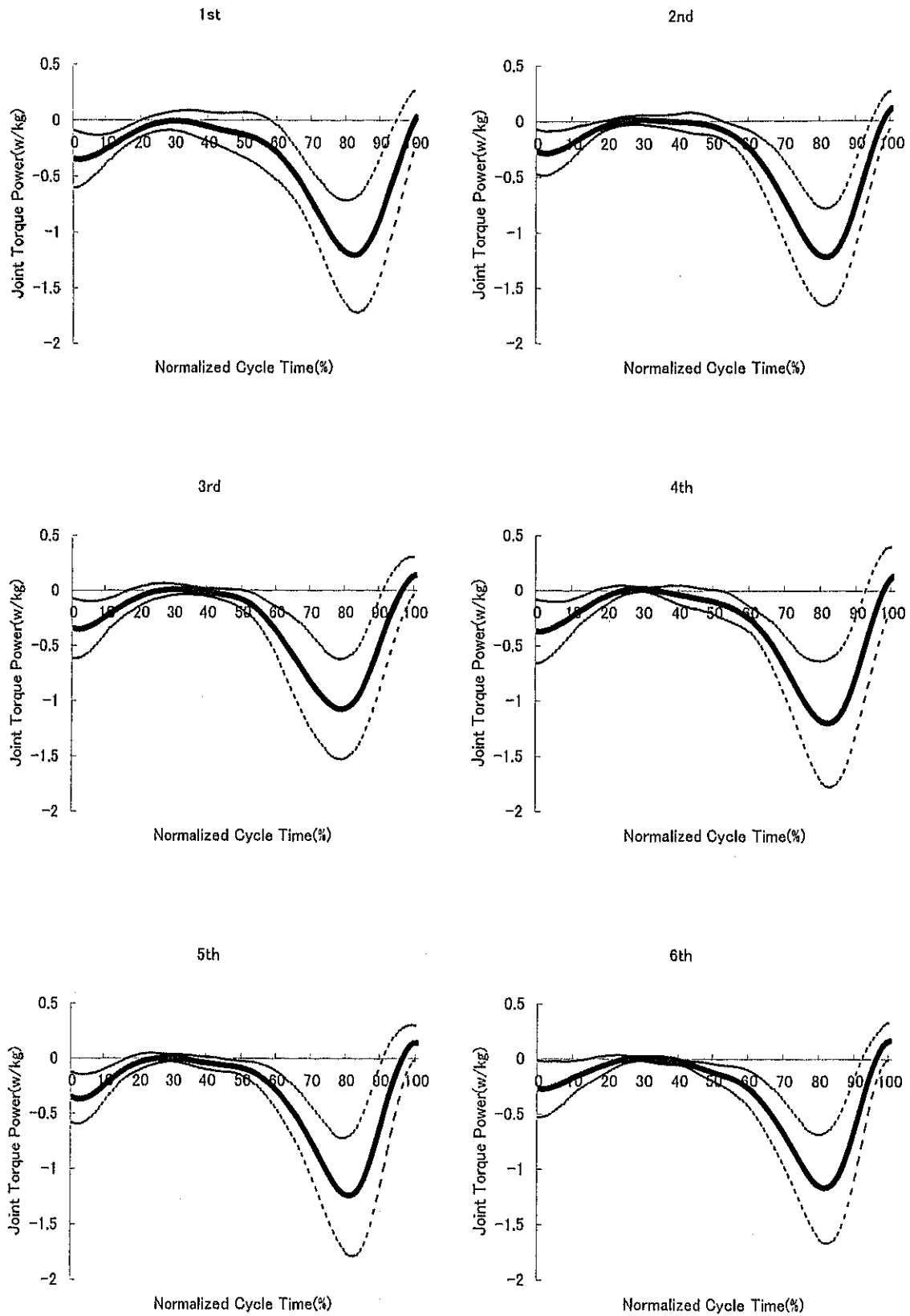


Figure 48-1 Averaged patterns of the joint torque power of the knee joint : Girls

