

НАЦИОНАЛНА СПОРТНА АКАДЕМИЯ “ВАСИЛ ЛЕВСКИ”

Катедра: „Гимнастика”

Илия Димитров Кючуков

**БИОМЕХАНИЧНИ МОДЕЛИ НА БЕЗОПОРНАТА ФАЗА НА
ГИМНАСТИЧЕСКИ УПРАЖНЕНИЯ С КОМБИНИРАНЕ
НА РОТАЦИОННИ ДВИЖЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд

за придобиване на научна степен

„Доктор на науките” в професионално направление 7.6. Спорт

Рецензенти:

Проф. Бонка Михайлова Димитрова, доктор

Проф. Здравко Петров Аракчийски, доктор

Проф. Кирил Атанасов Аладжов, ДН

София, 2021

Дисертационният труд е обсъден на вътрешна защита на 19.10.2021 г. и предложен за официална защита от катедра „Гимнастика“ към Национална спортна академия „Васил Левски“.

Трудът съдържа 314 страници, 104 фигури, 7 приложения. Библиографията включва общо 237 литературни източника, от които 75 на кирилица и 162 на латиница.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22.02.2022 г. от 14:00 ч. в зала А-3 НСА „Васил Левски“ на адрес: София 1700, Студентски град, ул. „Академик Стефан Младенов“ 21.

Въведение

Усъвършенстването на спортната техника и повишаването на ефективността на двигателните действия изискват успешното решаване на редица въпроси, свързани с управлението на движението.

За да бъде достатъчно полезна на практиката, спортната наука трябва да служи не само за анализ на съществуващи реални движения, но и за намиране на нови двигателни програми с желани характеристики, с доказана ефективност и разбира се, достъпни за изпълнение. Като във всяка една научна област, така и в спорта добре известна е първостепенната роля на математичното моделиране за извършването на ефективна познавателна дейност и за намирането на определена двигателна оптималност. Особено това се отнася за гимнастиката - спорт с изключително многообразие от двигателни форми и неизчерпаемост от движения, където редица въпроси чакат отговори, а проблеми на техниката - своето успешно разрешаване.

Гимнастическите упражнения съдържат взаимозависими фази, всяка от които се характеризира със собствени технически особености и механизми за контрол. Въпреки че основните характеристики на безопорната фаза се определят още по време на опорния период (траектория на ЦТ, кинетичен момент, времетраене), в летежа съществуват значителни възможности за въздействие и оказване на контрол върху движението (ротационния компонент). В най-голяма степен това важи за безопорните фази с комбиниране на ротации (напр. вид превъртане с ротация около надлъжната ос). Двигателното поведение на тялото по време на безопорната фаза се определя от специфични биомеханични принципи, а качеството на изпълнение на тази фаза можем да приемем като показател за техническия (двигателния) капацитет на изпълнителя. В повечето случаи безопорната фаза представлява най-атрактивната част от движението, което кара спортистите да насочват усилията си към подобряване характеристиките на летежните фази.

Традиционно прилаганият подход, при който заключенията се градят въз основа на конкретни реални изпълнения, ще доведе до ограничени знания, свързани само с изследваните изпълнения, т.е. обхвата на обобщенията ще се ограничи единствено в полето на съществуващите двигателни прояви. Това означава, че всяко подобрене на техниката ще следва само практическия опит и само реални реализации. Търсенето на нови, ефективни технически решения би се основавало само на логични предположения или интуицията на треньорите и учените, а въвеждането и експериментирането в практиката

на двигателни новости без изяснени количествени характеристики и липса на ясна представа за очакваните резултати, освен разхищение на време и усилия, в някои случай може да крие и немалък риск от контузии.

С навлизане на математичното моделиране и компютърните технологии в инструментариума на изследователите при изследване на движението значително се повиши познавателната продуктивност на представяните разработки. При целенасочено контролиране на условията и управляващите параметри и променливи може чувствително да се повиши изследователската ефективност в намирането на определена двигателна оптималност. Провеждайки различни манипулации с управляващите параметри на модела, можем да обезпечим определено поведение, което е трудно постижимо (или невъзможно) при провеждане на практически експерименти в реални условия. Освен това лесно могат да бъдат определени водещите фактори при конкретна двигателна проява, както и да бъде установена чувствителността на началните условия и различни структурни компоненти върху двигателното поведение на тялото на спортиста. Моделирането освен мощен инструмент за бързо намиране и оценяване на ефективни технически решения може успешно да се прилага за разработване на нови упражнения.

Независимо от безспорните постижения за множество гимнастически упражнения не са представени детайлни двигателни програми, осигуряващи успешното изпълнение на безопорните фази на упражненията. Без удовлетворителен отговор остават и редица специфични въпроси за продуктивността на различни двигателни действия и прилагани стратегии. Това ни мотивира, след като се възползваме от огромните възможности на моделирането, да изясним за основни упражнения на отделни уреди както факторите, отговорни за ефективността на действията, така и възможностите за контрол върху движението в контекста на съответната двигателна програма. Според нас за спорт като гимнастиката е необходимо разработването на модели на ефективно двигателно поведение за множество конкретни упражнения на различните уреди. Трябва да се изградят двигателни програми, които осигуряват пренос на двигателен навик към по-сложните варианти на съответните упражнения. Това означава, че освен постигането на техническа оптималност е нужно да бъде подсигурана и методична рационалност.

Въз основа на направения анализ на литературните източници и резултатите от проведените предварителни числени експерименти оформихме **хипотезата на изследването:**

Допускаме, че може да бъдат разработени надеждни, методически обосновани, технически рационални модели на безопорната фаза на основни гимнастически упражнения с комбиниране на ротации. Моделираните движения могат да бъдат показани с поредица от изображения, допълнени с описания, разяснения за техническата конструкция и количествени параметри за съответните упражнения. Считаме, че създаването и представянето на еталонни изпълнения на различни типове двигателно поведение са предпоставка както за повишаване на ефективността при изграждане на високо техническо майсторство, така и за обогатяване на теоретичните познания на спортните педагози относно механизмите на контрол и факторите, обуславящи двигателната ефективност по време на безопорната фаза.

2 Цел, задачи, организация и методи на изследването

2.1 Цел на изследването:

Целта на изследването е да бъдат установени рационални двигателни действия, които могат да бъдат обособени като моделни изпълнения на гимнастически упражнения с комбиниране на ротации, като прилаганите двигателни стратегии допускат леснодостъпен преход към по-високите нива на сложност на упражненията.

2.2 Задачи на изследването:

1. Наблюдения от подбран видеоматериал на двигателната активност и прилаганите двигателни стратегии при изпълнение на гимнастически упражнения с комбиниране на ротации в безопорната фаза;
2. Разработване на математичен модел на тяло на спортист с висока степен на подвижност за компютърни симулации на пространствени движения при безопорната фаза на спортни упражнения;
3. Установяване на обективни механични ефекти в поведението на системата от свързани тела (проявявани в безопорно положение) и съвместяване на определени ефекти с гимнастическата техника;
4. Разработване на рационални технически решения в контекста на конкретни гимнастически упражнения;
5. Разработване на двигателни стратегии за инициране на ротация около надлъжната ос, изградени на базата на двигателно сходство между различните нива на сложност на упражненията от даден тип;
6. Разработване на моделни изпълнения на гимнастически упражнения, които представляват технически еталон за обучение и са с установена пригодност за успешно усложняване.

2.3 Организация на изследването:

I етап (2012 - 2018):

- Преглед на основните литературни източници, анализ и обобщение - 2012 - 2018;
- Преглед и селектиране на видеоматериал - 2014 - 2018;
- Разработване на математичен модел за компютърни симулации (извеждане на уравненията на движението, оформяне на уравненията във вид, удобен за непосредствена компютърна реализация, разработване на основната програма за провеждане на симулации,

разработване на подпрограми за допълнителни изчисления; валидиране на модела) - 2012- 2018;

II етап (2016 - 2020):

- Провеждане на числени експерименти - 2016 - 2019:
- Изготвяне на моделни изпълнения на основни гимнастически упражнения - 2017 - 2019:
- Оформяне на труда и подготовка за вътрешна защита - 2020

Обект на изследването:

Обект на изследването са основни гимнастически упражнения с комбиниране на ротационни движения в безопрната фаза.

Предмет на изследването:

Предмет на изследването са двигателните действия и двигателните стратегии, които се прилагат за инициране и за спиране на ротацията около надлъжната ос в безопрната фаза и биомеханичните характеристики, обуславящи движението в безопрната фаза.

2.4 Методи на изследването:

- Преглед, анализ и обобщение на литературните източници;
- Видеонаблюдение;
- Математично моделиране;
- Числени експерименти;
- Биомеханичен анализ.

2.4.1 Преглед, анализ и обобщение на литературните източници

Прегледани бяха 237 литературни източника, от които 75 на кирилица и 162 на латиница.

2.4.2 Видеонаблюдение

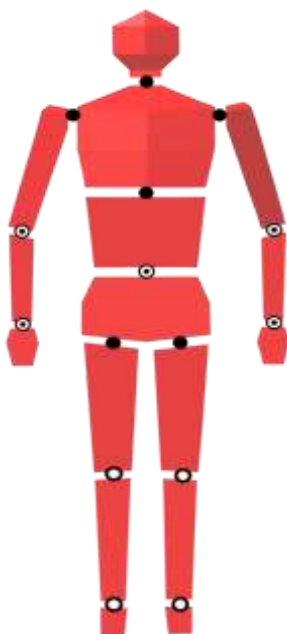
Прегледан е видеоматериал, включващ гимнастически съчетания от различни състезания (олимпийски игри, световни и европейски купи, международни турнири). Селектирани са гимнастически упражнения (87 бр. от мъжката и женската гимнастика), изпълнени от различни спортисти. Приложена е компютърна програма (Kinovea) за покадрово разглеждане на движението за установяване на детайли от изпълнението - начална конфигурация, двигателни стратегии за различни упражнения,

времетраене на безопорната фаза, времетраене на различни двигателни действия.

2.4.3 Математично моделиране

2.4.3.1 Структура на модела.

Представеният в настоящия труд модел е с ъглово управление. Моделът се състои от 16 твърди сегмента, които включват: по три сегмента за всеки горен крайник (мишница, предмишница, ръка); по три сегмента за всеки от долните крайници (бедро, подбедрица, ходило); главата и врата представляват един сегмент. За постигане на по-голяма подвижност торсът е разделен на три части. Относителните движения между 16-те сегмента се обезпечават от 15 ставни връзки, които осигуряват много висика степен на подвижност - 32 вътрешни степени на свобода. Външните степени на свобода са 6 (3 ротационни и 3 транслационни).



Фиг. 2.1 Сегменти на тялото и ставни връзки. Броят на степените на свобода в ставните връзки е означен с: ● - 3 ст. на св.; ⊙ - 2 ст. на св.; ⊖ - 1 ст. на св.

Достъпни за имитация са характерните анатомични движения: в раменните и в тазобедрените стави - флексия/екстензия, абдукция/аддукция, външна/вътрешна надлъжна ротация; в лакътните стави - флексия/екстензия, пронация/супинация; в ставите на китките - флексия/екстензия и абдукция/аддукция; в глезените движенията са флексия/екстензия. Между горната и средната част на торса движенията са - флексия/екстензия, лява/дясна странична флексия, надлъжна ротация. Между средната и долната част на торса - флексия/екстензия и

лява/дясна странична флексия. Главата е с три ротационни степени на подвижност, които позволяват навеждане напред/назад, наклоняване наляво/надясно и надлъжна ротация. Броят на ротациите във всяка става е показан на фиг. 2.1.

2.4.3.2 Определяне на антропометричните и масово-инерционните характеристики. Тензор на инерцията

За определянето на масово-инерционните характеристики на тялото е приложен методът, описан от Зациорский и колектив (1981)¹. За изчисляването на дължината на сегментите са използвани съответните таблици с коефициенти на уравненията на множествена регресия от вида $y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3$, при: дължината на краката (x_1), дължината на тялото (x_2) и дължината на ръцете (x_3). Ползвани са също и уравненията от вида $y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2$ за изчисление на други масово-инерционни характеристики по теглото (x_1) и дължината на тялото (x_2).

При ротационните движения важна масово-инерционна характеристика представлява тензорът на инерция на тялото (I_c). Представен в матрична форма той има вида:

$$I_c = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

При модела осите на локалните координатни системи на всеки сегмент ($C_i X_i Y_i Z_i$) сме ориентирали така, че да съвпадат по направление с надлъжната, страничната и напречната ос на съответния сегмент, а началото им се намира в локалните центрове на масата. Това означава, че спрямо собствената локална координатна система тензорът на инерция на всеки сегмент има диагонален вид, а диагоналните му елементи са инерционните моменти спрямо главните оси на сегмента. Стойностите на тези инерционни моменти получаваме по описаната методика на Зациорски и колектив (1981).

Тензорът на инерция на сегмент „i“, дефиниран в координатната система $CX_C Y_C Z_C$ (фиг. 2.2), се получава от израза:

$$I_i^c = I_{tr}^c + I_{rot}^c,$$

¹ Зациорский, В. М, Аруин, А. С. & Селуянов, В. Н. (1981). Биомеханика двигательного аппарата человека. Физкультура и спорт, Москва.

$$\text{където } \mathbf{I}_{tr}^c = m_i \cdot \begin{bmatrix} r_{iy}^2 + r_{iz}^2 & -r_{ix}r_{iy} & -r_{ix}r_{iz} \\ -r_{iy}r_{ix} & r_{ix}^2 + r_{iz}^2 & -r_{iy}r_{iz} \\ -r_{iz}r_{ix} & -r_{iz}r_{iy} & r_{ix}^2 + r_{iy}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Тук r_{ix} , r_{iy} , r_{iz} са компонентите на вектора на положението r_i^c на локалния център на масата на сегмент „i“ в координатната система $CX_C Y_C Z_C$ (фиг. 2.2), а m_i е масата на сегмента. Събираемото \mathbf{I}_{tr}^c отразява преместването на координатното начало C_i от локалната $C_i X_i Y_i Z_i$ към координатната система $CX_C Y_C Z_C$. Второто събираемо \mathbf{I}_{rot}^c отразява завъртането на осите на локалната координатна система $C_i X_i Y_i Z_i$ до направлението на осите на координатната система $CX_C Y_C Z_C$, като

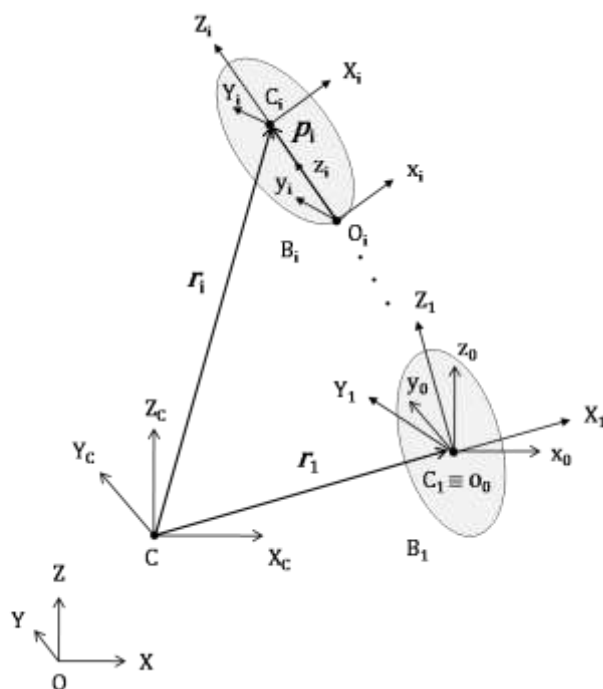
$$\mathbf{I}_{rot}^c = \mathbf{G}_i^c \mathbf{I}_i^c \mathbf{G}_i^{cT}, \quad (2.3)$$

където \mathbf{I}_i^c е тензорът на инерция на сегмент „i“ в локалната координатна система, \mathbf{I}_{rot}^c е тензорът на инерция след завъртането (спрямо коорд. система $CX_C Y_C Z_C$), а \mathbf{G}_i^c е матрица на завъртането и е от вида (2.4).

2.4.3.3 Определяне ориентацията на отделните сегменти на тялото. Трансформационни матрици

Обикновено един от сегментите играе специфична роля при представяне на зависимостите между движенията. Този сегмент се нарича базов, като в настоящия модел това е средната част на торса (B_1). При представения модел параметрите за определяне ориентацията на сегментите са модифицирани ъгли на Ойлер, известни като ротации x-y-z или ъгли на Бруан. Тези ъгли ни служат за определяне на ориентацията както на базовия, така и на останалите сегменти на тялото.

