



ПРИЛОЖЕНИЕ ПО МЕЖДИНЕН ТЕХНИЧЕСКИ ОТЧЕТ

по договор BG09 „N Д03-90/27.05.2015г“

Дейност 4.5. Научни изследвания за разработване на собствена детска ръка на робот за имитиране на жестове - структурно описание на собствен интерфейс с терапевт-робот за визуално наблюдение на движенията; структурни описания на мехатронната система, системата за следене и системата за управление

Интегриране на Microsoft Kinect, PID контролери сензор за ъглово преместване за обучение на работи чрез имитация

Резюме: Взаимодействие чрез жестове между човек и робот има комплексен характер и не може да се програмира предварително. В днешно време много се прилага концепцията за обучение на работи. Обучението варира от демонстрация чрез варианти на телеоперация и „сянка“ до имитация чрез външни наблюдения. В рамките на проекта е разработен нов подход за обучение на работи чрез имитация. Той интегрира Microsoft Kinect сензор за улавяне на движения и PID контролер с директна обратна връзка от оригинално разработен сензор за ъглово отместване монтирани в ставите на робота. Роботът се учи от външни наблюдения, от учител чрез Kinect сензора и от разработените Kinect-базирани приложения. Чрез аналитичен подход за решаване на обратната задача на кинематиката, се намират ставните ъгли, които отговарят на желаната траектория на крайните звена на робота. Те се изчисляват във времето и се предават на PID контролера. Ъглово отклонение, измерено в ставите се използва да се наблюдава работата на системата Човек-робот и отклонението на движенията на крайните звена от желаната траектория.

Въведение

Роботи на бъдещето ще съжителстват и ще си сътрудничат с хората, затова те трябва да изпълняват от подобни на човешките движения до сложни умения. Взаимодействието Човек-робот (ЧР) чрез жестове ще помогне да се персонализира комуникацията с хората в различни контексти, от ежедневието до специални образователни потребности за деца с проблеми в развитието. Жестовите не могат да бъдат предварително програмирани защото локализирането и планирането на движенията на хуманоидните работи се прави основно на базата на динамични и кинематични модели, които не винаги са на разположение или е трудно да се получат в резултат на динамичната среда в ЧМ взаимоотношения и непрекъснатата необходимост от нови жестове. В днешно време, много се прилага концепцията за обучение на роботизиращи от демонстрация чрез варианти на телеоперация и „сянка“ (например безжични ръкавици поставени на учителя) до имитация чрез външни наблюдения. Човекът е „учителя“, а роботът е „ученика“ [1]. За улавяне на движенията на учителя се използват системи чрез маркери, предназначени за извличане на 3D пози във времето, но са скъпи и изискват внимателно калибриране.

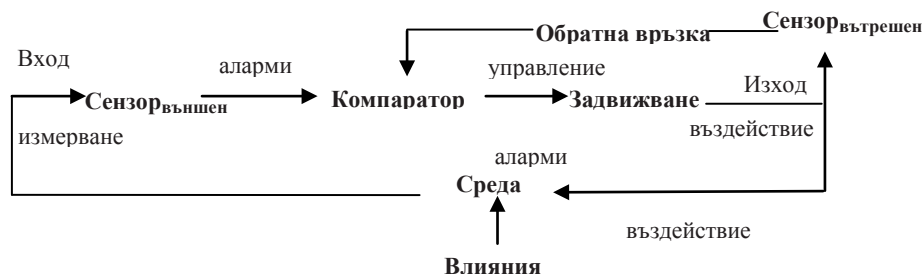


Много изследвания се правят за обучение чрез подражание чрез външни наблюдения за извличане на 3D позите от последователност от изображения. Сензорите, използвани за отчитане на движенията са външни за учителя и може да се намират на робота (ученика), както може и да не са. Този процес изисква използването на системи за улавяне на човешките движения за извличане на данни за наблюдаваните пози. Проследяване на движението на учителя от сензорно устройство е опит кинематичният модел на робота да се възстанови и да се използва за задаване на движенията на кинематичните модули на робота. Кинематичният модел описва как движението на ставите на робота е свързано с движението на кинематичните вериги, от които е съставен робота [4]. Кинематична верига е ограничен система от звена (твърди), свързани със стави.

