

HAPTIC JELENSÉGEK MODELLEZÉSE ZONGORA MECHANIKÁBAN

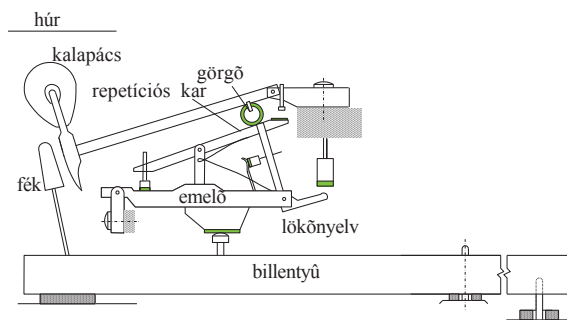
MODELING HAPTIC FEATURES OF PIANO ACTION

Horváth Péter, PhD

ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT). Keyboards of digital pianos have moderate dynamic performance compared to that of grand pianos. This paper deals with analytical and experimental investigation of check phase of touch. Finding out the relationship between initial velocity of hammer and impact force history, gives sound foundation for development of a haptic keyboard that offers the same sensation for pianist as the acoustic one. Parameters of governing expressions were determined by measurements.

1. BEVEZETÉS

A koncert zongorák mechanikája, az ún. angol mechanika nagyon bonyolult szerkezet, mely szögemelőlóból, rugókból, ütközőkből áll. Működés közben egyes kényszerek megváltoznak, egyszer rugalmasan, másszor mereven viselkednek. A szerkezet bonyolultságának legfőbb oka az általa megvalósítandó funkciók összetettsége és sokfélesége. A mechanika legfontosabb feladata a kalapácsnak nevezet alkatrész mozgatása.



1. ábra. A zongora mechanika vázlatos rajza

A billentyű lenyomásakor a mechanika a kalapácsot közelítőleg állandó áttétel közbeiktatásával emeli egészen addig, amíg a kalapács feje 2-3 mm távolságra nem kerül a húrtól (1. ábra). Ezt követően meg kell szüntetni a billentyű és a kalapács közötti kényszerkapcsolatot, hogy a teljesen lenyomott billentyű ne szorítsa a kalapácsot a húrhoz. Ebben az esetben ugyanis a húrhoz szoruló kalapács nem engedné szabadon rezegni a húrt. Megoldásként egy csuklósan rögzített lökőnyelvet alkalmaznak, mely az út nagyobbik részében merev kapcsolatot biztosít a billentyű

és a kalapács között. Mikor a billentyű már kb. 8 mm utat tett meg, a lökőnyelv kifordul a kalapács görgője alól, megszüntetve a kényszerkapcsolatot. Ezt a folyamatot nevezik *kiváltásnak*. Ha a kalapács sebessége elegendően nagy, akkor elválik a lökőnyelvtől és szabad mozgással éri el a húrt. Miután megszólaltatta a húrt, visszapattan róla, majd a fék megállítja. Mivel a fék is része a billentyűnek, a *befogási* szakasz során keletkező impulzust a zongorista szintén érzékeli.

A mechanika másik fontos feladata a *repetíció* biztosítása. Mikor egy hangot egymás után többször kell gyorsan megszólaltatni, elegendő a billentyűt csupán kb. félútig felengedni, hogy ismét kényszerkapcsolat alakuljon ki a billentyű és a kalapács között. Ekkor a billentyű újbóli lenyomása ismét megszólaltatja a húrt.

Játék közben a zongoramechanika egy interfész szerepét tölti be a zongorista ujjai és a keletkező hang között. A billentyűvel való kölcsönhatás következtében a zenész számos járulékos információra tesz szert. A három legfontosabb folyamat, a *kiváltás*, a *befogás* és a *repetíció* során a *billentyű lenyomásához szükséges erő jelentősen változik* a billentyű pozíciója, sebessége és gyorsulása függvényében. Az ujj igen finom szenzorként működve érzékeli az erőváltozásokat. Hosszú évek gyakorlása során szerzett tapasztalata alapján a jó zongorista önkéntelenül is tudatában van a mechanika pillanatnyi állapotának, valamint az állapot megváltoztatásához szükséges behatások lehetőségeivel. A tapintással és hallással nyert információk a zongorista agyában összekapcsolódnak, és mint minták eltárolódnak. Ezzel lehetővé válik a zenész számára, hogy egy kívánt zenei frázist mindenkor nagy pontossággal legyen képes létrehozni. Mivel az időbeli eltérések észlelésének nagyságrendje néhány milliszekundum, ezért a mechanika pillanatnyi állapotának ismerete különös jelentőségű.