Дефинирането на ъглите е свързано с уточняване на съответните координатни системи (S). Въвеждаме неподвижна координатна система (S_0) $OXYZ$, спрямо която се отчита глобалното движение. Към всеки сегмент са прикрепени две координатни системи. Едната (S_{Ci}) $C_i X_i Y_i Z_i$ е с начало центъра на тежестта на дадения сегмент C_i ($i = 1, \dots, 16$). Другата координатна система (S_{Oi}) $O_i x_i y_i z_i$ е с начало в ставната връзка O_i ($i = 2, \dots, 16$) на проксималния край на съответния сегмент. Тези две локални координатни системи са неизменно фиксирани със съответстващия им сегмент (B_i) и се въртят съвместно с него (фиг. 2.2). С начало ЦТ на тялото е свързана невъртящата се координатна система $CX_C Y_C Z_C$. Към базовия сегмент (B_1) е закрепена помощната координатна система $O_0 x_0 y_0 z_0$ с начало в ЦТ (C_1) на сегмента. Тази система се движи успоредно на системата $CX_C Y_C Z_C$, т.е. извършва само транслационно движение.



Фиг. 2.2 Координатни системи: OXYZ - неподвижна в пространството; CX_CY_CZ_C и O₀x₀y₀z₀ са невъртящи се; C_iX_iY_iZ_i и O_ix_iy_iz_i - фиксирани в отделните сегменти (B_i)

Приложената система на модифицирани ъгли на Ойлер (1-2-3) съответства на следните последователни завъртания:

- завъртане на ъгъл ϕ около оста OX, матрица $G_{x,\phi}$,
- завъртане на ъгъл θ около оста OY', матрица $G_{y,\theta}$,
- завъртане на ъгъл ψ около оста OZ'', матрица $G_{z,\psi}$.

Резултантната матрица на този преход между координатните системи има вида: $G_{\phi,\theta,\psi} = G_{x,\phi} G_{y,\theta} G_{z,\psi} =$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi & s\theta \\ c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & -s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & -s\phi c\theta \\ s\phi s\psi - c\phi s\theta c\psi & c\phi s\theta s\psi + s\phi c\psi & c\phi c\theta \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

където $s \equiv \sin$, $c \equiv \cos$.

Този вид матрица прилагаме за ротациите при ставите с три степени на свобода. Ротациите на базовия сегмент спрямо невъртящата се координатна система O₀ x₀ y₀ z₀ също се определят с матрица на преход от показания вид.

При стави с две степени свобода на движение (лакътните стави) ползваме матрица на преход от вида:

$$\mathbf{G}_{\theta,\psi} = \mathbf{G}_{y,\theta} \mathbf{G}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi & s\theta \\ s\psi & c\psi & 0 \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

По две степени на свобода има в ставите на китките и при движенията между средната и долната част на торса, като съответстващата матрица при този преход има вида:

$$\mathbf{G}_{\phi,\theta} = \mathbf{G}_{x,\phi} \mathbf{G}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ s\phi s\theta & c\phi & -s\phi c\theta \\ -c\phi s\theta & s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Една ротация се извършва в коленните и в глезенните стави с матрица на преход:

$$\mathbf{G}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Всички от разгледаните видове матрици описват прехода от координатната система i към координатната система $i-1$. За обозначаване посоката на прехода въвеждаме долен и горен индекс. Например матрицата \mathbf{A}_i^{i-1} е матрица на преход от координатна система i към координатна система $i-1$. За по-голяма компактност на изразите представяме матриците на преход при ротация и трансляция като хомогенна трансформация с матрици от вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i^{i-1} &= \mathbf{T}_i^{i-1} \mathbf{R}_i^{i-1} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & [\mathbf{l}_i^{i-1}]_{(3 \times 1)} \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\mathbf{G}_i^{i-1}]_{(3 \times 3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_i^{i-1} & \mathbf{l}_i^{i-1} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.8) \end{aligned}$$

където матрицата \mathbf{G} е с размерност 3×3 и е от вида (2.4), $\mathbf{l}_i^{i-1} = [x_{oi}^{i-1} \ y_{oi}^{i-1} \ z_{oi}^{i-1}]^T$ е вектор с компоненти координатите на началото O_i на координатната система $O_i \ x_i \ y_i \ z_i$, проектирани в координатната система $O_{i-1} \ x_{i-1} \ y_{i-1} \ z_{i-1}$, "T" е знак за транспониране. Матрицата $\mathbf{0}_{(1 \times 3)} = [0 \ 0 \ 0]$ е с размери 1×3 . Например, ако $\mathbf{p}_i^i = [x_{Ci} \ y_{Ci} \ z_{Ci} \ 1]^T$ е вектор на положението на центъра на тежестта C_i от сегмент i , представен в локалната координатна система (т.е. разположен е в проксималния край на сегмента, като свързва началото на $O_i \ x_i \ y_i \ z_i$ с C_i), можем да изразим

този вектор в отправната координатна система $S_{X_c Y_c Z_c}$ посредством хомогенни трансформации:

$$\mathbf{p}_i^c = \mathbf{A}_1^c \mathbf{A}_2^1 \dots \mathbf{A}_i^{i-1} \mathbf{p}_i^i, \quad (2.9)$$

където $\mathbf{A}_1^c \mathbf{A}_2^1 \dots \mathbf{A}_i^{i-1}$ са матрици на преход между съответните координатни системи на отделните тела. В общия случай при "n" на брой тела преходът от локалната (S_n) към отправната (S_j) координатна система се осъществява с матрицата:

$$\mathbf{A}_n^j = \prod_{i=j}^{n-1} \mathbf{A}_{i+1}^i$$

2.4.3.4 Уравнения на движението

При извеждането на уравненията на движението на тялото прилагаме фундаменталния принцип, известен като закон за запазване големината и посоката на вектора на кинетичния момент спрямо невъртяща се координатна система с начало ЦМ на тялото. Във векторно представяне изразът на кинетичния момент приема вида:

$$\mathbf{H}_c = \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}_i^c \times m_i \dot{\mathbf{r}}_i^c + [\mathbf{I}_i \boldsymbol{\Omega}_i]^c), \quad (2.10)$$

където: \mathbf{H}_c е кинетичният момент на тялото спрямо ЦМ; m_i е масата на сегмент i ; \mathbf{r}_i^c е радиус-вектор на ЦМ на сегмент i (и съответната производна $\dot{\mathbf{r}}_i^c$) в отправната координатна система $S_{X_c Y_c Z_c}$; \mathbf{I}_i е тензор на инерцията на сегмент i ; $\boldsymbol{\Omega}_i$ е ъгловата скорост на сегмент i . Произведението $\mathbf{I}_i \boldsymbol{\Omega}_i$ (собствен кинетичен момент) също е представено в отправната координатна система (S_c). Определяме векторите \mathbf{r}_i^c , като прилагаме метода на затворените контури. Например векторът \mathbf{r}_i^c (фиг.2.2), представяме в отправната координатна система $S_{X_c Y_c Z_c}$ посредством израз:

$$\mathbf{r}_i^c = \mathbf{r}_1^c + \mathbf{R}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \dots \mathbf{A}_i^{i-1} \mathbf{p}_i^i \quad (2.11)$$

За удобство вместо матрица на преход \mathbf{A}_1^c , в началото на дясната страна при уравненията от вида (2.11) ползваме израз $\mathbf{r}_1^c + \mathbf{R}_1^0$. Това ще ни улесни впоследствие при извеждане на неизвестните производни $\dot{\phi}_1$, $\dot{\theta}_1$ и $\dot{\psi}_1$.

При извеждане на уравненията на движението ползваме израз за центъра на масата на система от тела:

$$m \mathbf{r}_c = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i, \quad m = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2.12)$$

При положение, че координатната система е с начало центъра на масата, $\mathbf{r}_c = 0$, от което:

$$0 = m_1 \mathbf{r}_1^c + \dots + \sum_{i=2}^{16} m_i \mathbf{r}_i^c$$

от където след преобразувания извеждаме израза за \mathbf{r}_1^c .

За намирането на скоростите $\dot{\mathbf{r}}_i^c$ на ЦМ на отделните сегменти е необходимо матриците \mathbf{R}_1^0 и \mathbf{A}_i^{i-1} ($i = 2, \dots, 16$) от изрази от вида (2.11) да бъдат диференцирани. От теоретичната механика (Ангелов, 2005, 2008)² е известно, че това може да се осъществи по следния начин:

$$\dot{\mathbf{R}}_1^0 = \tilde{\mathbf{W}}_1^0 \mathbf{R}_1^0 \quad (2.13)$$

$$\text{и от (2.8) } \dot{\mathbf{A}}_i^{i-1} = \dot{\mathbf{T}}_i^{i-1} \mathbf{R}_i^{i-1} + \mathbf{T}_i^{i-1} \dot{\mathbf{R}}_i^{i-1} = \mathbf{T}_i^{i-1} \tilde{\mathbf{W}}_i^{i-1} \mathbf{R}_i^{i-1} = \tilde{\mathbf{W}}_i^{i-1} \mathbf{R}_i^{i-1} \quad (2.14)$$

след като сме отчели, че $\dot{\mathbf{T}}_i^{i-1} = 0$ ($l = \text{const}$ при $i = 2, \dots, 16$). Следва да поясним матрицата $\tilde{\mathbf{W}}_1^0$. Знакът "~" означава антисиметричен вид на представяне, т.е.:

$$\tilde{\mathbf{W}}_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{z1}^0 & \Omega_{y1}^0 & 0 \\ \Omega_{z1}^0 & 0 & -\Omega_{x1}^0 & 0 \\ -\Omega_{y1}^0 & \Omega_{x1}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\Omega}_1^0 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

Векторите $\mathbf{W}_1^0 = [\Omega_{x1}^0 \quad \Omega_{y1}^0 \quad \Omega_{z1}^0 \quad 0]^T$ и $\Omega_1^0 = [\Omega_{x1}^0 \quad \Omega_{y1}^0 \quad \Omega_{z1}^0]^T$ представляват един и същ вектор, но с различна размерност - съответно (4×1) и (3×1) . Това е векторът на ъгловата скорост на сегмент 1, проектиран в отправната координатна система $O_0 x_0 y_0 z_0$. Продължаваме с набавянето на нужните оператори, придържайки се към поясненията на Ангелов (2005, 2008). Преходът към отправната координатна система $O_0 x_0 y_0 z_0$, за ъгловата скорост на сегмент 1, изразена с ъгли на Бруан $\dot{\Theta}_1 = [\dot{\phi}_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\psi}_1]^T$, се осъществява с помощта на матрицата:

$$\mathbf{U}_1^{\Omega 0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & s\theta_1 \\ 0 & c\phi_1 & -s\phi_1 c\theta_1 \\ 0 & s\phi_1 & c\phi_1 c\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

² Ангелов, Ил. В. (2005). Матрична механика. Авангард Прима, София. ISBN 954-323-110-9

Ангелов, Ил. В. (2008). Матрична механика кинематика. Авангард Прима, София. ISBN 978-954-323-417-2

Матрици на преход от вида $\mathbf{U}_1^{\Omega 0}$ прилагаме при сегментите с три ротационни степени на свобода. След определянето и на другите подобни матрици на преход за сегментите с две и една степен на свобода и съответните ъглови скорости разполагаме с всички матрици от вида $\tilde{\mathbf{W}}_i^{i-1}$, необходими за диференцирането на съответните матрици $\dot{\mathbf{A}}_i^{i-1}$. След множество замествания, групирания, преобразувания накрая получаваме компонентите на първото събираемо от израза (2.10) на кинетичния момент \mathbf{H}_c , наричано често орбитален кинетичен момент. Пристъпваме към извеждането на второто събираемо от израза (2.10), известно като собствен кинетичен момен. Тук вече работим с вектори и матрици с размерност съответно (3×1) и (3×3) . Собственият кинетичен момен $\mathbf{H}_{c,local}$ се изразява спрямо отправната координатна система $O_0 x_0 y_0 z_0$, която се движи успоредно на системата $CX_c Y_c Z_c$ и извършва само транслационно движение. В някои случаи обаче е по-рационално при междинни операции да проектираме вектори върху осите на локалната координатна система. Така постъпваме и в разглеждания случай, като първоначално намираме $\mathbf{H}_{i,local}$ спрямо собствената (локална) координатна система, където тензорът на инерцията на всеки сегмент има диагонален вид, а компонентите му са известни:

$$\mathbf{I}_i^i = \begin{bmatrix} I_{xxi} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yyi} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz i} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

където I_{xxi} , I_{yyi} , $I_{zz i}$ представляват компонентите на тензора на инерция спрямо главните оси на сегмент i . Продължаваме като подготвяме още един комплект матрици, които служат при проектирането на ъгловата скорост между сегмент i и сегмент $i-1$ $\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = [\dot{\phi}_i \quad \dot{\theta}_i \quad \dot{\psi}_i]^T$ в собствената координатна система на сегмент i - $C_i X_i Y_i Z_i$, която означаваме с $\boldsymbol{\Omega}_i^i$. В този случай матрицата на преход има вида:

$$\mathbf{U}_i^{\Omega i} = \begin{bmatrix} c\theta_i c\psi_i & s\psi_i & 0 \\ -c\theta_i s\psi_i & c\psi_i & 0 \\ s\theta_i & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

Матрици на преход от вида $\mathbf{U}_i^{\Omega i}$ прилагаме при сегментите с три степени на свобода при съответните ротации. Впоследствие определяме матриците на преход на ъгловите скорости към собствените координатни системи и за сегментите с две или една степен на свобода, както и съответните ъглови скорости. От теоретичната механика е известно, че векторът на абсолютната ъглова скорост ($\boldsymbol{\Omega}_i^i$) на даден сегмент i от

системата от свързани сегменти (n), проектиран върху осите на локалната координатна система $C_i X_i Y_i Z_i$, представлява сума от относителните ъглови скорости (на i спрямо $i-1$) на телата ($\omega_{i-1,i}$, $i = 1 \dots n$), проектирани в локалната координатна система $C_i X_i Y_i Z_i$:

$$\Omega_i^i = \omega_{0,1}^i + \omega_{1,2}^i + \dots + \omega_{i-1,i}^i \quad (2.19)$$

В настоящия случай при относителна ъглова скорост, представена с ъгли на Bryant, ($\dot{\Theta}_i$) изразът (2.19) приема вида:

$$\begin{aligned} \Omega_i^i &= U_1^{\Omega 1} \dot{\Theta}_1, \text{ при } i=1; \\ \Omega_i^i &= G_i^{1T} U_1^{\Omega 1} \dot{\Theta}_1 + U_i^{\Omega i} \dot{\Theta}_i \text{ при } i=2; \\ \Omega_i^i &= G_i^{1T} U_1^{\Omega 1} \dot{\Theta}_1 + \dots + G_i^{i-1T} U_{i-1}^{\Omega i-1} \dot{\Theta}_{i-1} + U_i^{\Omega i} \dot{\Theta}_i \text{ при } i > 2, \end{aligned} \quad (2.20)$$

като вземем предвид, че $G_i^{1T} = G_i^{i-1T} \dots G_2^{1T}$

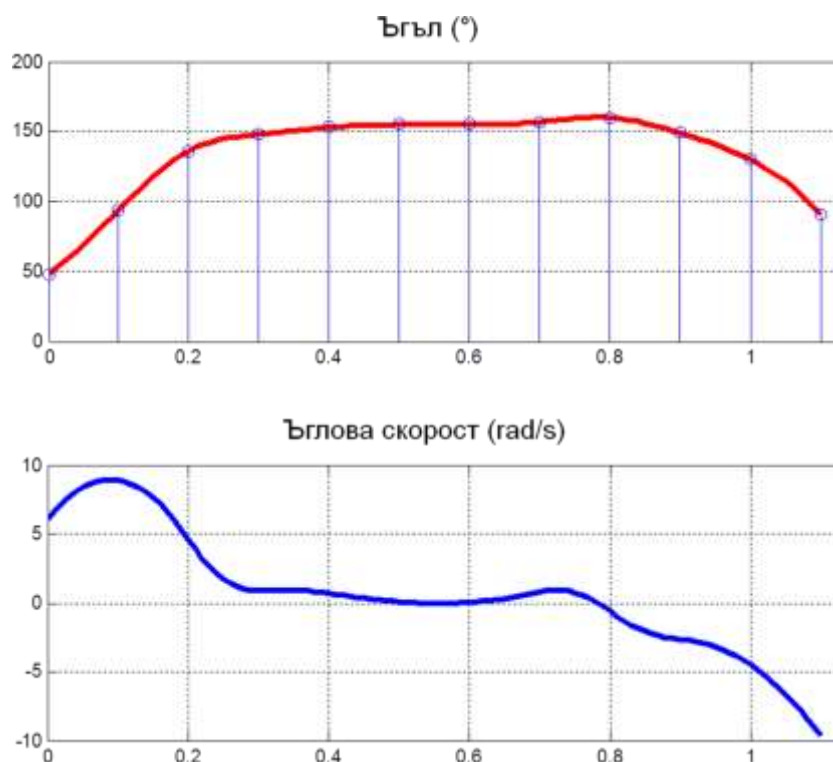
След като изразяваме произведението $I_i^i \Omega_i^i$ (собствен кинетичен момент) в координатната система на сегмент i , лесно, с помощта на резултантната матрица G_i^0 на преход между координатните системи, можем да представим компонентите на произведението $I_i^i \Omega_i^i$, проектирани в отправната координатна система $O_0 x_0 y_0 z_0$ (S_0):

$$\begin{aligned} H_{i,local}^i &= I_i^i \Omega_i^i, \\ H_{i,local} &= G_i^0 H_{i,local}^i \end{aligned} \quad (2.21)$$

По-нататъшната подготовка на уравненията за компютърна реализация включва множество замествания и групирания, като в крайната фаза получаваме система от три обикновени диференциални уравнения (ОДУ) от първи ред, след решаването на които можем да получим ориентацията на базовия сегмент 1 (а оттам и на всички останали сегменти), т.е. ъглите ϕ_1 , θ_1 и ψ_1 в хода на движението.