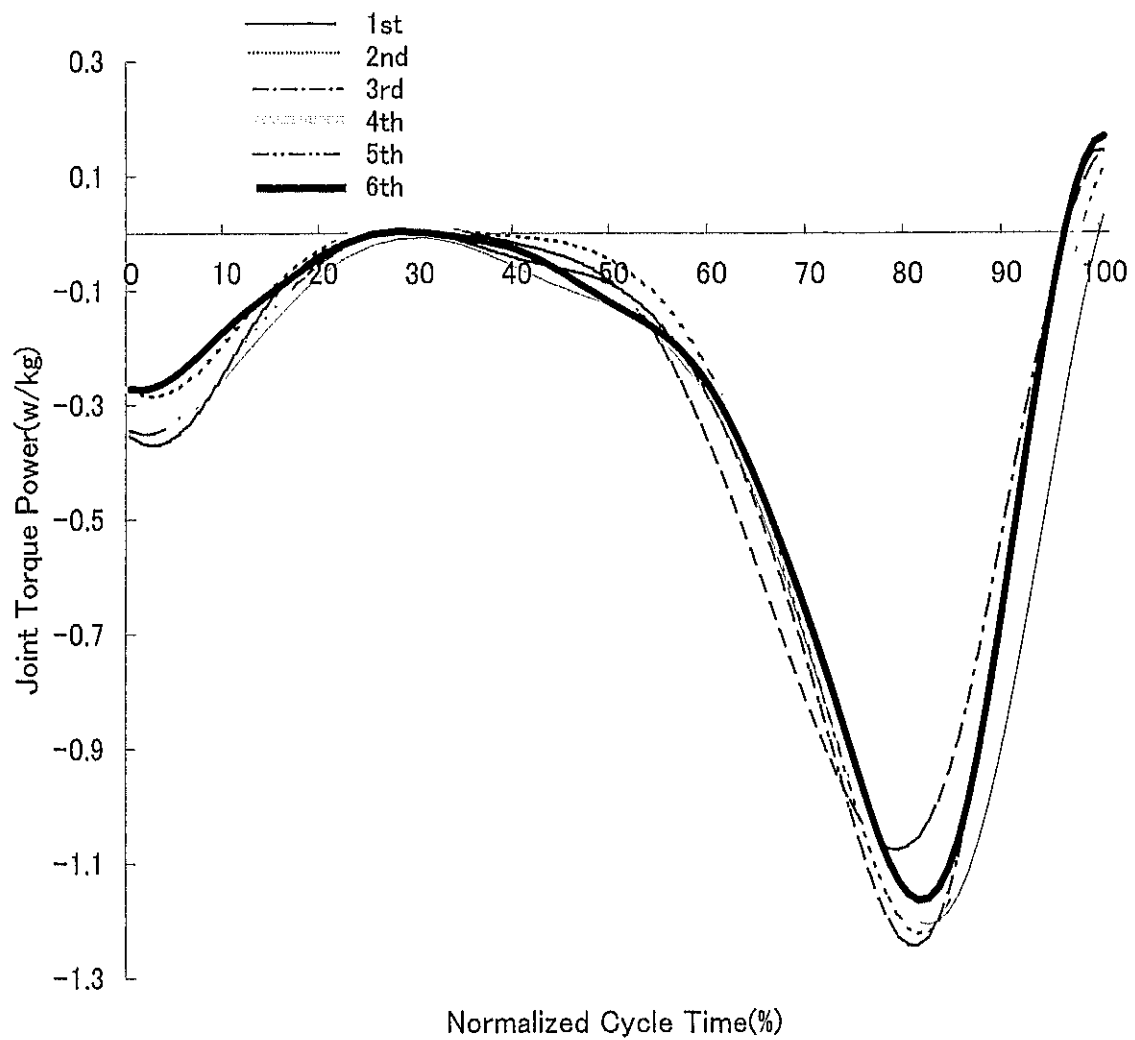


Figure 48-2 Comparison of the joint torque power of the knee joint : Girls