В Роботиката има права и обратна задача по позиция, скорост или по сила. В правата задача по позиция (права кинематика) знаем кинематични уравнения на робота, за да се изчисли позицията на крайните звена в обобщени координати по зададени стойности за някои кинематични параметри. Най-често използваните параметри в кинематичните модели са ставните ъгли. При взаимодействието ЧР чрез жестове, ние трябва да решим обратната задачата по позиция. Обратната кинематика се използва за определяне на ставните ъгли за робота с цел реализиране на желаната траектория на основния на позициите и ориентациите на крайните изпълнителни звена на робота. Повечето кинематични вериги на робота се задвижват от електромотори, като се прилагат въртящи моменти (или сили, в случай на линейни движения) при ставитена робота. Динамиката на тези звена описва как роботът се движив отговор насилите (въртящи моменти) от задвижващите устройства, които карат крайните звена да се движат по зададена траектория [4]. Когато имаме динамичния модел можем да намерим въртящи моменти директно. На практика се използва закон за управление чрез обратна връзка актуализиране на прилаганите въртящи моментив отговор на отклоненията на звената от желаната траектория. За да се поддържа точно позиционирана крайни изпълнителни звена на робота, контролът чрез обратна връзка се нуждае от динамично измерване и динамичен анализ на положението и ориентацията на крайните точки или ъглите на ставите.

Основните компоненти на система за жестове (фиг. 1) са сензор, компаратор и задвижващ механизъм [6]. Сензорът обикновено е електрически или електронен компонент, който детектира промени в околната среда. При откриване тази информация се предава на компаратора за сравнение. Според вида на сензора, системите за жестове се класифицират на: визуално-базирани, инфрачервени, електро-базирани, ултразвукови, на базата на акселерометър или безжични ръкавици. Най-популярните сензорите са вид камери. През последните години, Microsoft Kinect сензор [3] е широко разпространен поради своята ниска цена и сравнително висока 3-D резолюция на наблюдение. Kinect е RGB-D сензор и осигурява синхронизирана RGB (цветна) и дълбочинна информация (D) за изображенията. Оборудван е със софтуер, който проследява 3D движението на тялото и лицето на човек, който стои пред или в рамките на обхвата на сензора. След сравняването на сегашното състояние към предишното състояние или целта на системата компараторът (с вътрешна или външна обратна връзка) извършва прости или сложни решения. Той решава какво да се прави с данните, идващи от сензорите, и как да се контролират задвижващите механизми. Обикновено това е микропроцесор, който изпраща софтуерни команди, или механична

система. В рамките на мехатронните системи задвижването често е механично, например от малък електрически мотор, който задвижва физически обект (звено).



Фиг.1 Основни компоненти на система за жестове (адаптирана от [6])