2.4.3.5 Управление на модела

За решаването на диференциалните уравнения на движението е необходимо да са известни стойностите на ъглите Θ_i и ъгловата скорост $\dot{\Theta}_i$ в ставите по време на движението ($i = 2, \dots, 16$). Задавайки относителните движения в ставите, всъщност контролираме поведението на модела.



Фиг. 2.3 Интерполация на изменението на ъгъла в раменната става (сгъване-разгъване) посредством кубична сплайн функция (при 12 възела)

При реализирането на управлението прилагаме два подхода. При единия подход първо построяваме графиките на функциите на изменението на ъглите в хода на времето. Изграждането на кривите ъгъл-време се извършва с помощта на кубична сплайн функция (фиг. 2.3). Прави се преглед на получената форма на кривата, след което се пристъпва към изграждането на диференциалната крива ъглова скорост - време.

При другия подход за осъществяване на контрол върху относителните движения в ставните ъгли времето за дадено движение се разделя на равни по продължителност подинтервали (обикновено продължителността на подинтервалите е от 0.04 до 0.1 секунди). Приема се, че ъгловата скорост за всеки отделен подинтервал е постоянна и е равна на средната ъглова скорост за промяна на ъгъла в този подинтервал. Съставят се векторите със стойностите на ъгловите скорости за отделните подинтервали.

2.4.3.6 Решаване на уравненията на движението. Програма за числени експерименти

За решаването на диференциалните уравнения на движението е необходимо да се въведат следните входящи данни: антропометричните

и масово-инерционните параметри на отделните сегменти; стойностите на ъглите, описващи началната ориентация на базовия сегмент; стойностите на ъглите в ставите в началния момент (начална конфигурация на тялото) и в хода на изпълнението, както и ъгловата скорост на изменението им; стойността на компонентите на кинетичния момент на тялото спрямо ЦТ. След подготвянето на уравненията за компютърна реализация следва да бъде избран методът за решаването им. В настоящия случай е приложена функцията (solver 113) на програмната система MATLAB за числено интегриране на система нетвърди ОДУ, която се базира на метода на Адамс-Бешфорт-Мултън с променлив ред (Йорданов, 2004)³.

Симулациите на изследваните движения се реализират посредством програма, която съдържа няколко програмни модула с определени оперативни функции. Програмата е разработена и функционира в изчислителната среда MATLAB. Създадената собствена програма за провеждане на числени експерименти и изчисления съдържа общо 45 бр. програмни файла (M-file), от които: основна програма - 17 файла; биомеханични изчисления - 6 файла; начални условия - 11 файла; упражнения и движения - 11 файла. Създаден е програмен архив на вектори за управление на: 51 упражнения; 115 опита на упражненията; 47 експериментални движения.

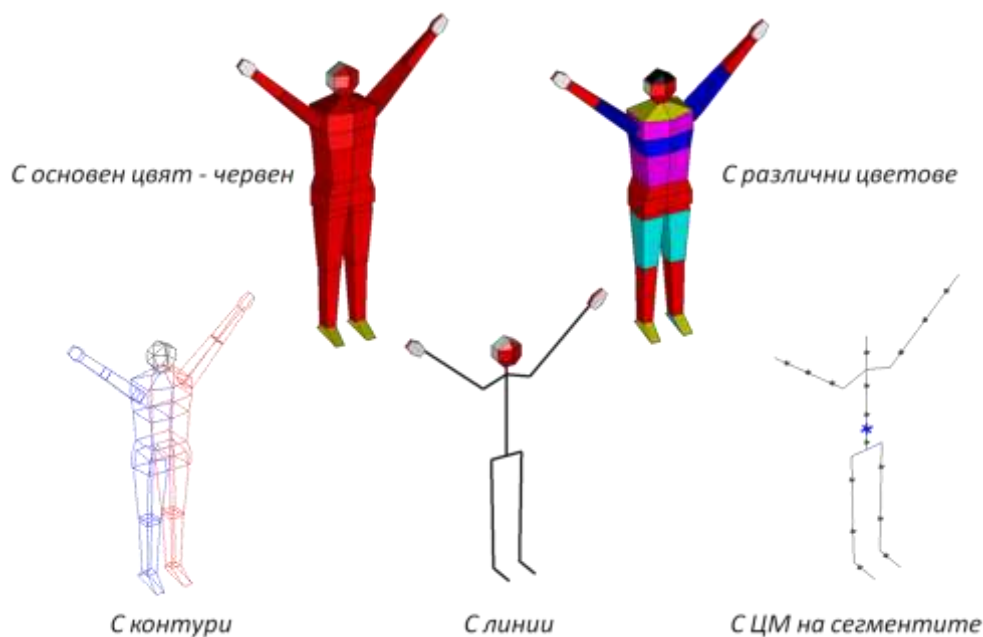
Решението, т.е. изходящите аргументи, е вектор-стълб със стойностите на времето (t) за отделните стъпки на интегрирането и матрица, чиито елементи представляват стойностите на трите ъгъла, описващи ориентацията на базовия сегмент за съответния елемент на вектора на времето (t).

2.4.3.7 Визуализация на резултатите. Антропоморфна структура

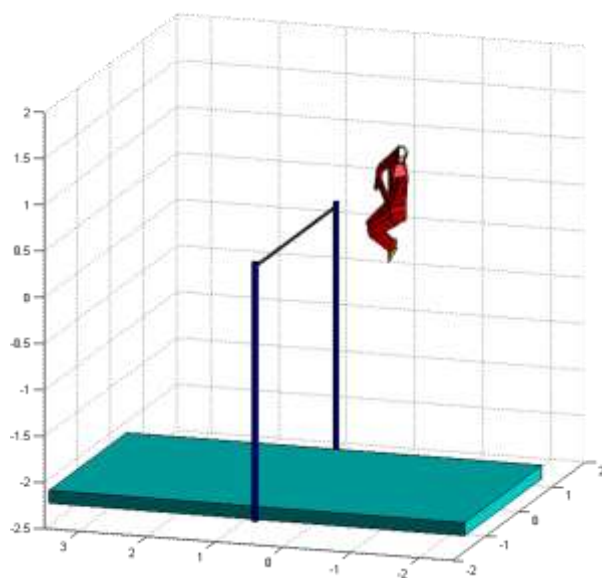
След численото решаване на диференциалните уравнения на движението получаваме стойностите на трите ъглови координати (ϕ_1 , θ_1 и ψ_1) на базовия сегмент за всяка стъпка от интеграционния процес. Тези стойности може да бъдат представени като масив от числа в табличен вид или в графичен вид - криви като функции на времето. Представянето им по този начин обаче значително затруднява възприемането на симулираното движение. Считаме, че рационално решение е разработването на собствена подпрограма за визуализиране на текущите

³ Йорданов, Й. Т. (2004). Приложение на MATLAB в инженерните изследвания. Част II. Русенски университет, Русе, ISBN 954-712-232-0

резултати (фиг. 2.4). По този начин придобиваме пълна представа за движението в хода на самото интегриране.



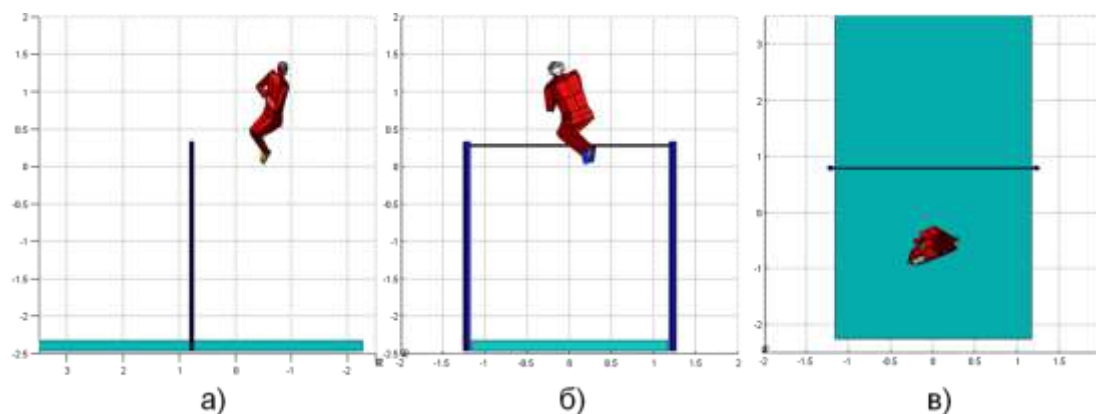
Фиг. 2.4 Варианти за визуализиране на тялото - (3D) антропоморфни структури



Фиг. 2.5 Примерна гледна точка при наблюдаване на симулираното движение

Реализирането на зададеното движение може да бъде наблюдавано от различни гледни точки, като позиционираме "камерата" съобразно спецификата на движенията. Необходимо е да бъдат зададени азимутният ъгъл (хоризонтална ротация около вертикалната ос) и наклонът на хоризонталната равнина (фиг. 2.5).

Вниманието ни изцяло е насочено към ротационните компоненти на движението, поради което при наблюденията можем да пренебрегнем транслационното параболично движение, обуславяно от три прости уравнения, описващи движението на ЦТ. Изборът на гледната точка се определя от вида на движението (фиг. 2.6).



Фиг. 2.6 Варианти на гледна точка в зависимост от наблюдаваното движение: (а) отстрани; (б) отпред; (в) отгоре

2.4.3.8 Оценяване на модела

Преди началото на числените експерименти се пристъпва към проверка на имитационните качества на модела. Валидирането се извършва, като се сравнят данните, които са получени от практическото изпълнение на определени движения с данните от симулациите с модела на същите движения при еднакви механични условия (Фиг. 2.7).



Фиг. 2.7 Сравнение между практическо изпълнение (горе) и симулация (долу) на отскок от висилка - двойно задно полусвито превъртане с надлъжна ротация - 360°

В настоящия случай е направена качествена оценка на пригодността на модела да симулира реално изпълнение от гимнастическата практика. За запис е ползвана дигитална камера (DSLR

Camera – Nikon D700, комплектувана с батериен грип MB-D10 и обектив Nikkor 24-70 mm). Накрая можем да заключим, че в случая е достигнато напълно удовлетворително сходство между изображенията от симулацията и от видеозаснемането. Направено е и допълнително валидиране, като се сравняват резултати за ъгъла на вариациите на страничния наклон между теория и симулация. Получава се пълно съответствие между ъглите, получени аналитично и тези от симулацията с модела. При начален ъгъл на наклона $\theta_0 = 3.7042$ след 90° завъртане $\theta_1(\text{теория}) = 5.10172$, а $\theta_1(\text{симулация}) = 5.101698$.

2.4.3.9 Определяне ориентацията на тялото на спортиста посредством главните инерционни оси

От теоретичната механика е известно, че лесно можем да определим направлението на главните инерционни оси, ако се знае направлението на една от осите (напр. Greenwood, 1988)⁴.



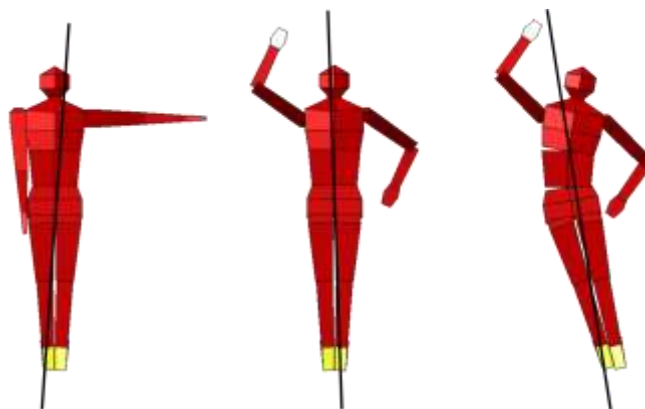
Фиг. 2.8 Направление на главната инерционна ос (завъртане на ъгъл ϕ) при различни конфигурации на тялото

В разглеждания случай въртенето е около главната инерционна ос СХ, от което следва, че $I_{xy}(I_{yx}) = I_{xz}(I_{zx}) = 0$. За да установим направлението на надлъжната главна инерционна ос, е необходимо да намерим ъгъла на завъртането ѝ (ϕ) около оста СХ. За изчисляването на стойността на ъгъла ϕ прилагаме формула от теоретичната механика:

$$\operatorname{tg} 2\phi = 2I_{yz} / (I_{yy} - I_{zz}). \quad (2.23)$$

Прилагаме идентичен подход и за намирането на ъгъла на страничен наклон на тялото, т.е. отклонението встрани от сагиталната равнина.

⁴ Greenwood D. T. (1988). Principles of Dynamics, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.



Фиг. 2.9 Направление (завъртане на ъгъл θ) на главната надлъжна инерционна ос при различни конфигурации на тялото

2.4.4 Числени експерименти

Числените експерименти са проведени в две насоки. От една страна, проведени са експерименти за обогатяване и уточняване на теоретични постановки, както и за потвърждаване на установени факти. От друга страна, проведени са множество експерименти за установяване на конкретно желано поведение и намиране на двигателна оптималност в съответствие с целта на изследването.

2.4.5 Биомеханичен анализ

Към 16-сегментния модел са разработени подпрограми за изчисляване на биомеханични величини като: 3D координатите на ЦТ на тялото и на локалните центрове на тежестта на сегментите; компонентите на скоростта на ЦТ на тялото и на локалните центрове на тежестта на сегментите; компонентите на ъгловата скорост и на кинетичния момент; компонентите на тензорите на инерция на всички сегменти.

За да може да се прави сравнение между механични величини, изчислени за спортисти с различни масово-инерционни и антропометрични данни, в някои случаи се изпълнява процедурата **нормализиране** на дадена величина. За да се получи еквивалентния брой обтегнати превъртания за времето на летеж, Hiley и Yeadon (2008)⁵ уточняват понятието ротационен потенциал, който се изчислява като произведение на кинетичния момент и времето на полет, разделен на 2π пъти инерционния момент при обтегнато тяло. Този подход и понятието ротационен потенциал ползваме и при нашето изследване.

⁵ Hiley, M. J. & Yeadon, M. R. (2008). Optimisation of high bar circling technique for consistent performance of a triple piked somersault dismount. *Journal of Biomechanics*, 41 (8), 1730–1735.