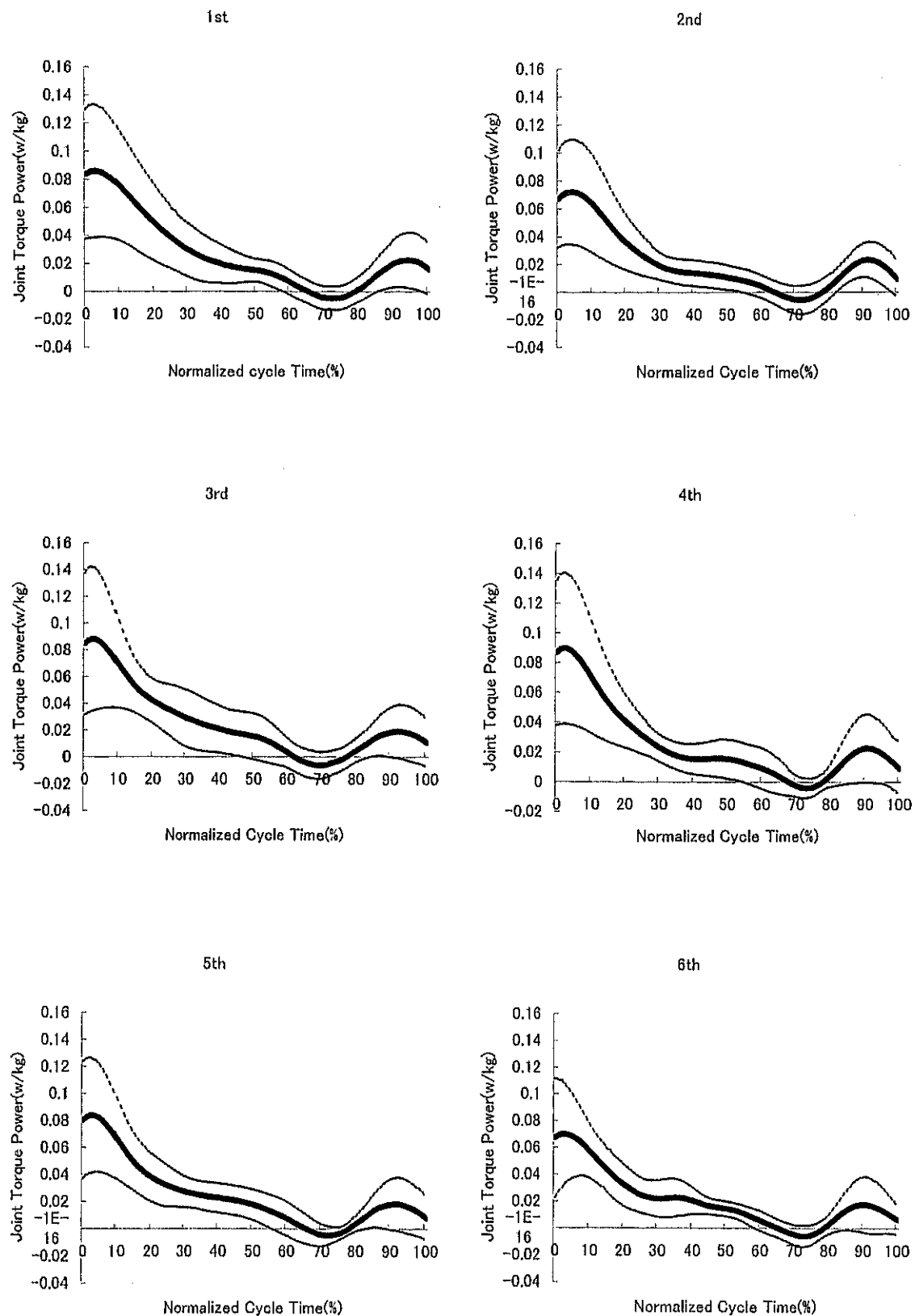


Figure 49-1 Averaged patterns of the joint torque power of the ankle joint : Boys