Ние предлагаме иновативен подход за обучение чрез имитация на работи за взаимодействие чрез жестове. Интегрирани са: сензор Kinect за улавяне на движенията на човека, PID контролер с директна обратна връзка от сензор за измерване на ъглово преместване (ADS), монтирани в ставите на робота. Роботът се учи от външни наблюдения на 3D позите на човека (учителя), заснети с Kinect. След анализиране на Kinect данните за скелета на учителя и идентифициране на 3D позициите на горните крайници на тялото във времето се решават следните проблеми: (1) гарантират се постоянни дължини на крайниците за цялата последователност от пози (състояща се от n на брой Kinect видео кадри); (2) решава се обратната задача по позиция (обратна кинематика) чрез декомпозиран за всеки кадър алгоритъм за изчисляване на ставните ъгли за всяка поза; (3) предложен е метод за оптимално управление на ставните двигатели по позиция при липса на динамичен модел; и (4) предложен е сензор за измерване на отклоненията на крайните точки спрямо желаната траектория с адаптивност при измерването. За да се осигури постоянна дължина на крайниците по цялата последователност от пози се прилага аналитичен метод на корекция въз основа на пропорции. За целия скелет се прилага метод за корекция на базата на оптимизация чрез ограничения предложен в [5]. Kinect данните за скелета, снети по време на жестикулирането задават желаната конфигурация за позициите на крайните кинематични вериги във времето и чрез аналитичен подход за решаване на обратната кинематична задача изчисляваме ставните ъгли, за да ги подадем на модулите за управление на робота. ADS се използват в контролната верига за постигане на динамично измерване на положението и ориентирането на крайни звена. Тъй като ъглови отклонения причиняват отклонението на крайните звена, ние измерваме ъгловото преместване в ставното пространство и го използваме като сигнал за обратна връзка на PID контролера. По този начин наблюдаваме работата на системата и PID контролерът поставен във всяка става изчислява стойността на грешката - разликата между измерения ъгъл от кинематичната верига и желания ъгъл зададен от Kinect приложението. Контролерът цели да сведе до минимум грешката чрез коригиране на променлива за управление - моторни сили или въртящи моменти. Адаптивността на ADS при измерване дава свобода за регулирането на стъпката на прецизност за достигане на желаната траектория, изразяващо се в изглаждане на движението. Изходният сигнал от ADS е аналогов и различните степени на резолюция на аналогово-цифровия преобразувател (ADC) водят до различен брой дискретни стойности,

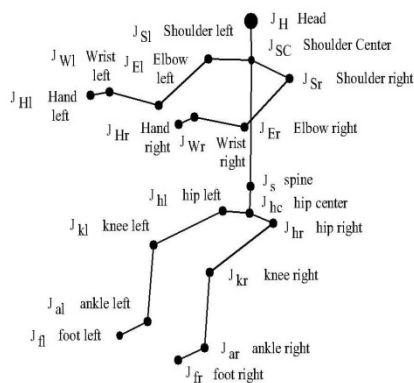


произведени в диапазона на аналогови стойности, които регулират стъпката на прецизност на измерването. Например, ако искаме да имитираме жеста "Увеличи или стесни екрана" при който участват по-големите стави, стъпката на прецизност трябва да бъде по-голяма от стъпката, използвана по време на жестове с пръсти.

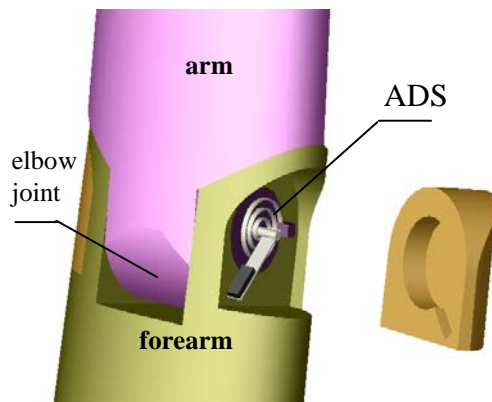
Обработка на KINECTданните за решаване на обратната кинематична задача по позиция