3 Резултати и анализ

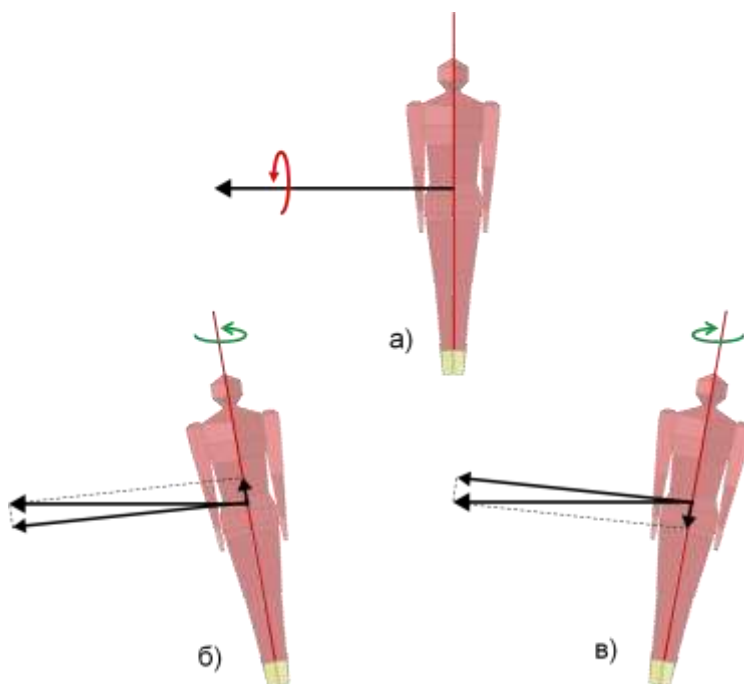
3.1 Въртеливи движения на тялото по време на безопорна фаза

Нашият интерес е фокусиран изцяло върху ротационното движение около ЦМ на тялото. При комбиниране на превъртане и въртене около надлъжната ос движението се разглежда като въртене около неподвижна точка (ЦМ). Този вид движение е известен като случай Ойлер-Поансо. Ротацията се осъществява около моментна ос на въртене, която в хода на движението описва конусни повърхнини.

3.1.1 Създаване на въртеливо движение на тялото около надлъжната ос по време на безопорна фаза

Добре известно е, че при безопорната фаза въртеливото движение около надлъжната ос може да бъде създадено по два начина. При единия е необходимо в безопорната фаза да съществува въртеливо движение около оста на превъртането. При другия начин не е нужно наличието на някакво въртеливо движение, като тук се прилагат основно механизмите на контра ротацията ("хулахупна" техника).

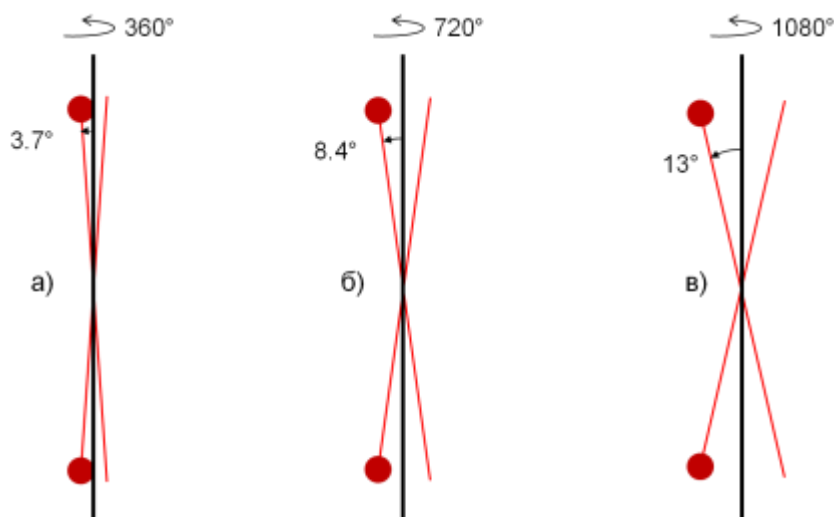
3.1.1.1 Създаване на въртеливо движение на тялото около надлъжната ос по време на безопорна фаза при наличие на въртеливо движение около страничната ос (оста на превъртането)



Фиг. 3.1 Кинетичен момент при 3. обт. превъртане (а). Създаване на въртеливо движение около надл. ос посредством странично наклоняване на тялото: наклон надясно - ротация наляво (б); наклон наляво - ротация надясно (в)

За да бъде създадено въртеливо движение и около надлъжната ос на тялото, е необходимо върху направлението на тази ос да съществува компонент на кинетичния момент (фиг. 3.1б и фиг. 3.1б в). Това може да се осъществи, ако надлъжната главна инерционна ос на тялото е под наклон спрямо направлението на кинетичния момент. В този случай е налице проекция на кинетичния момент върху направлението на надлъжната главна инерционна ос на тялото, което е причина за задаване на ротация и около надлъжната ос, т.е. част от въртеливото движение на превъртането е "пренасочено" за въртене и около надл. ос на тялото.

С увеличаването на големината на страничния наклон се увеличава количеството на завъртанията около надлъжната ос. След симулации на изпълнение на задно обтегнато превъртане с едно, две или три цели завъртания около надлъжната ос (конфигурация - обтегнато тяло, ръце долу плътно до тялото, времетраене - 1 секунда) получихме резултатите, демонстрирани на фиг. 3.6.

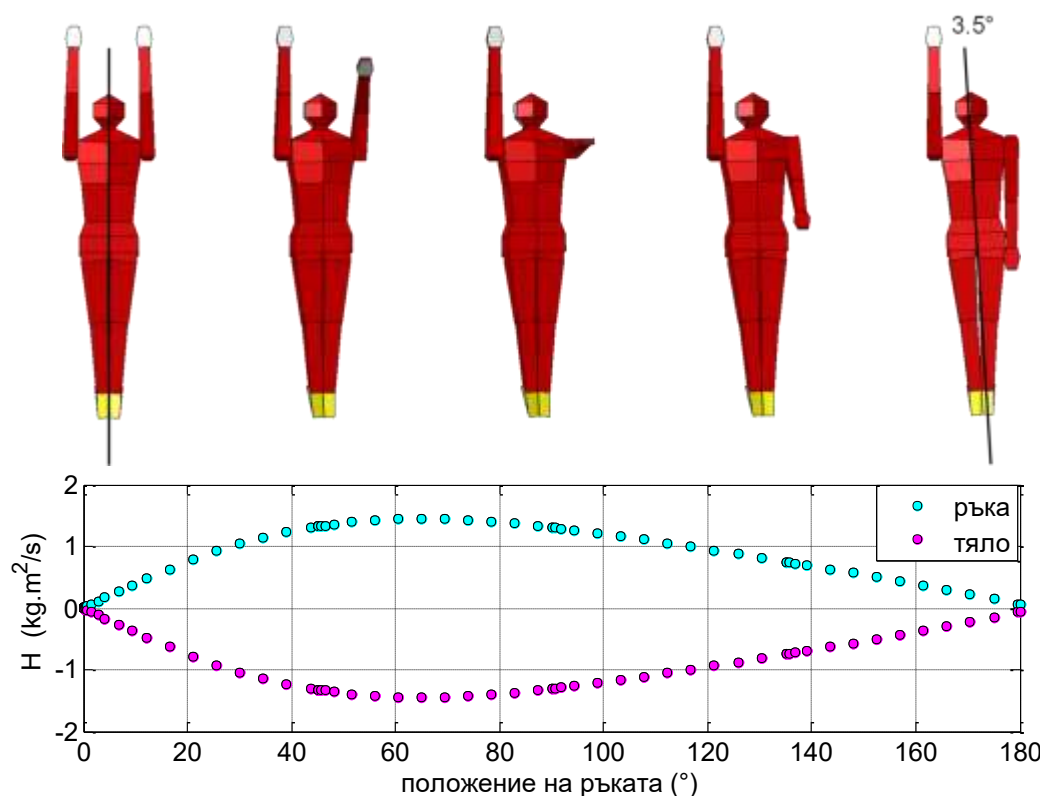


Фиг. 3.6 Ъгъл на страничния наклон при задно обтегнато превъртане в зависимост от количеството на завъртане около надлъжната ос:
(а) при 360°; (б) при 720°; (в) при 1080°

3.1.1.2 Странично наклоняване на тялото при отсъствие на въртеливо движение за превъртането

По време на съответните действия кинетичният момент остава равен на нула, което означава, че ако част от сегментите се завъртат в едната посока, останалите сегменти на тялото ще се завъртят в обратната посока. Количеството на завъртанията зависи от антропометричните и масово-инерционните характеристики на сегментите.

На фиг. 3.9 е показан ефектът върху големината на страничния наклон при снемане на едната ръка отпред до долу от изходно положение ръце горе. Крайната големина на наклона е резултат от стойността на наклона вследствие на снемането на ръката плюс малка добавка от допълнителното наклоняване на главната инерционна ос при асиметричното крайно положение на ръцете.

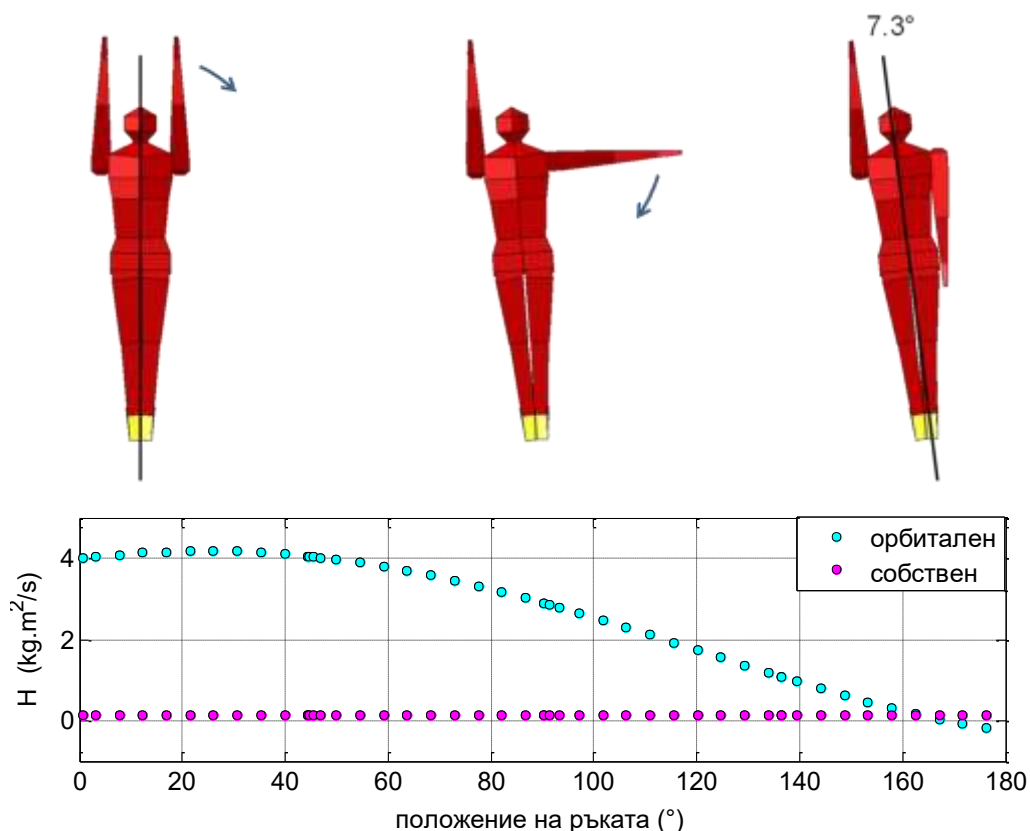


Фиг. 3.9 Кинетичен момент (H_y) на лявата ръка (■) и на останалите сегменти на тялото (■) при снемане на ръката отпред

Установяваме как влияе върху големината на страничния наклон друго типично действие - снемане на едната ръка отстрани до долу (фиг. 3.10 горе). В съответствие с очакваното наклонът на главната надлъжна инерционна ос е по-голям, отколкото при предходния вариант - 7.3° и е резултат от движението на ръката (5.77°) плюс допълнителното наклоняване на главната надлъжна инерционна ос (1.55°) вследствие на асиметричното крайно положение на ръцете.

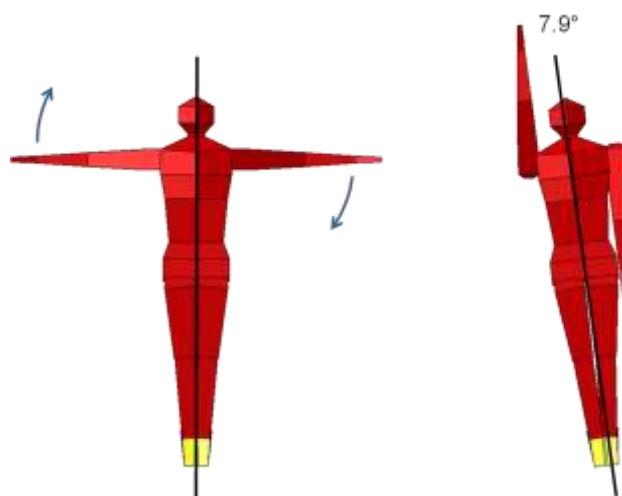
Поради малкия инерционен момент на ръката (I_p) големината на стойността на кинетичния момент на ръката се дължи основно на движението на локалния ЦМ на ръката. Тази особеност е отразена на графиката на фигура 3.10. Очевидно за постигането на по-голямо странично наклоняване на тялото при снемането на ръката е необходимо частният център на масата на ръката да се движи на по-голямо

разстояние от сагиталната равнина. Това се постига, когато ръката се сменя обтегната от страни.



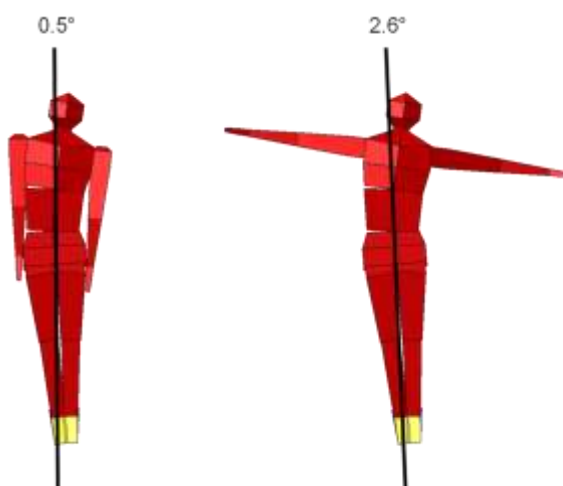
Фиг. 3.10 Компоненти на кинетичния момент на лявата ръка:
 $\mathbf{r}_p^c \times m_p \cdot \dot{\mathbf{r}}_p^c$ (■) и $\mathbf{I}_p \boldsymbol{\Omega}_p$ (■) при снемането на ръката от страни

Можем още малко да повишим големината на страничния наклон на гл. ин. надлъжна ос (7.9°), ако от изходно положение ръце встрани едната ръка се повдига от страни до горе, а другата ръка се сменя от страни до долу (фиг. 3.11).



Фиг. 3.11 Странично наклоняване на тялото при повдигане на едната ръка до горе и снемане на другата ръка до долу от и.п. ръце встрани

От фигура 3.12 става ясно, че при страничен наклон на торса в едната посока главната надлъжна инерционна ос на тялото се наклонява малко в противоположната посока. При положение на ръцете долу и страничен наклон на торса около 12° (по 6° за всяка от двете ставни връзки) страничното наклоняване на главната надлъжна инерционна ос е минимално - 0.5° . Това наклоняване може да се увеличи малко, до около 2.6° , ако при страничния наклон на торса ръцете са встрани. По-голям страничен наклон на торса предизвиква по-голямо странично наклоняване на главната надлъжна инерционна ос, но от една страна, възможностите за увеличаване на страничния наклон на торса са силно лимитирани, а от друга страна, това може да доведе до значителни технически затруднения при изпълнението.