Jelenleg a fejlett országokban minden második gyerek tanul valamilyen hangszeren, melyek közül a legnépszerűbb a zongora. A helyzet nálunk is hasonló a különbséggel, hogy az anyagi lehetőségek nem teszik lehetővé megfelelő minőségű hangszerek beszerzését.

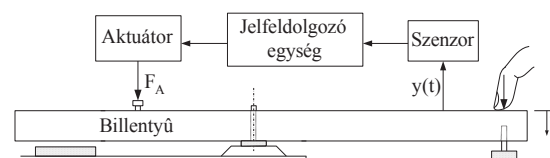
Jó hír ugyanakkor, hogy a digitális (elektromos) zongorák hangja szinte tökéletes, megfelelő hangszórók alkalmazásával élethű zongorahangot produkálnak, köszönhetően a digitálisan tárolt hangmintáknak és újabban a hangkeltés fizikai folyamatainak valós idejű emulációjának. Sajnálatosan a digitális zongorák gyártói egészen a legutóbbi időkig nem fektettek különösebb hangsúlyt a zongorák billentésére. Többnyire egyszerű rugó visszatérítésű, elmozdulással arányos, csekély visszatérítő erőt produkáló billentyűzeteket gyártottak. Ezek a könnyűzene játszására alkalmasak ugyan, azonban klasszikus darabok interpretálására gyakorlatilag használhatatlanok. A játékosnak alig van visszajelzése a mechanika állapotáról, a billentyű nem válik el az újjától, mert a rugó állandóan nekiszorítja, a billentési erő nem a gyorsulással, hanem az elmozdulással arányos, a síkos műanyag billentyűn csúsznak az ujjak, stb.

Felvetődik a kérdés, hogy miként lehetne ötvözni a digitális zongorák kiváló hangminőségét, ami akár egy jobb minőségű hangkártyával is pótolható, a koncert zongorák billentésével. Ha sikerülne készíteni egy olyan haptic billentyűzetet, mely reprodukálná a koncert zongorák billentésének legfontosabb jellemzőit és megfelelő, időbeli és intenzitásbeli információkkal szolgálna a hangkártya számára, akkor egy elfogadható áru, könnyű, kis helyigényű gyakorló eszközt biztosítana elsősorban klasszikus zenét tanuló fiatal zongoristák ezreinek számára.

2. A HAPTIC BILLENTYŰZET

A haptic billentyűzet létrehozását néhány tanulmány már felvetette, sőt számos részfeladatot már meg is oldottak. Előtanulmányként nagyon hasznos információk szerezhetők az ún. „player piano” (a gépzongora modern változata) tanulmányozása révén. Ezek olyan hagyományos zongorák, melynek kalapácsait nem csupán az eredeti mechanika, hanem szolenoid aktuátorok is tudják mozgatni. A zongorista lejátssza a zeneművet, miközben a billentyűk alá szerelt szenzorok mérik a billentyűk mozgásállapotát, illetve ezek jeleit memóriában eltárolják. Később a jeleket a memóriából kiolvastva, a szolenoid aktuátorok ugyanúgy megszólaltatják a húrokat, mint azt előzőleg a zongorista tette. Számos ilyen rendszer kereskedelmi forgalomban kapható (Bösendorfer CE).

A haptic billentyűzet új funkciójaként meg kell említeni azt a lehetőséget is, hogy zongora, orgona, csembaló billentése ugyanazon billentyűzettel reprodukálható lenne [2]. Több lehetséges út is kínálkozik a haptic billentyűzet megvalósítására.