При анализа на движенията човешката анатомия обикновено се представя като последователност от твърди звена, свързани чрез стави – става е мястото, където са свързани две звена. Установено е, че само част от ставите са важни при жестовете с ръце, като главата, лявото и дясното рамо, лактите, китките и частите на ръката (Фиг. 2а). Фиг. 2б представя модел на ставата в лакътя и сензора, поставен там между рамото и подлакътя. Ставите могат да бъдат класифицирани в съответствие с техните степени на свобода (СнС) - броят на независимите параметри, които определят конфигурацията на кинематичната верига. Конфигурацията на горната част на ръката е представена от четири променливи за завъртане на ставите (Фиг. 3а). За нашия модел китката и пръстите са фиксирани. Моделът има 4 СнС и се задвижва от четири двигателя ($D_1 - D_4$). В рамото са два - D_1 и D_2 , които извършват въртене около две взаимно перпендикулярни оси (R_1 и R_2). Двигател D_3 позволява да се върти рамото. Завъртането на лакътя по ос R_4 се извършва от двигател D_4 . За лакътя определяме една степен на свобода тъй като се движи заедно с рамото, т.е. лакътят се намира на повърхността на сфера с център рамото. Позицията на лакътя се определя от разстоянието по дължината на рамото. Също така китката е разположена на повърхността на сфера с център лакътя. Така конфигурацията на ръката може напълно да се опише с четири ставни ъгли, като два от тях лежат в една равнина, и когато са известни 3D позициите за рамото, лакътя и китката, алгоритъмът за решаване на обратната кинематична задача се опростява.

Разработено е Kinect-базирано приложение за: извличане на 3D координатите на посочените по-горе три стави за всяка една поза; изчисляване на ставните ъгли чрез аналитични методи за всеки кадър и трансфериране на изчислените ъгли към контролните модули и задвижващите механизми на робота. Тъй като Kinect алгоритъмът за проследяване на скелетните точки е 3D (от камерата и дълбочинния сензор) ние използваме KinectCoordinateMapping за да проектираме 3D точките замястов пространствена карта от редове и колони (пиксели) с начало на координатна система $x = 0, y = 0$, съответстващо на горния ляв ъгъл на картата. За дълбочината z в мм.



a)



b)

**Фиг. 2 а) Кинект стави за скелета в седнал режим;
б) увеличен изглед на сензора ADS, поставен в лакътната става**

Поставяме ставата «рамо» в основата на координатна система на робота. Геометричните параметри (Фиг. 3б), които ние използваме, са: a_2 – дължината на вектора OP_{Je} (Евклидовото пространство между точките за рамото P_{Js} и лакътя P_{Je}) и a_4 – дължината на вектора $P_{Je}P_{Jw}$ (разстоянието между точките за лакътя и китката). За да се осигури постоянна дължина на горните крайници за цялата последователност от пози за конкретната конфигурация ние прилагаме метод за корекция на базата на пропорции. Целта е разстоянието между последователните точки да остане постоянно. В началото извършваме процес на калибриране, за да се определи дължината на горните крайници a_2 and a_4 , т. е. \bar{a}_2 е средната стойност за стойностите за първите q кадри (в резултат на експерименти определехме 150 или 5 секунди). След това започвайки от ставна точка P_{Js} за рамото (или O) и за всеки кадър, трябва да се намери неизвестна ширината и височина в правоъгълник с ъгли $Y_{P_{Je}}, P_{Je}, X_{P_{Je}}, O$, зададен диагонал \bar{a}_2 , и зададени пропорции $m:n$ (оригиналната ширина към оригиналната височина). Така удовлетворяваме Евклидово разстояние между две последователни съвместни точки да бъде равно на калибрираната \bar{a}_2 . След това коригираме старите координати за $X_{P_{Je}}$ и $Y_{P_{Je}}$ чрез новите $X_{P_{Jw_new}}$ и $Y_{P_{Jw_new}}$ и съответно ъгъл θ_2 се променя. След това коригираме $X_{P_{Jw}}$ и $Y_{P_{Jw}}$ така, че разстоянието между тях да бъде равно на \bar{a}_4 .