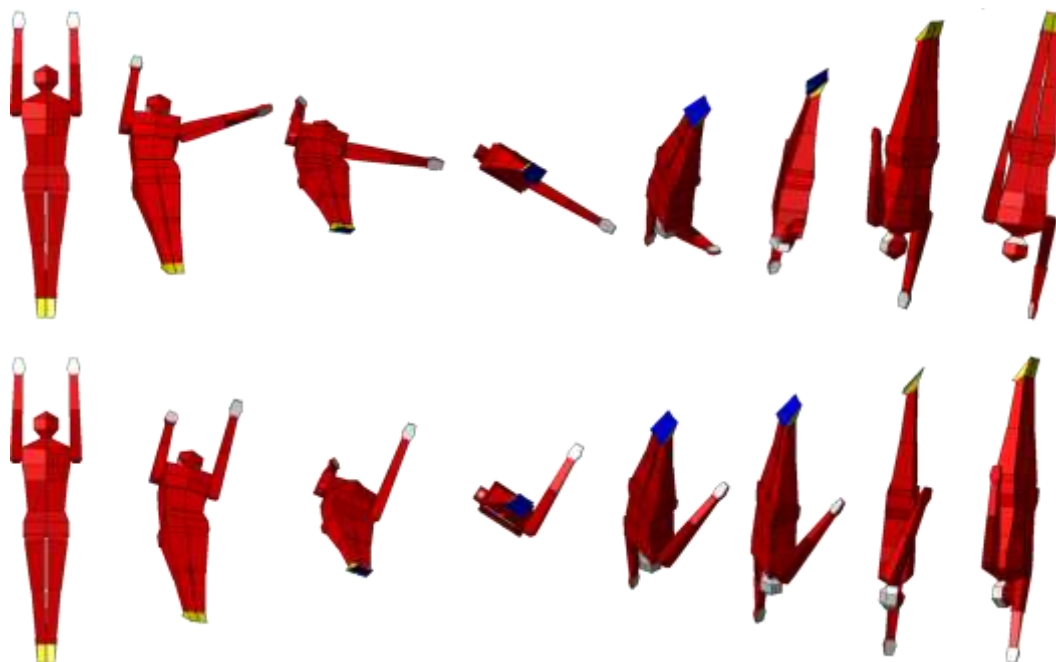
Фиг. 3.12 Странично наклоняване на главната надлъжна инерционна ос на тялото при страничен наклон на торса

При разгледаните дотук движения с ръцете можем малко да увеличим големината на страничното наклоняване на главната надл. инерционна ос, ако съответното движение се изпълни съвместно със страничен наклон на торса.

3.1.1.3 Странично наклоняване на тялото при наличие на въртливо движение за превъртането

Първо проучваме особеностите и ефективните действия за създаване на максимално количество въртливо движение около надлъжната ос при наличие на голямо количество въртливо движение около оста на превъртането (напр. две обт. превъртания), след което ще пригодим (опростим) установените действия за упражненията, при които е необходимо по-малко количество въртливо движение около тези оси. Започвайки разучаването на упражнения с комбиниране на ротации,

гимнастиците ще имат ясна представа какви действия е нужно да прилагат при най-простите упражнения, за да могат впоследствие лесно (поради двигателното сходство) да модифицират тези действия във високоефективни двигателни действия, необходими за изпълнението на по-сложни гимнастически упражнения с по-голямо количество ротация около надлъжната ос.



Фиг. 3.13 Снемане на едната ръка отстрани (горе) и отпред (долу) при наличие на въртеливо движение за задно превъртане

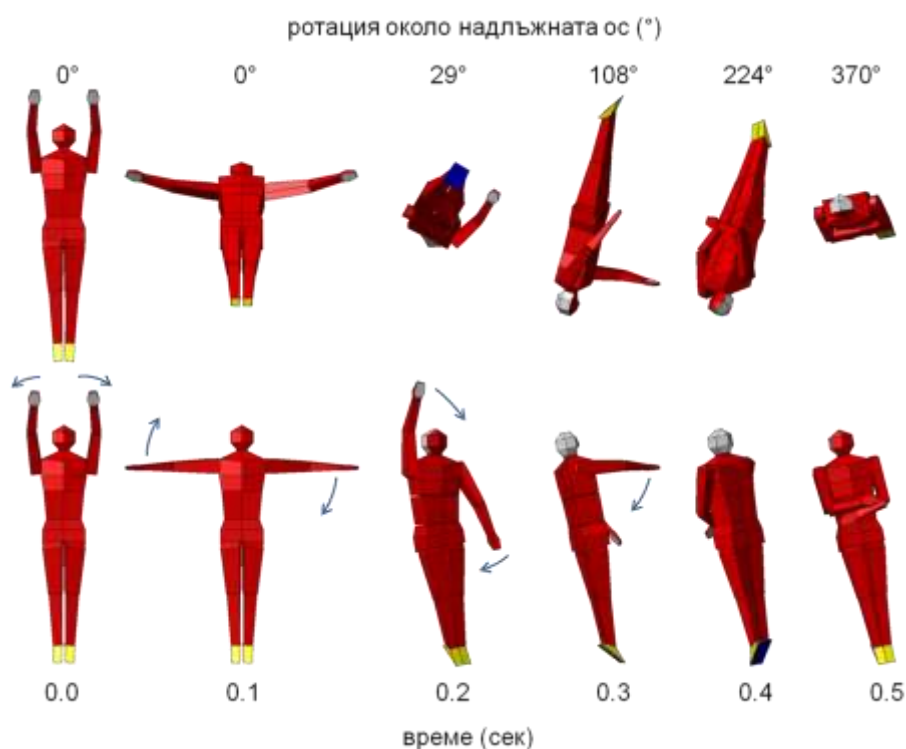
В общия случай снемането на ръката отстрани като цяло предизвиква по-голямо странично наклоняване и по-голямо завъртане около надлъжната ос на тялото, отколкото снемането на ръката отпред. При изпълнението на същите двигателни действия, показани на фиг. 3.13, но при положение, че посоката на въртене на превъртането е напред, се постига значително по-малко завъртане около надлъжната ос.

3.1.2 Двигателни действия за увеличаване количеството на ротацията около надлъжната ос

3.1.2.1 При обтегнатото превъртане

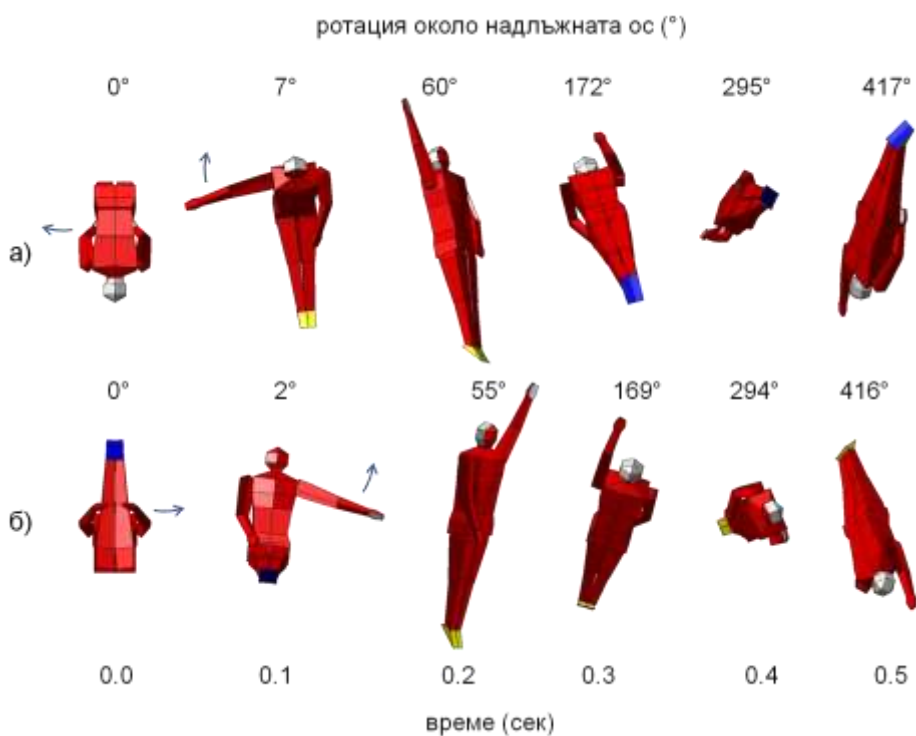
След направените редица симулации за инициране на ротация около надлъжната ос се установи, че при изпълнението на показаните на фигура 3.17 действия може да се постигне най-голямо количество ротация около надлъжната ос.

При свиването на ръцете ефектът върху страничното наклоняване на тялото е по-малък.



Фиг. 3.17 Увеличаване количеството на ротацията около надл. ос посредством страничен наклон на торса, (изглед - отпред). При долната последователност от изображения ротационното движение на превъртането не е представено

3.1.2.2 При преход от сгънато към обтегнато превъртане



Фиг. 3. 20 Инициране на ротация около надлъжната ос наляво посредством повдигане отстрани до горе на: (а) дясната ръка при превъртане назад; (б) лявата ръка при превъртане напред, (изглед - отпред)

Една много добра възможност за инициране на странично наклоняване и предизвикване на ротация около надлъжната ос на тялото при обтягане е налице, когато едната ръка се повдига нагоре от страни на тялото. На фиг. 3.20 са представени движения на едната ръка от страни до горе - дясната при начално упражнение задно сгънато превъртане (а) или - лявата при начално упражнение сгънато преневъртане (б). Въпреки че при двете симулации количеството на завъртане на тялото около надл. ос е много сходно, по-благоприятни условия за допълнително увеличаване на страничното наклоняване (а оттам и надлъжното завъртане) съществуват при варианта със задното превъртане.

Друга възможност за предизвикване на ротация около надл. ос, при преход от сгънато към обтегнато превъртане, представлява поредица от няколко относително леснодостъпни за изпълнение движения (фиг. 3.24).

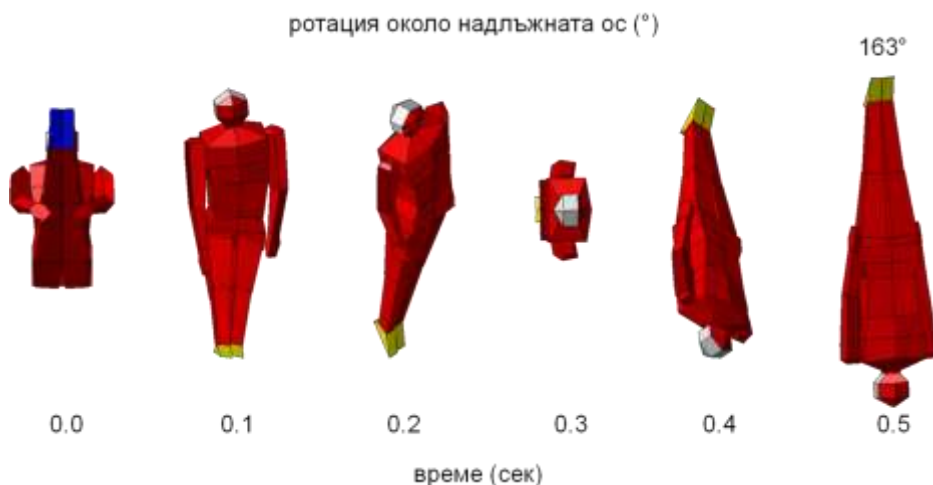


Фиг. 3.24 Инициране на ротация около надлъжната ос наляво посредством изпълнение на извивка в торса, следвана от обтягане на тялото, (при превъртане с посока на въртене - напред)

От начално сгънато положение на тялото движенията започват с извивка в горната част на торса в желаната посока за завъртане около надлъжната ос (в случая наляво). Следва разгъване в тазобедрените стави и впоследствие извивка в обратната посока (надясно) за възстановяване на изходната ориентация между горната и долната част на тялото. На практика изпълнението на тези движения се извършва с известно "преливане" между отделните фази. Като резултат от движенията в крайното обтегнато положение тялото е наклонено в определена степен встрани (фиг. 3.24 изображение 4).

Следващото показано (фиг. 3.27) движение всъщност наподобява $\frac{1}{4}$ конусовиден кръг с долните крайници с огъване в областта на торса (хулахупно движение). Тази техника е добре изяснена в изследванията на

Yeadon (1993в)⁶. Нашите числени експерименти също потвърдиха пригодността за практическа реализация на този тип движения.



Фиг. 3.27 Инициране на ротация около надлъжната ос наляво посредством изпълнение на страничен наклон на тялото вдясно при разгъване в тазобедрените стави, следвано от обтягане на тялото, (при превъртане с посока на въртене - напред)

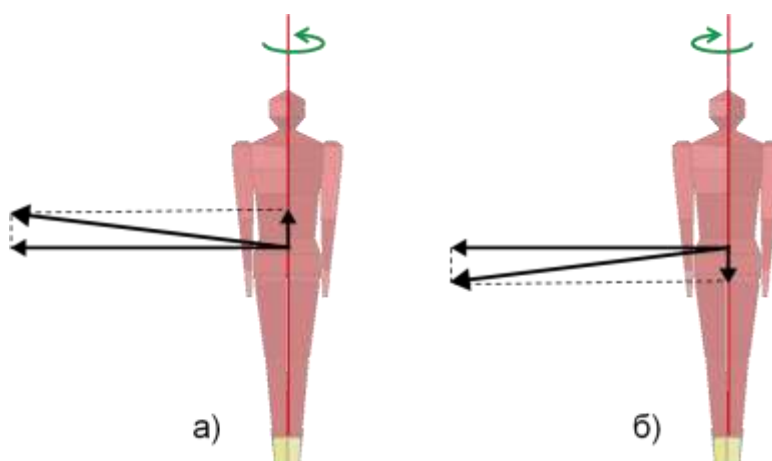
Може да се отбележи, че тази техника е подходяща за прилагане само когато превъртането е с посока на въртене напред.

От последно разгледаните три технически варианта се установи, че при преход от сгънато към обтегнато превъртане, независимо от посоката на въртене на превъртането, най-голям ефект върху количеството на ротацията около надлъжната ос се постига, когато едната ръка се повдига от страни до горе (фиг. 3.20). Резултатите потвърдиха непригодността за прилагане на другите два технически варианта при положение, че превъртането е с посока на въртене назад.

3.1.3 Създаване на въртеливо движение на тялото около надлъжната ос по време на опорната фаза

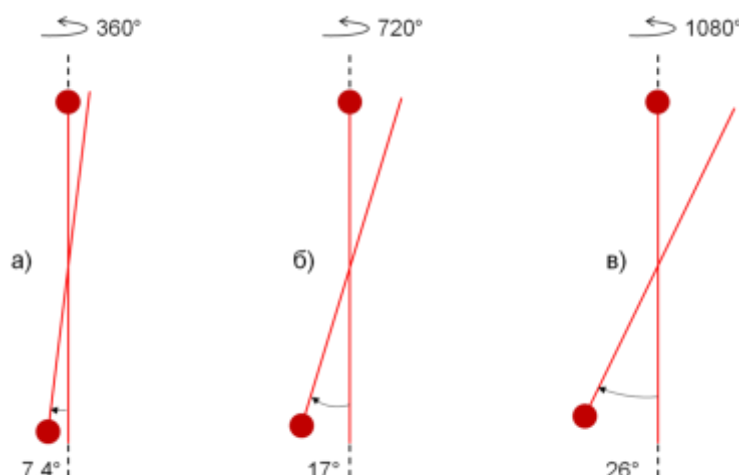
Когато при превъртане ротацията около надлъжната ос започва да се създава още в края на опорната фаза, векторът на кинетичния момент вече се намира под определен ъгъл (θ) спрямо хоризонтала (фиг. 3.28). Големината на този ъгъл зависи от съотношението на ротационните движения, които са създадени около страничната и около надл. ос на тялото при отделянето от опората.

⁶ Yeadon, M. R. (1993в). The biomechanics of twisting somersaults Part III: Aerial twist. *Journal of Sports Sciences*, 11, 209-218.