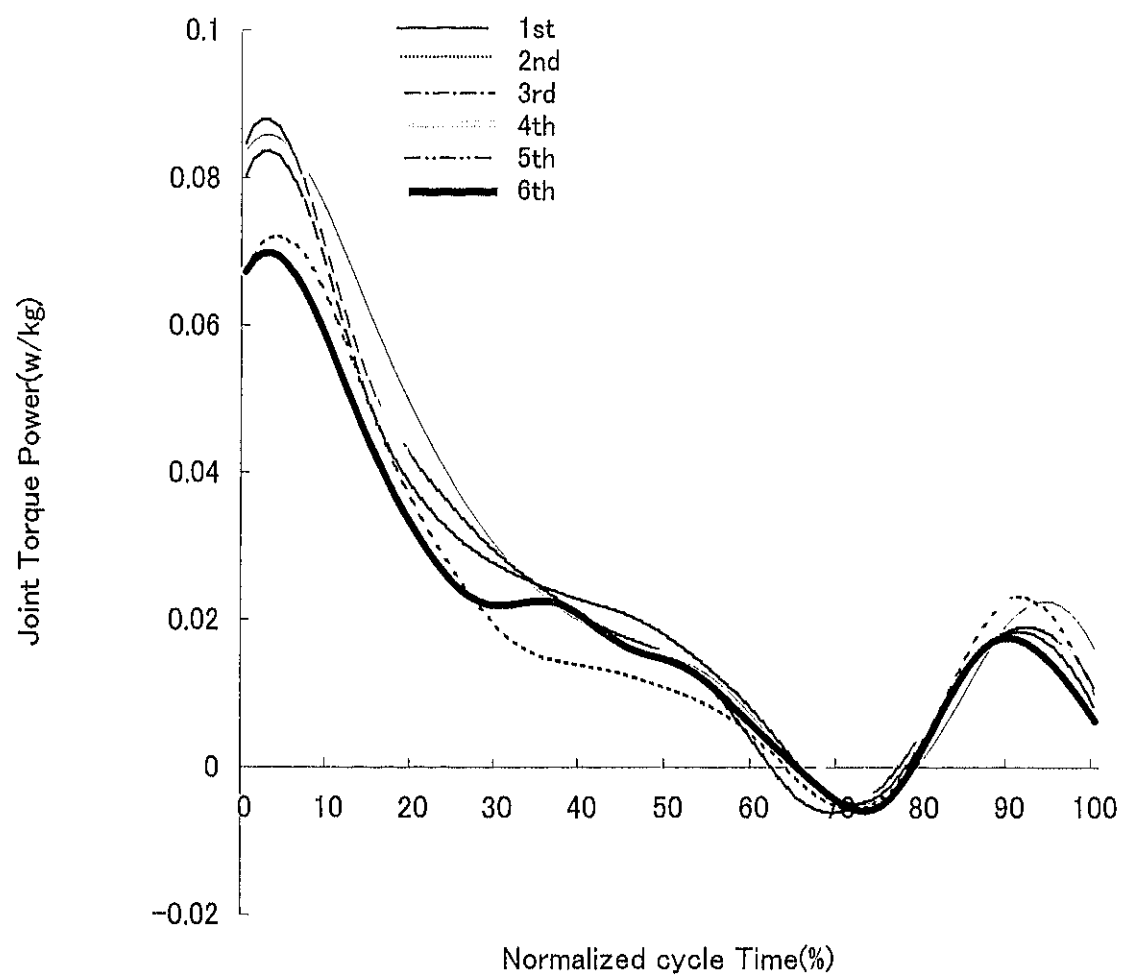


Figure 49-2 Comparison of the joint torque power of the ankle joint : Boys

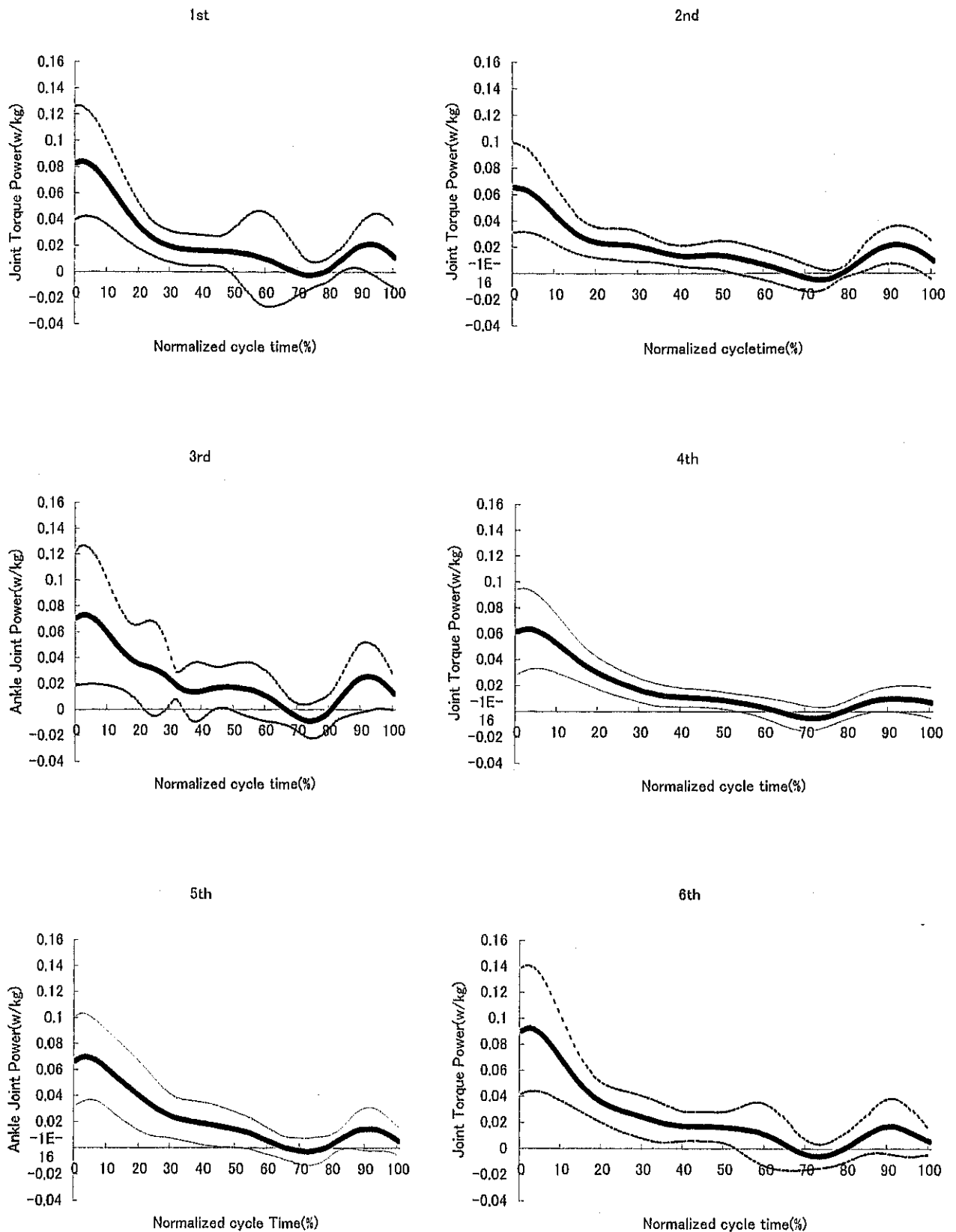