$$\bar{a}_2 = \frac{\sum_{i=1}^q a_2}{q}$$

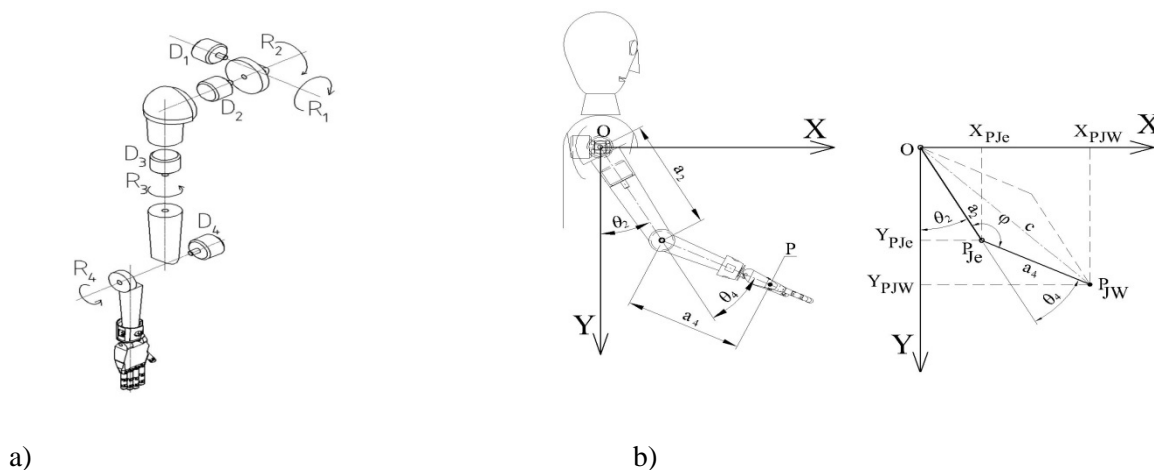
$$m_{-n} = \frac{m * \bar{a}_2}{\sqrt{m^2 + n^2 + l^2}}; \quad X_{P_{-n}} = m_{-n} * X_{P_{-n}} + X_{P_{-n}}$$

$$n_{-n} = \frac{n * \bar{a}_2}{\sqrt{m^2 + n^2 + l^2}}; \quad Y_{P_{-n}} = n_{-n} * Y_{P_{-n}} + Y_{P_{-n}}$$

$$l_{-n} = \frac{l * \bar{a}_2}{\sqrt{m^2 + n^2 + l^2}}; \quad Z_{P_{-n}} = l_{-n} * Z_{P_{-n}} + Z_{P_{-n}}$$

където: $m = X_{P_{Js}} - X_{P_{Je}}$, $n = Y_{P_{Js}} - Y_{P_{Je}}$ and $l = Z_{P_{Js}} - Z_{P_{Je}}$

Ъглите, които вземаме под внимание, са: θ_2 и θ_4 . Тези ъгли са уникални и зависят от движенията по време на жестикулиране във времето. Ние ги предаваме безжично на PID контролера. Граничните стойности за всеки от ъглите (ставни ограничения) зависят от структурата на модела на робота и трябва да бъдат зададени в програмата за управление на PID контролера.



Фиг. 3 а) Концептуален 3D модел на десен горен крайник на робота; б) Основни геометрични размери и ъгли на ротация в модела по време на движение, използвани при решаване на обратната кинематична задача

Чрез разработения от MS Kinect SDK 2.0 могат да се извлекат позициите на ставите на дясната ръка и да се определи дължината на ръката и предмишницата. Ние използваме скелетните координати за става "китка", които определят мястото P_{Jw} (Fig.3.b). Параметърът a_2 се изчислява чрез евклидовото разстояние между точките P_{Jw} и P_{Je} , докато a_4 - между точките P_{Je} и P_{Jw} . За опростяване илюстрацията на решението вземаме на предвид само движенията в една равнина и решаваме обратната кинематична задача, за да намерим промените във времето (за всеки кадър) за ъглите θ_2 и θ_4 . При използване аритметика с плаваща запетая има загуба на значимост (LOS). Ето защо ние определяме малко число $\epsilon = 0.001$, което е максимално допустимата LOS и е повече от достатъчно за коректността на обратната кинематика и управлението по време на жестикулиране. Резултатите с точност до 4 значещи цифри след плаваща запетая, които ние използваме при Kinect изчисленията и 8 значещи цифри след плаващата запетая в PID софтуера са много по-високи от зададеното число ϵ .