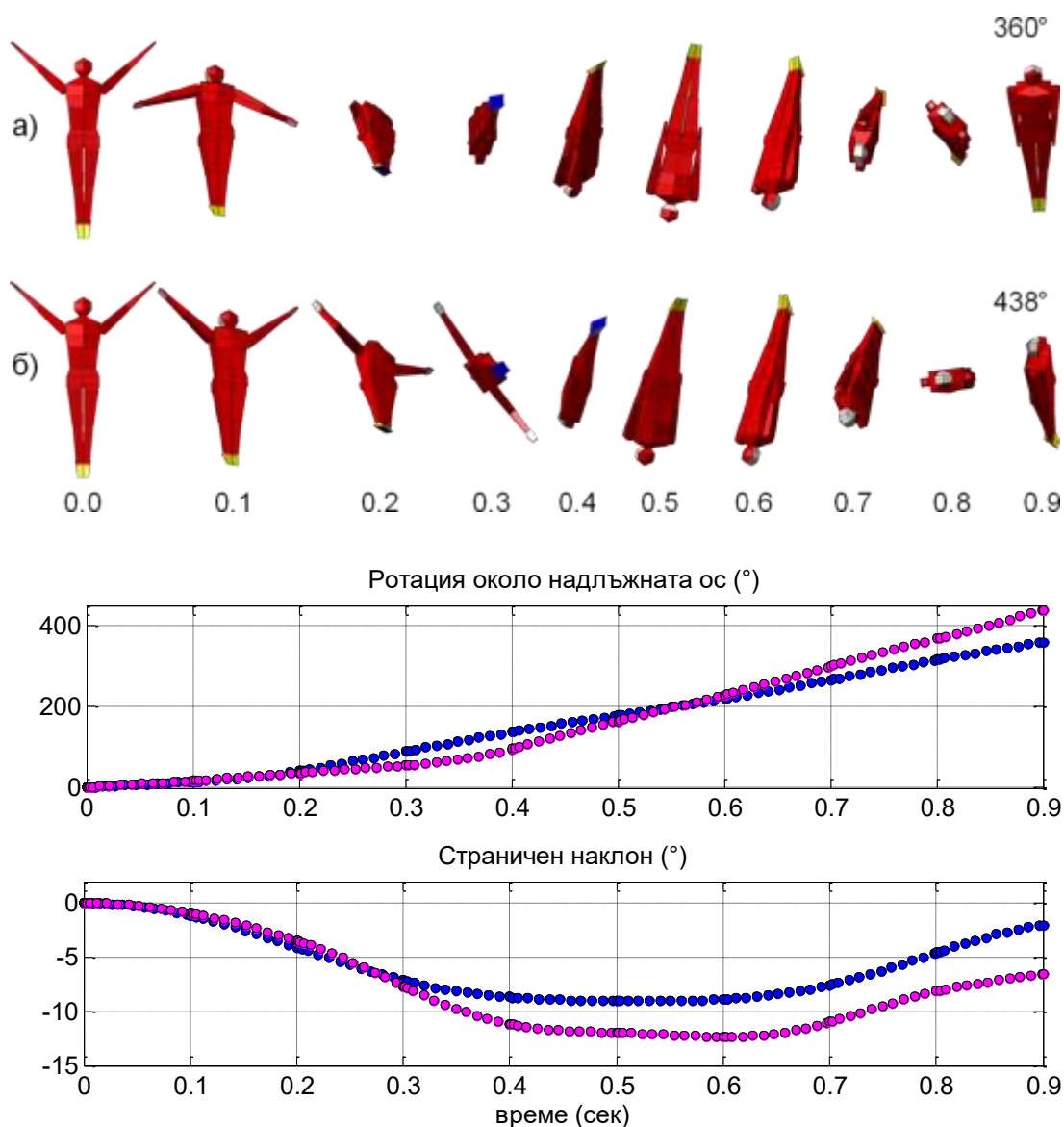
Фиг. 3.28 Кинетичен момент (и компоненти на кинетичния момент) при задно обтегнато превъртане при създадено въртливо движение около надлъжната ос по време на контакта с опората: (а) ротация наляво; (б) ротация надясно

Посредством симулации количествено установяваме нарастването на ъгъла на страничния наклон след $\frac{1}{2}$ от превъртането с увеличаване на количеството на ротацията около надлъжната ос (фиг. 3.30).



Фиг. 3.30 Ъгъл на страничния наклон след $\frac{1}{2}$ от задното превъртане в зависимост от количеството на завъртането около надлъжната ос: (а) при 360° ; (б) при 720° ; (в) при 1080°

При комбинирането на превъртане с ротация около надл. ос вариациите (нутация) на големината на ъгъла, който главната надл. инерционна ос на тялото сключва с равнината, перпендикулярна на вектора на кинетичния момент, могат да намерят успешно приложение в решаването на редица двигателни задачи. Този ъгъл в хода на движението нараства при всяко нечетно $\frac{1}{4}$ завъртане около надлъжната ос (90° , 270° и т.н.) и възвръща началната си стойност при всяко четно $\frac{1}{4}$ завъртане (180° , 360° и т.н.).



Фиг. 3.32 Количество ротация около надлъжната ос и страничен наклон в зависимост от момента на снемането на ръцете при 3. обт. превъртане: (а) и (•) - ръцете се снемат в началото; (б) и (•) - ръцете се снемат след 0.2 сек.

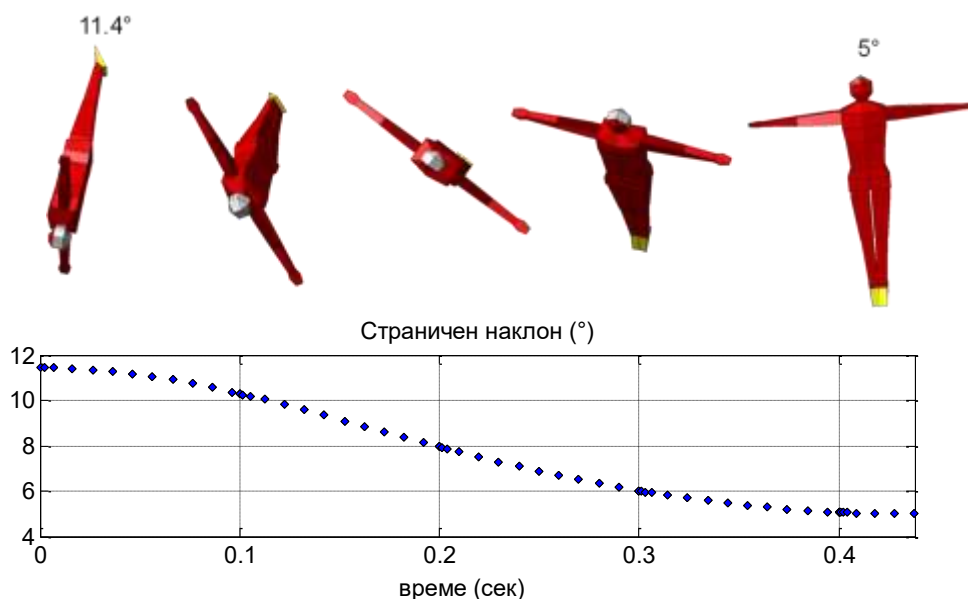
Както пояснява Yeadon (19936)⁷, при начално положение на ръцете встрани, вариациите на ъгъла са по-големи. При изпълнението на вид превъртане и зададен от опората въртелив импулс около надл. ос, ако снемането на ръцете започне не веднага, а около момента на достигането до $\frac{1}{4}$ завъртане около надл. ос, т.е. около момента, когато страничното наклоняване е максимално, тялото ще започне да се върти около надл. ос с по-голяма ъглова скорост. Тъй като тази техника се основава на ефекта на нутацията, Yeadon я нарича нутационна техника.

⁷ Yeadon, M. R. (19936). The biomechanics of twisting somersaults Part II: Contact twist. *Journal of Sports Sciences*, 11, 199-208.

3.1.4 Преустановяване на ротацията около надлъжната ос и подготовка за приземяване

Важността на приземяването за формирането на впечатлението от цялостното изпълнение на упражнението едва ли може да предизвика никакви съмнения. Успешното решаване на двигателните задачи, свързани с реализацията на ротациите, може да бъде компрометирано от неточности при приземяването.

Ще се фокусираме върху два основни проблема, които са налице при движенията с комбиниране на ротации, а от тяхното успешно преодоляване зависи качеството на приземяването. Единият проблем е наличието на страничен наклон на тялото (тилт), който обективно съществува и може да предизвика както неустойчиво приземяване, така и контузии. Другият проблем представлява присъствието в определена степен на остатъчно количество въртеливо движение около надлъжната ос в последната фаза, което също е предпоставка за неуспешно приземяване или контузии.

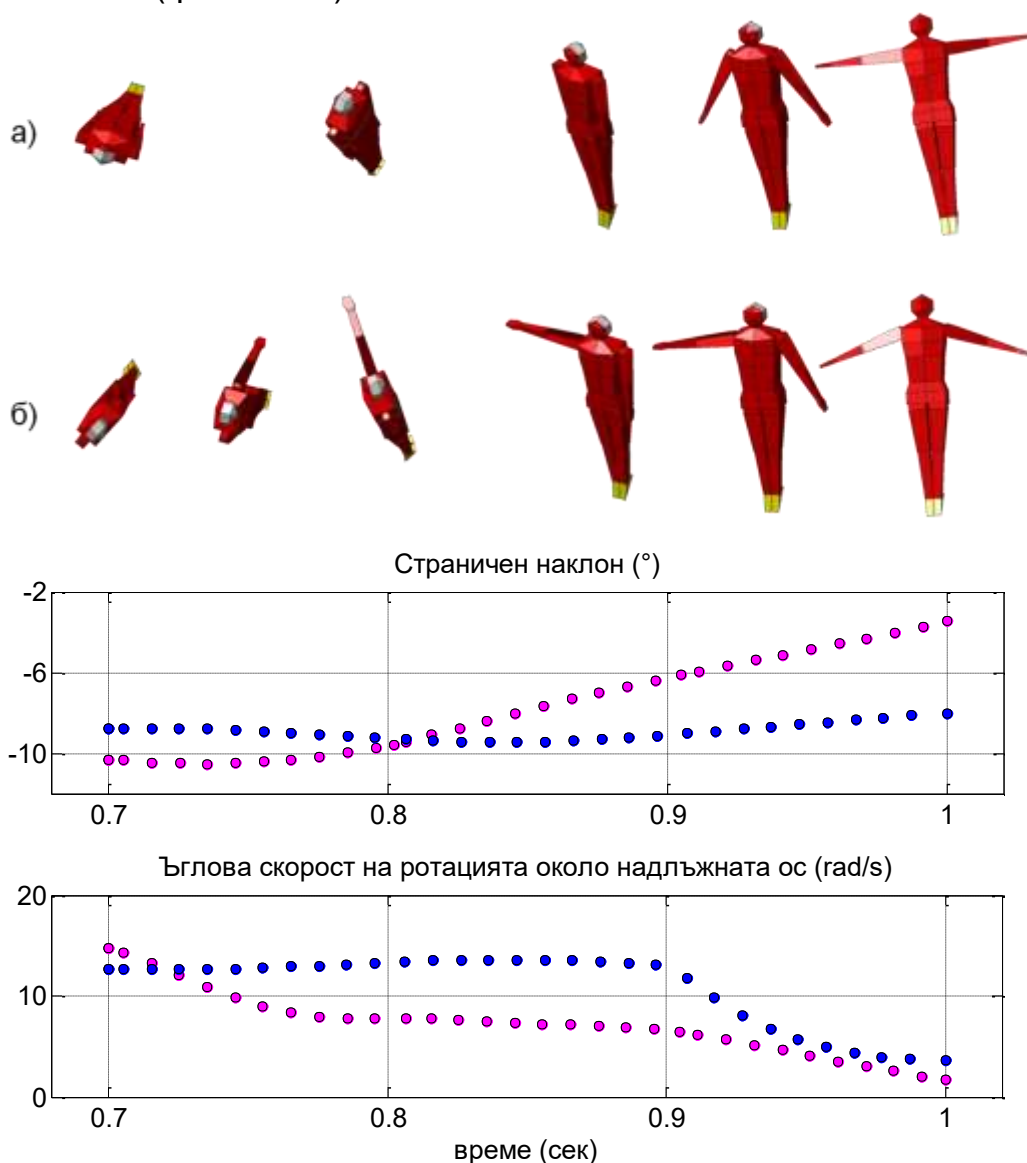


Фиг. 3.33 Намаляване големината на страничния наклон на надлъжната ос на тялото посредством прилагането на обратен нутационен ефект

Оказа се, че можем да се възползваме от нутационния ефект не само за допълнително странично наклоняване, но и за намаляване на страничното наклоняване на надлъжната ос. Страничният наклон може да бъде редуциран в определени граници, ако ръцете се повдигнат встрани в момента, когато до края на движението остава $\frac{1}{4}$ надлъжно завъртане (фиг. 3.33). При довършване на ротацията около надл. ос с ръце встрани ъгълът на страничното наклоняване намалява. Този ефект ще наричаме обратен нутационен ефект.

Първо насочваме вниманието си към движения с комбиниране на ротации, при които приземяването е с "лице" към пода. Това са всички видове задни превъртания с количество на ротацията около надлъжната ос кратно на цяло завъртане, т.е. 360° , 720° , 1080° и превъртания напред с количество надл. ротация кратно на $\frac{1}{2}$ нечетен брой завъртания, т.е. 180° , 540° , 900° .

Прилагаме техническо решение, което нарекохме обратен нутационен ефект, но с повдигане встрани само на едната ръка. Това редуцира тилта, но за по-голяма ефективност прилагаме допълнителни действия и оформяме т. нар. специална техника при приземяване с "лице" към пода, която осигурява по добри крайни условия за приземяването (фиг. 3.34б).

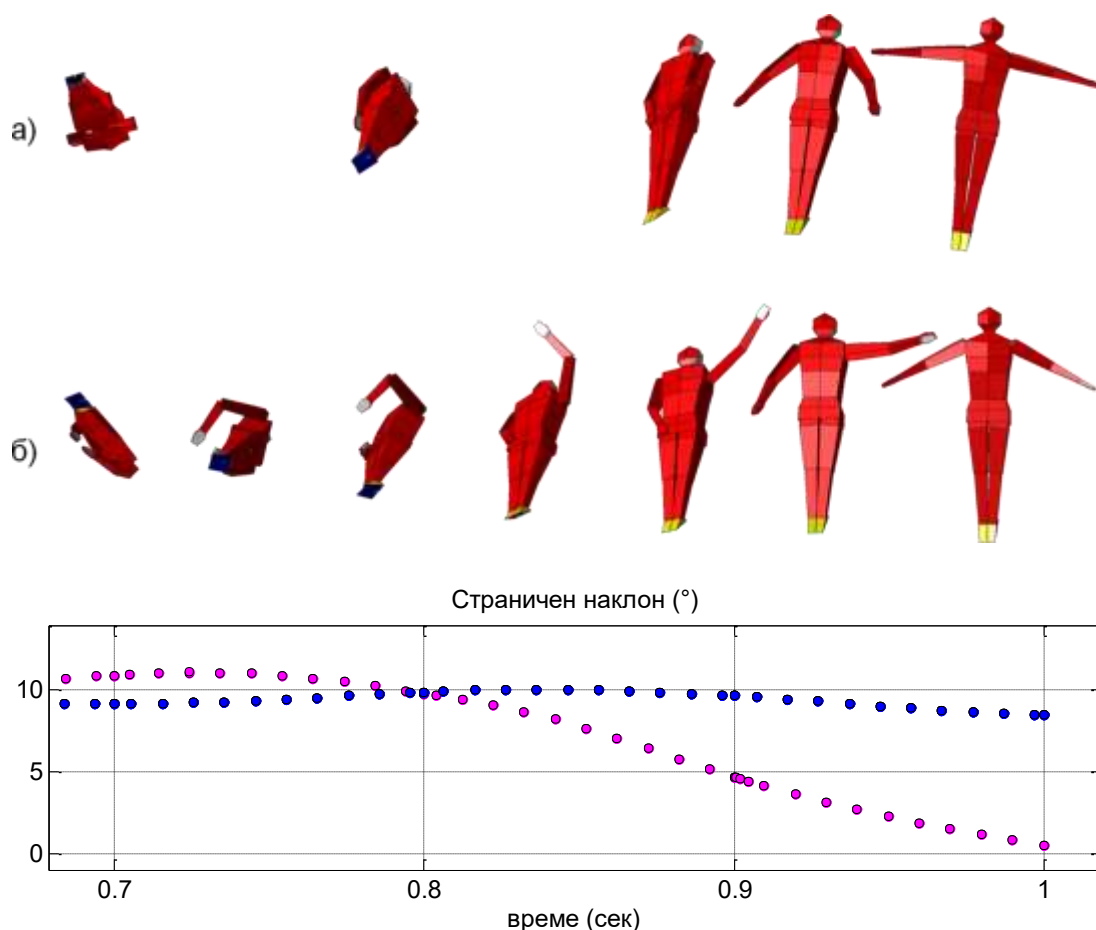


Фиг. 3.34 Подготовка за приземяване с "лице" към пода посредством:

(а) и (●) - повдигане на ръцете встрани в края на фазата;

(б) и (●) - прилагане на специална техника

При другия вариант за приземяване, в последната част на безопорната фаза при изпълнение на гимн. упражнения, тялото се намира с "тил" към пода. Това положение е характерно при изпълнение на превъртания напред с количество на ротацията около надл. ос кратно на цяло завъртане (360° , 720° , 1080° и т.н.) и превъртания назад с количество надлъжна ротация кратно на $\frac{1}{2}$ нечетен брой завъртания, т.е. 180° , 540° , 900° и т.н.