Figure 50-1 Averaged patterns of the joint torque power of the ankle joint : Girls

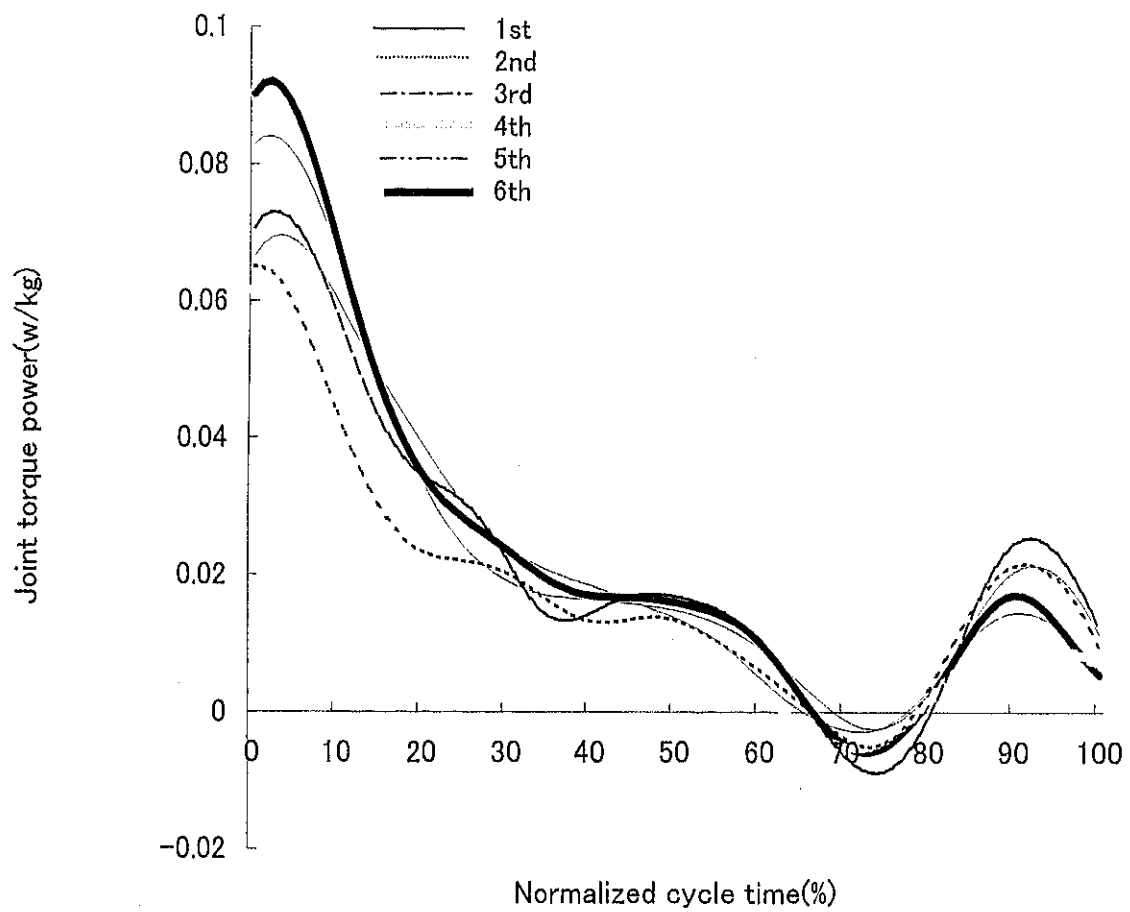


Figure 50-2 Comparison of the joint torque power of the ankle joint : Girls