От Питагоровата и от косинусовата теореми получаваме:

$$c^2 = X_P^2 + Y_{Pw}^2 \Rightarrow c_w = \sqrt{X_P^2 + Y_{Pw}^2}$$

$$c^2 = a_2^2 + a_4^2 - 2 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot \cos(\varphi)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{a_2^2 + a_4^2 - c^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_4}$$

$$\theta_4 = 180 - \varphi$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{X_{P,J} - Y_{P,J}}{L}$$

Ние описваме даден жест като последователност от пози с участващите скелетни стави и техните ъгли на ротация. Фиг. 4 илюстрира моментна снимка за поза от Kinect видео (30 кадъра в секунда). Стойностите на ъглите θ_2 и φ са показани в лентата на състоянието. Ъгъл φ е по-естествен за наблюдение и възприемане.



Фиг. 4. Кадър от Kinect видео. В лентата на състоянието са показани ъглите θ_2 .

Управление на преместванията на елементите на робота по техните ъглови позиции

Управление на преместванията на елементите на робота по техните ъглови позиции е възможно в присъствието на датчик за ъглово отместване. Това може да бъде сензор за положение в абсолютна или относителна координатна система. Оптимален контрол на движението изисква обратна ъглова позиция на ставите и се извършва чрез PID контролер, блоквата-схемата на който е показана на фиг. 5. Схемата на PID - регулатора се състои от три члена: пропорционален, интегрален и диференциален, от където идва и названието му, които се сумират, за да се изчисли въздействието при управлението или манипулирана променлива (MV)

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

където:

K_p : Коефициент на пропорционално преобразуване

K_i : Коефициент на интегрално преобразуване

K_d : Коефициент на диференциално преобразуване

e : грешка $e(t) = \varphi_1 - \varphi_2$ от SP - PV

t : Време за моментни стойности

τ : Променлива при интегрирането

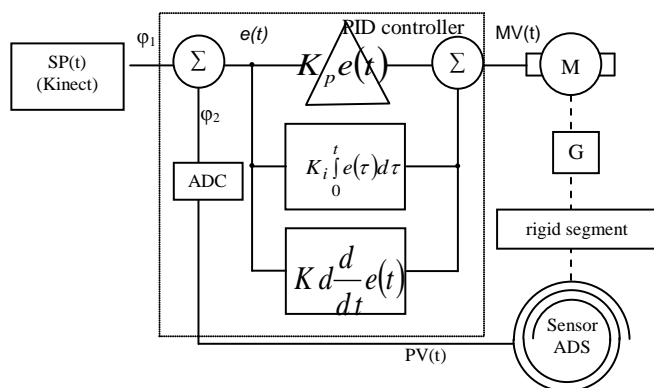


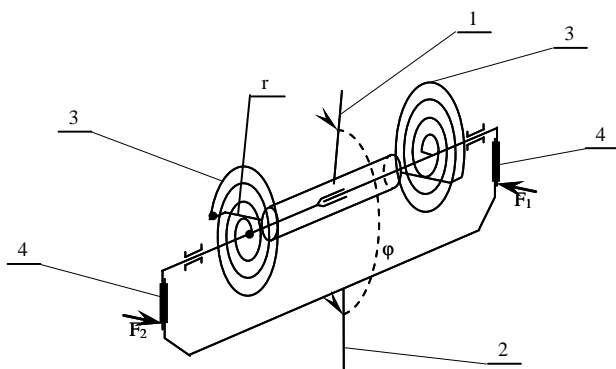
Fig. 5 A block diagram of the PID controller in a feedback loop