Фиг. 3.35 Подготовка за приземяване с "тил" към пода посредством:

(а) и (●) - повдигане на ръцете встрани в края на фазата;

(б) и (●) - прилагане на специална техника

Фазата на подготовка за приземяване, по време на която се извършват специалните действия (фиг. 3.35б), започва от момента, когато до финала на упражнението остава приблизително още $\frac{1}{4}$ завъртане на тялото около надлъжната ос. В началото едноименната на посоката на надл. въртене на тялото ръка се повдига напред. Ръката се повдига пред гърдите свита в лакътната става. Това движение на ръката предизвиква контраротация на тялото, при което тилтът намалява. В края на първия цикъл от движения ръката се насочва нагоре, а впоследствие встрани, като същевременно се обтяга. При втория цикъл двете ръце се

движат едновременно, като ръката, която е започнала движението първа, се сменя през страни приблизително до хоризонтално положение, а другата ръка се повдига през страни също приблизително до хоризонтално положение (фиг. 3.35б).

След анализа на резултатите от числените експерименти стигаме до заключението, че независимо от начина на създаване на въртеливото движение около надлъжната ос на тялото (опорен или безопорен вариант), предложените специални технически действия може успешно да бъдат прилагани за повишаване на стабилността и сигурността на приземяването.

3.2 Биомеханичен профил на гимнастически упражнения с безопорни фази

Преходът от изпълнението на по-лесни двигателни действия, нужни за обезпечаване на по-малко количество надлъжна ротация, към действия, предназначени за осигуряването на максимално голямо количество надлъжна ротация, може да бъде твърде улеснен, ако между действията от различните етапи съществува приемственост и сходство в ритмичната постройка. При изучаването на упражнения от началните нива на сложност възниква въпросът, кой от възможните за прилагане начални технически варианти притежава подходяща ритмична основа и техника, която да бъде в "родствени" отношения с техниката, прилагана и при най-сложните варианти на даденото упражнение. За да намерим отговор на въпроса, прилагаме подход, който технологично се свежда до следното: първо посредством целенасочени симулации построяваме движенията, с изпълнението на които достигаме най-трудния вариант, т.е. варианта с максимално количество на надлъжна ротация. Впоследствие намаляваме сложността, като постепенно понижаваме ротационната продуктивност на действията. Това се изразява в: намаляване на амплитудата и бързината на действията; понижаване на хронологичната прецизност и увеличаване на координационната достъпност на действията; увеличаване на времевия диапазон за проява на определена активност. При изграждане на вариантите на сложност от дадена верига винаги държим сметка за съхраняването на еднородността в ритмиката на движенията. В крайна сметка за всеки вид упражнения намираме този най-лек (напр. с надл. рот. - 360°) вариант на изпълнение, който вече знаем, че успешно и с относително достъпни действия може да бъде усложнен максимално.

Всеки модел е представен като подобрена последователност от изображения, които ясно илюстрират движенията и хронологията на

действията в хода на изпълнението. Изображенията са придружени от разяснения, анализ и обосноваване на прилаганите действия.

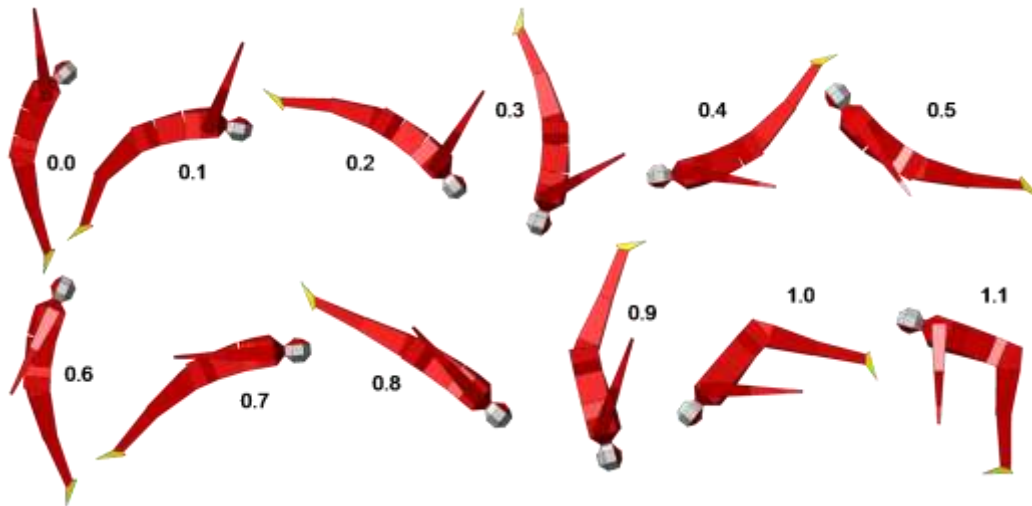
Разработени са оптимизирани варианти на 51 упражнения на различни гимнастически уреди; 115 опита на упражненията; 47 експериментални движения. Ще представим моделните изпълнения само на упражненията на земна гимнастика от вида на двойно задно обтегнато превъртане с ротации около надлъжната ос (безопорен вариант).

3.2.1 Земна гимнастика (безопорен вариант)

В началото за всеки профил от упражнения предлагаме модел на базовото упражнение, представено с характеристики, които е необходимо да бъдат постигнати, за да се продължи с усвояването на по-сложните варианти на упражнението по предлаганата последователност от двигателни програми за отделните нива на сложност.

Базово двойно задно обтегнато превъртане

От фиг. 3.38 придобиваме представа за ориентацията и конфигурацията на тялото, както и за движенията на отделните сегменти, извършени за интервали от 0.1 секунди.



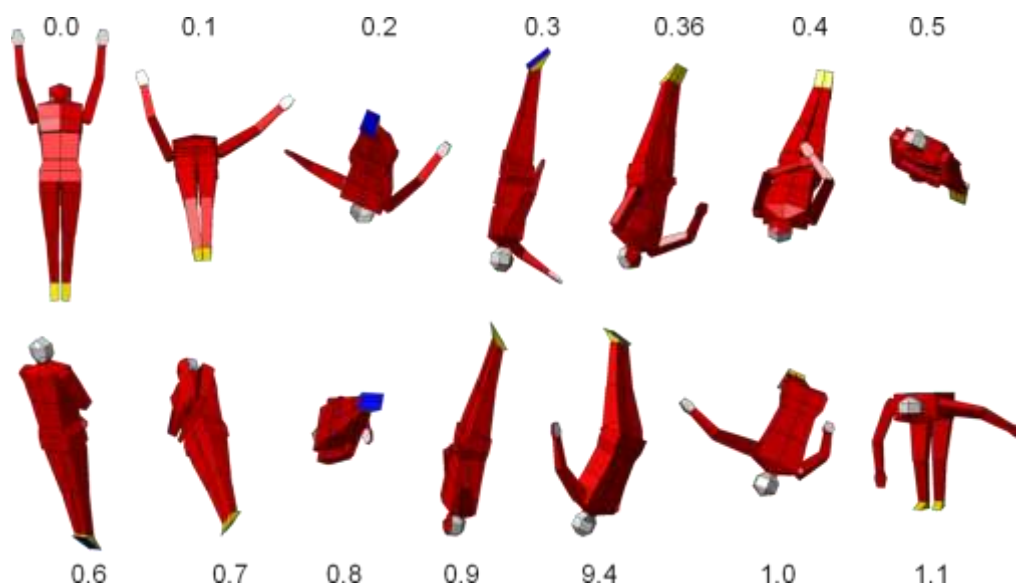
Фиг. 3.38 Моделно изпълнение на двойно задно обтегнато превъртане

Ако гимнастикът съумее да усвои упражнението по начин, идентичен на показания на фигурата, ще разполага с потенциал за усложняване на упражнението с ротация около надл. ос. Кинетичният момент (норм.) е представен като ротационен потенциал, необходим за това базово изпълнение, който има стойност равна на 1.847. Посочените данни могат да послужат като опорни точки при усвояване на базовото ниво на упражнението.

Двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 1080°

В този случай е важно двигателните действия да бъдат насочени не към незабавно предизвикване на надлъжна ротация, а към постигането на конфигурация, при която ръцете могат да извършат продуктивни действия за създаване на голямо странично наклоняване.

На фигура 3.39 е представено моделно изпълнение на двойно задно обт. превъртане с ротация около надл. ос на 1080°.



Фиг. 3.39 Моделно изпълнение на двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 1080°, (изглед - отпред)

На следващата фиг. 3.40 е представена само фазата на инициране на ротация около надлъжната ос, като за комфортно наблюдение и фокусиране изцяло върху тилтообразуващите действия ротационното движение на превъртането не е представено. От фигурите се вижда, че снемането на ръцете започва в началото на безопорната фаза, за да бъде подпомогната ротацията на превъртането. Едноименната на посоката на надл. ротация ръка (в случая лявата) се сема в по-голяма степен от страни, а дясната ръка се сема до положение напред и с минимално движение встрани. Но ръцете се придвижват така, че не предизвикват надлъжно завъртане на тялото наляво (дори е налице минимална контраротация от - 4° надясно, изображение 2, $t = 0.1$ сек.). Това се постига поради факта, че лявата ръка при движението напред се придвижва и встрани, т.е. вляво, което предизвиква минимална надлъжна контраротация на тялото вдясно, при което, въпреки предизвиканото минимално странично наклоняване, надлъжно завъртане наляво все още липсва (изображение 2, $t = 0.1$ сек.).



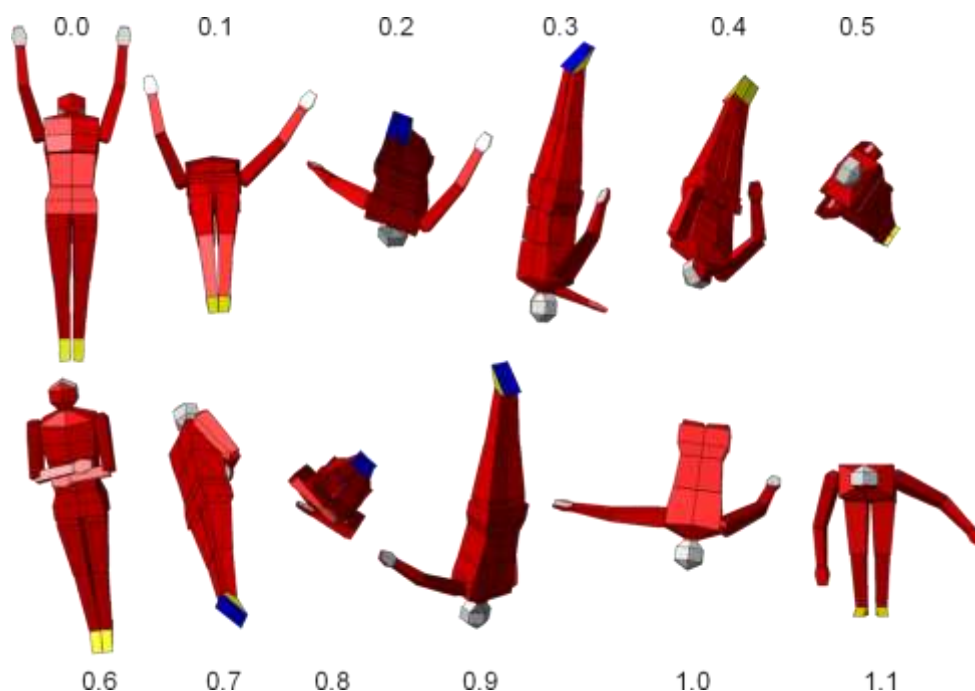
Фиг. 3.40 Моделно изпълнение на фаза инициране на ротация около надлъжната ос - 1080° , при двойно задно обт. превъртане, (изглед - отпред). Ротационното движение на превъртането не е представено

Преждевременното завъртане наляво ще лиши изпълнителя от възможността да използва максимално движенията на ръцете за инициране на тилт. От това положение ($t = 0.1$ сек.) започват много активни действия за създаване на голямо количество странично наклоняване. Лявата ръка продължава движението си през страни надолу, а дясната се движи встрани и нагоре. При това въртливо движение на ръцете в посока на часовниковата стрелка тялото контраротационно се завърта (наклонява) в обратната посока, вследствие на което започва да се върти около надлъжната ос наляво (изображение 2). За получаване на допълнителен тилт при движението на ръцете се извършва и страничен наклон на торса (сумарно около 10° , в най-голяма степен между $t = 0.2$ и $t = 0.3$). След достигане около $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ от надлъжното завъртане тялото се обтяга (от $t = 0.3$ до $t = 0.4$), което съдейства за нов минимален добавъчен тилт. За големината на тилта значителна роля има движението на дясната ръка. След $t = 0.2$ (изображение 3), когато приближава моментът за достигане около $\frac{1}{4}$ от надлъжното завъртане, дясната ръка е повдигната и се намира в много подходяща позиция за създаване на допълнителен тилт при снемане отпред. При снемането обаче тялото продължава да се върти наляво, поради което за по-голяма ефективност на движението ръката се придвижва и малко встрани ($t = 0.36$). Тук стремежът е движението да се извършва в равнината, която е перпендикулярна на равнината на превъртането. С доближаване до $\frac{1}{2}$ надлъжно завъртане (между $t = 0.36$ и $t = 0.4$) ръката се придвижва странично към тялото за нова минимална добавка към големината на тилта. След този момент двете ръце са плътно до тялото и движението навлиза във фазата на реализация на надлъжната ротация. Тук вследствие на големите стойности на тилта (малко над 12° при 360° надл. завъртане) се постига много висока средна стойност на ъгловата скорост на надлъжната ротация за тази фаза (28.3

rad/s). Към края на движението във фазата на подготовка за приземяване се прилага разгледаната техника за елиминиране на тилта и преустановяване на въртенето около надлъжната ос до момента на съприкосновението с повърхността за приземяване. Малко преди положението, когато до края на упражнението остава да се извърши още $\frac{1}{4}$ надлъжно завъртане ($t = 0.9$), започва повдигането на дясната ръка отстрани за предизвикване на обратен нутационен ефект. Поради големия тилт при това упражнение, в края на фазата ръцете активно се движат за максимално неутрализиране на тилта, като се въртят в посока обратна на посоката на часовниковата стрелка (между $t = 1.0$ и $t = 1.1$). Несиметричното им крайно положение в случая е неизбежно, но благодарение на това, въпреки изключителната трудност на това упражнение, тялото приземява относително комфортно, като долните крайници докосват повърхността без видим страничен наклон, а ъгловата скорост на надл. ротация е сведена почти до нула.

Двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 720°

Като следваме възприетия подход за понижаване на трудността и повишаване нивото на достъпност и се придържаме към изискването за еднотипност на действията, сме разработили и следващото упражнение - двойно 3. обт. превъртане с ротация около надл. ос на 720° (фиг. 3.41).

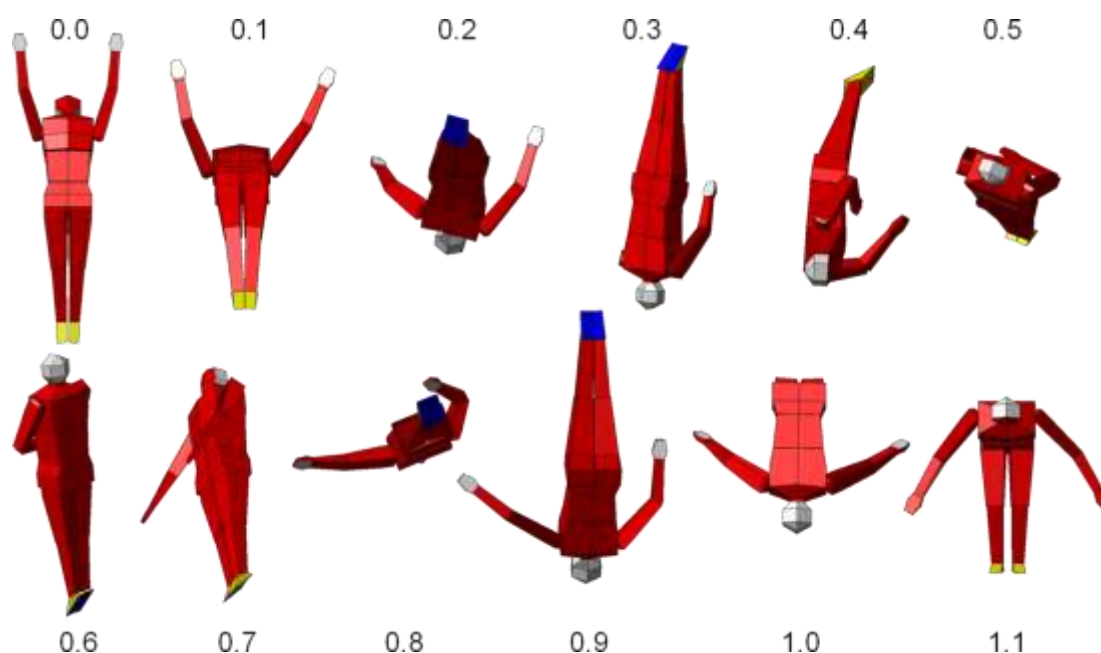


Фиг. 3.41 Моделно изпълнение на двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 720° , (изглед - отпред)

Въздържайки се от подробности, можем да констатираме, че при настоящия случай техниката е изградена върху същите, вече описани, двигателни особености на изпълнението. Разликата в движенията се свежда до по-малката интензивност и амплитуда при изпълнението им. По време на фазата на реализация на надлъжната ротация, в сравнение с предходното изпълнение, се постига по-малко количество тилт (около 8.7° при 360° надл. завъртне), от което следва и по-малка големина на ъгловата скорост на надлъжната ротация (20.1 rad/s). По-малката трудност (в сравнение с предходното упражнение) улеснява в известна степен действията в последната фаза - подготовка за приземяване (фиг. 3.41). Въпреки това, големината на предизвикания тилт е значителна и след компенсаторните движения ръцете все още остават в несиметрично крайно положение.

Двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 360°

Преминаваме и към най-лекия за изпълнение вариант - двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 360° (фиг. 3.42).



Фиг. 3.42 Моделно изпълнение на двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос - 360° , (изглед - отпред)

Освен очакваното понижение на скоростта и амплитудата на движенията тук забелязваме, че фазата на реализация на надлъжната ротация практически се свежда до кратковременно задържане на ръцете

до тялото около $t = 0.5$ и $t = 0.6$. Поради малкото количество (360°) надлъжната ротация се реализира основно в останалите фази на упражнението (иницииране и преустановяване на ротацията около надлъжната ос). Достигнатият тилт от около 5.7° и неголямата ъглова скорост на надл. ротация от 12.4 rad/s след прилагане на специалната техника лесно се свеждат до нулеви стойности, което осигурява безпроблемно приземяване. При този по-лек вариант движенията на ръцете по време на фазата на подготовка за приземяване са подчертани и плавни, като остават симетрично разположени в края на движението.

Сходство между действията за инициране на ротация около надлъжната ос при различните варианти на трудност (при двойно задно обтегнато превъртане)

Въпреки че при цялостните изпълнения движенията изглеждат в известна степен с определени разлики, ако насочим вниманието си само върху относителните движения (фиг. 3.43), установяваме, че действията при различните варианти са изключително еднотипни.



Фиг. 3.43 Сравнение между относителните действия по време на фазата на инициране на ротация около надлъжната ос при изпълнение на двойно задно обтегнато превъртане с ротация около надлъжната ос на:
(а) 360° ; (б) 720° ; (в) 1080°

Ще подчертаем тенденциите на различията в посока от по-лекия към по-трудния вариант на изпълненията. При усложняване на упражнението лявата ръка се сема малко повече напред и се придвижва повече встрани ($t = 0.1$ и $t = 0.2$). Дясната ръка също се сема в малко по-голяма степен (до $t = 0.1$), след което променя движението си като се придвижва в по-голяма степен встрани и нагоре ($t = 0.2$ и $t = 0.3$). Следва по-активно снемане напред и малко повече встрани за по-трудните варианти ($t = 0.4$), което позволява и допълнително странично придвижване на ръката до тялото в края на фазата ($t = 0.5$). Значително по-голям е и максималният страничен наклон в торса ($t = 0.3$) при по-трудните варианти, а при тези варианти за намаляване на инерционния момент в края на фазата ръцете са по-плътно до тялото. Като цяло движенията на ръцете (и торса) при усложняване на упражнението са с по-голям диапазон и скорост. При варианта с по-малка трудност се допуска в известна степен по-голямо свиване на ръцете, което малко улеснява движението им.

Може да се обобщи, че при упражненията от разгледания вид съществува висока степен на сходство между относителните движения, което е предпоставка за успешно усвояване и на по-сложните варианти, след като бъде овладян началният по-лек вариант. Следва да отбележим, че между движението на ръцете (и торса) и преносното надлъжно ротационно движение съществува силна двустранна зависимост. Очевидно усилията при обучението трябва да бъдат насочени към постигане на максимално съответствие между относителните движения и текущата надлъжна ориентация на тялото.

Заклучение

След като разгледахме редица упражнения с безопорна фаза (51 упражнения), можем да потърсим двигателно сходство в действията на гимнастика при идентични упражнения, изпълнени на различните уреди. (напр. повече от 1 обтегнато или полусвито превъртане с надлъжно завъртане на 720°). От упражненията с подобни характеристики ротационният потенциал на превъртанята е най-голям при изпълненията на земя. Относно началното положение на ръцете спрямо торса констатираме, че най-близки помежду си са упражненията, изпълнявани на земя и на прескок (от вида "Юрченко"). Най-осезаемо от всичките разглеждани упражнения се отличава положението на ръцете при отскоците на халки. Тези особености трябва да се вземат предвид при изучаването на упражненията на различните уреди. Независимо от привидните визуални различия, крайната цел на началните действия при

различните упражнения е еднаква. Когато за изпълнението е необходимо по-голямо количество надлъжна ротация, стремежът на спортиста трябва да бъде насочен към това да придвижи ръцете си бързо до положение, което е подходящо за изпълнението на движения, които ще предизвикат голямо количество странично наклоняване (тилт) на тялото. Това може да бъде положението, при което ръцете се намират приблизително в страни и малко напред, като едната ръка е малко по-напред и нагоре от другата ръка (напр. фиг. 3.91 изображение 1).



Фиг. 3.91 Моделно изпълнение на фаза инициране на ротация около надлъжната ос, (изглед - отпред). Ротационното движение на превъртането не е представено

До момента на заемане на това ключово разположение на ръцете, тялото не трябва да променя надлъжната си ориентация, т.е. придвижването на ръцете до това положение не трябва да предизвиква надлъжно завъртане на тялото. В противен случай ефективността от следващите им действия значително намалява. Експериментите потвърдиха, че по-голямо количество ротация около надлъжната ос може да бъде реализирано, когато началните действия са насочени не към незабавно, бързо инициране на надлъжно въртене, а към заемане на положение, което е най-благоприятно за изпълнение на действия, които предизвикват максимално странично наклоняване на тялото. Това, разбира се, коства известно забавяне на началото на надлъжната ротация, но ефектът от тази двигателна стратегия се изразява в осигуряването на по-голяма ъглова скорост на ротацията около надлъжната ос, което в крайна сметка води до по-голямо количество надлъжно завъртане на тялото до края на изпълняваното упражнение. Веднага след достигане до работното положение ръцете започват изпълнението на кръгово движение (едната ръка се придвижва нагоре, а другата - надолу) в лицевата равнина, при което се предизвиква контраротационно завъртане на цялото тяло в противоположна посока (в случая тилт вдясно). Кръговото движение с ръцете може да бъде

изпълнено без координационни затруднения, като ефектът му се увеличава, когато се извърши съвместно със страничен наклон в същата посока в торса и кръстно-поясната област (фиг. 3.91 изображения 2 и 3). Това кръгово движение на ръцете предизвиква тилт и тялото започва да се завърта около надлъжната ос. Впоследствие ефективността на кръговото движение на ръцете намалява. Това се дължи на факта, че в резултат на надлъжното завъртане на тялото равнината на придвижване на ръцете започва да се измества от равнината, перпендикулярна на вертикалната равнина на превъртането. Ползата от действията на ръцете значително намалява с приближаване към $\frac{1}{4}$ надлъжно завъртане. В края на движението обаче едната ръка е повдигната и снемането ѝ отпред става твърде ефективно, когато придвижването на ръката се извършва преимуществено в равнината, перпендикулярна на вертикалната равнина на превъртането (изображения от 3 до 6). Снемането на ръката предизвиква контраротация на тялото, т.е. големината на тилта се увеличава. Продуктивността на снемането на ръката се изчерпва с приближаване до $\frac{1}{2}$ надлъжно завъртане. Последен минимален добавъчен тилт може да се обезпечи, когато тялото извърши около $\frac{1}{2}$ надлъжно завъртане, а ръката в края на снемането остане малко встрани (изобр. 6), за да се придвижи странично до тялото, при което също ще бъде предизвикана минимална контраротация на тялото. Казано накратко, целта, към която спортистите трябва да се стремят, е движението на ръцете да се извършва преимуществено в равнината, перпендикулярна на вертикалната равнина на превъртането. Това означава, че бързината и посоката на придвижване на ръцете зависи от текущата надлъжна ориентация на тялото и бързината на изменението ѝ. От друга страна, скоростта на надл. ротация се влияе от действията на ръцете, т.е. посоката и бързината на придвижване на ръцете и ъгловата скорост на надлъжната ротация са изцяло взаимнозависими. Поради това за постигането на голяма ефективност на действията е нужно значително техническо майсторство при изпълнението на относителните движения на сегментите на тялото, както и прецизност в оценката на поведението (ориентацията) на тялото в пространството. Желаната универсалност може да бъде постигната значително по-лесно и бързо, когато за инициерирането на надл. ротация се прилага безопорният вариант, при който се обезпечават сходство на работните действия и еднотипност при порядъка на изпълнението им.

ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

Изводи

1. Разработен е математичен модел за компютърни симулации на двигателни действия в условията на безопорна фаза. Моделът има висока степен на подвижност, което го прави пригоден за изследване на разнообразни движения и активности, характерни за гимнастическите упражнения. Математичният модел може да бъде прилаган за изследователска дейност при движения с безопорни фази и при други спортове.
2. Разработената в изчислителната среда MATLAB компютърна програма за провеждане на числени експерименти е удобна за ползване и лесно може да бъде прилагана при: изследване на ефекта от изпълнението на различни двигателни действия; изучаване на детайли на спортната техника; установяване ефективността на определени двигателни стратегии; изграждане на нови упражнения с летежни фази.
3. Благодарение на интегрираните към основната програма допълнителни програмни модули (визуализиращи и изчислителни), резултатите от симулациите може да бъдат представени в ясен и удобен за възприемане вид, а изчисленията на множество биомеханични характеристики допринасят за детайлизиране на анализа и улесняват тълкуването на получените резултати.
4. Установени са нови и потвърдени известни факти, свързани с поведението на тялото. Изяснени са обективни механични ефекти при движенията на спортиста по време на безопорната фаза, с които е необходимо да се съобразяваме при търсене на двигателна ефективност.
5. Установени са действията и двигателният порядък, които осигуряват висока ефективност при инициране на ротация около надлъжната ос на тялото на спортиста, както и двигателните стратегии, обезпечаващи условия за стабилно и безопасно приземяване.
6. Установени са двигателните действия, които притежават сходна ритмична основа и присъстват в техническата структура на упражнения от един тип - от най-лесния до най-усложнения вариант на дадено упражнение.
7. Изградени са моделни изпълнения на упражнения на различни гимнастически уреди, при които благодарение на наличието на сходство в двигателния порядък усложнените варианти на всяко упражнение може да бъдат усвоявани по-лесно и по-бързо на базата

на положителен пренос на двигателни умения. Създаден е архив от файлове (вектори на управление и начални условия) на 51 упражнения, 115 опита на упражненията, 47 експериментални движения, които могат да послужат за основа при бъдещи изследвания.

8. При упражненията с по-голям ротационен потенциал на превъртанята действията за инициране на ротация около надлъжната ос са с по-голяма ефективност, но изискванията за прецизността им са повишени. Най-голям ротационен потенциал на двойните обтегнати превъртания е налице при упражненията на земна гимнастика – 1.85, а най-малък – при упражненията на халки – 1.42.
9. При инициране на ротация около надлъжната ос по време на безопорната фаза съществуват по-добри условия за контролиране на движението и възможност за постигане на по-голяма ъглова скорост (напр. 28.3 rad/s за безопорния вариант и 23.7 rad/s за опорния вариант при двойно задно обт. превъртане на земя), но за постигането на висока ефективност на действията са необходими двигателна прецизност и високи технически умения.
10. При опорния вариант действията, предназначени да предизвикат надлъжна ротация, може да бъдат считани за технически достъпни, но са лишени от достатъчна универсалност и носят риск от загуба на ефективност на действията, които осигуряват въртеливо движение и височина за превъртанята. От друга страна, при този вариант съществуват потенциални проблеми при приземяването.

Препоръки

1. Препоръчваме на спортните педагози в подготовката да се обърне внимание на базовите упражнения, като за ориентир за достигане на високо качество на изпълнението могат да служат представените моделни изпълнения и стойностите на необходимия ротационен потенциал. Представени в нормализиран вид, стойностите може да бъдат прилагани при спортисти с различни антропометрични характеристики и различна продължителност на летежната фаза.
2. При разучаване на упражненията с комбиниране на ротации препоръчваме действията за инициране на ротация около надлъжната ос да се извършват по време на безопорната фаза (безопорен вариант), а впоследствие при усложняване на упражнението да се следват предлаганите моделни двигателни програми за по-сложните варианти на съответното упражнение.
3. Препоръчваме в различните етапи на обучението да се усъвършенства техниката за инициране на надлъжна ротация в безопорната фаза, като се прилага при упражнения с различна трудност (напр. от батут в дунапренов трап), за да се развият и поддържат способностите за контролиране на страничния наклон и оттам скоростта на надлъжната ротация.
4. При безопорното инициране на ротация около надлъжната ос, при необходимост от голямо (максимално) количество надлъжно завъртане препоръчваме действията да бъдат насочени не към предизвикване на незабавна надлъжна ротация, а към бързо създаване на условия за инициране на максимално голямо странично наклоняване на тялото, което впоследствие ще осигури висока ъглова скорост за надлъжното въртене.
5. При сложните варианти на упражненията може да се прилагат действия за инициране на ротационен импулс (неголям) около надлъжната ос още в края на опорната фаза (опорен вариант), като впоследствие се създават подходящи условия за осигуряване на допълнителен импулс и от действия, извършени по време на безопорната фаза. При някои упражнения е уместно да бъде експлоатиран и т. нар. нутационен ефект, за да бъде увеличена големината на страничното наклоняване.
6. На земна гимнастика препоръчваме прилагането на т. нар. опорна техника при изпълнението на единични обтегнати превъртания с ротация около надлъжната ос по-голяма от 360°.

7. За обезпечаване на успешно приземяване (стабилно и без риск от контузии) препоръчваме да се прилагат представените двигателни стратегии, предназначени за упражнения, приземяването при които е както "с тил към пода", така и "с лице към пода".

Приноси на дисертационния труд (според автора)

1. Разработен е математичен модел за компютърни симулации в условията на безопорно положение, чиято висока степен на подвижност позволява извършването на познавателна дейност върху най-разнообразна двигателна активност. Моделът доказва своята ефективност, след като беше приложен при изследване на различни гимнастически упражнения.
2. За контролиране на симулациите, поведението на модела и изчисляване на биомеханични характеристики е разработена компютърна програма, чието управление е интуитивно и удобно.
3. Установени са високопродуктивни варианти на техниката за инициране на ротация около надлъжната ос, които са изградени на базата на сходство на двигателния порядък, което би улеснило усвояването на по-сложните варианти на упражненията от даден тип.
4. Разработени са оптимизирани технически решения и е създаден файлов архив на 51 упражнения, 47 експериментални движения и съответните им начални условия.
5. Разработени са двигателни стратегии за улеснение на приземяването при упражнения с комбиниране на ротации, които обезпечават по-голяма стабилност и намаляват риска от контузии.

Публикации, свързани с дисертационния труд

1. Кючуков, Ил. (2006). Равнинен модел за изследване на движението при безопорната фаза. *Спорт & наука*, (3), 14-22.
2. Кючуков, Ил. (2006). Изследване на ориентацията на тялото на спортиста в безопорната фаза на гимнастически упражнения при равнинно движение. *Спорт & наука*, извънреден бр., (1), 18-25.
3. Кючуков, Ил., Н. Кулишев. (2007). Възможности за прецизиране на анализа на пространствени движения. Научни трудове на Русенски университет „Ангел Кънчев”, том 46, серия 8, 45-49.
4. Кючуков, Ил. (2008). Изследване на ротационния потенциал на тялото на спортиста при упражнения на прескок. *Спорт & наука*, извънреден бр., (3), 29-36.