Работният принцип на управление е създаването на въздействия чрез ел. двигатели, като сили или моменти, които задвижват ставите за да се постигне желаната траектория. Стойностите на ъглите се измерват от ADS и се явяват като обратна връзка за да се постигне точно позициониране. Въз основа на тази обратна връзка PID-регулаторът извършва управление чрез коригиране на силите (въртящи моменти), докато множеството от Kinect ъгли се стабилизира като желание. Ъгловата позиция в робота е процесна променлива (PV). Проследяването от Kinect ъглите са зададението (SP). Входът за процеса (насилите / въртящи моменти) и на изход на контролера PID, е манипулираната променлива (MV). Разликата между измерения (в робот съвместно) и проследяваните (от Kinect) ъгли е грешка (e) и количествено дали ъгълът е твърде малък или твърде голям и с колко. Въз основа на грешки и константните параметри за текущия прототип на робот кинематична верига, PID решава как да се определят силите / въртящи моменти. Очевидният метод е пропорционално управление - силата се определя в зависимост от текущата грешка. По-сложен контрол включва производно действие чрез отчитане на скоростта на промяна на ъгъл а, т.е. добавяне на допълнително сила, ако ъгълът не се доближава до СП, и по-малко при достигане на СП. Интегралното действие използва средния ъгъл в миналото, за да открие дали ъгълът на робота е твърде висок или твърде висок и да зададе сила / въртящи моменти пропорционално последните грешки. Високото К_v води до трептения и голямо време за нарастване. За изглаждане на движенията в робототехническите задачи K_p, K_i, K_d се определят конкретно за всяка ставана за да бъде оптимален в резултат на по-малко колебание в изпълнениена PV спрямо времето.

ADS сензорите получават информация директно чрез предавката (G) за наличната грешка. Аналоговия сигнал, който идва от ADS, дава повече свобода по време на работа, за да се регулира стъпката на точността на измерване, защото на различните резолюции на ADS, резултатите в различен брой дискретни стойности, произведени в диапазона на аналогови стойности.

Сензор за положение при ъглово преместване

Плоската спирална пружина 3 е отговорен елемент на сензора за положение при ъглово преместване.



Фиг. 6 Кинематична схема на ADS: 1 – подмишница; 2 - подлякът;
3 – плоска спирална пружина; 4 – пиезо-елемент;
F1 и F2 – опорни реакции

При завъртането на осите, пораждащи моменти M_1 и M_2 , плоската спирална пружина 3 се нагъва като в материала ѝ възниква напрежение на огъване. Създава се противодействащ момент в опорната пружината, строго пропорционален на ъглана завъртане φ . Този момент се определя от израза:

$$M_{1,2} = F_{1,2} \times l_{1,2} = E \cdot J \cdot \varphi / L = E \cdot b \cdot h^3 \cdot \varphi / 12 \cdot L,$$

където E е модул на линейна деформация на материала, от който е изработена пружината;
 J – инерционният момент на напречното сечение на пружината, който за плоска спирална пружина с правоъгълно сечение е $J = b \cdot h^3 / 12$;
 b, h – размери на напречното сечение на пружината;
 L – разгънатата дължина на пружината.

Въртящите моменти $M_{1,2}$ може да се изразят и чрез якостното условие:

$$M_{1,2} = W \cdot \sigma_{ог. доп.} = b \cdot h \cdot \sigma_{ог. доп.} / 6,$$

където W е съпротивителен момент;

$\sigma_{ог. доп.}$ – допустимо напрежение на огъване на еластичния елемент.

При избор на допустимо напрежение на огъване се приема голям коефициент на сигурност (10-20), за да се осигури дълготрайност на еластичните свойства на материала, от който е изработена пружината.

Чрез избор на подходящ материал се удовлетворяват някои от основните изисквания към плоската спирална пружина: строго пропорционалност между въртящите моменти $M_{1,2}$ и



Програма BG09
„ФОНД ЗА СТИПЕНДИИ НА ЕИП“



ъгълна завъртане φ , малък температурен коефициент на модула на линейна деформация, устойчивост на корозия и др.