2. ábra. A haptic billentyűzet működési elve

A mechanikai hatások villamos úton történő emulálására a kutatók szolenoid aktuátorokat, elektromágneket [1], DC illetve VCM (Voice Coil Motor) aktuátort alkalmaztak. A Széchenyi Egyetemen készítettünk egy VCM lineármotort állandó mágnesekből és billentyűre erősített gerjesztő tekercsből [5], mely kellő dinamikával rendelkezett. A villamos működtetésű billentyűzetek költségesek, mivel minden egyes billentyű pozícióját, sebességét és gyorsulását nagy pontossággal kell mérni, az adatokat valós időben kell feldolgozni úgy, hogy az aktuátor legfeljebb 1-2 ms késedelemmel fejtse ki a néha 50N nagyságrendbe eső fékező erőt, melyre különösen „staccato” (ütésszerű) billentésnél van szükség.

Másik lehetséges megoldásként kínálkozik az eredeti bonyolult mechanika egyszerűbb *mechanikával* történő helyettesítése. Erre nézve a KAWAI RM3 szolgál példaként. Megtartották a nagy tömegű kalapácsot annak érdekében, hogy a billentyű mozgatásához szükséges erő gyorsulással arányos legyen, a kiváltást pedig egy sűrűlódó pöccökkel emulálták. A billentyűk fából készültek, bevonatuk elefántcsont-érzetű, különleges tapadású műanyag. A befogási és repetíciós fázist sajnos ez a billentyűzet sem adja vissza, hiányosságai ellenére mégis jelentős fejlődésnek tekinthető.

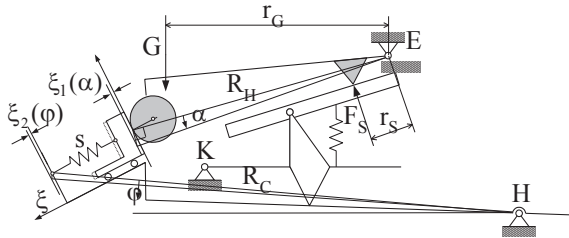
Egyelőre nem kötelezve el magunkat a haptic billentyűzet végső megvalósítást illetően (villamos, mechanikus, vagy hibrid működési elv), terjedelmi korlátok miatt csupán a legmarkánsabb visszajelzést adó **befogási fázis** dinamikai kérdésével foglalkozunk. A vizsgálatnak ki kell deríteni, hogy az egyes kinematikai mennyiségek közül melyeknek és milyen befolyásuk van a mechanika által a billentyűre kifejtett erőre.

Sajnálatosan a zongora mechanika egyszerűsített modellje is számos változót tartalmaz [3,4], az egyes elemek paramétereinek értékeit (nemlineáris rugókarakterisztikák, anyag-csillapítási tényezők, hiszterézis, stb.) pedig szinte lehetetlen pontosan meghatározni. Ilyen megfontolásból a befogási fázisra egyszerű matematikai modellt állítunk fel, mely analitikusan megoldható. A megoldásfüggvényekben szereplő változók viszont összevonhatók mindössze néhány konstansba, melyek értékei alkalmasan választott mé-

résekkel egyszerűen meghatározhatók. Az egyszerű összefüggések alkalmazása lehetővé teszi a valós idejű jelfeldolgozást, ami egy haptic billentyűzet esetében alapvető fontossággal bír.

3. A BEFOGÁSI FÁZIS MODELLEZÉSE

Miután a kalapács megütötte a húrt, a visszaeső kalapácsot a fék fogja meg ékhatással, miközben a repetíciós kar is fékezi annak mozgását. A fék



3. ábra. A fék mechanikai modellje

és a kalapács szára közötti normál erő a két felület közötti lineárisnak tekintett rugó összenyomódásából származik (3. ábra), mely az alábbi összefüggés szerint számítható:

$$N = s(c_1 \alpha - c_2 \varphi) \quad (1)$$

amennyiben $N > 0$. Az összefüggésben s a rugómerevség, α a kalapács, φ pedig a billentyű elfordulási szöge a befogás kezdetétől számítva, c_1 és c_2 arányossági tényezők. Mivel a befogás alatt a billentyű elfordulási szöge már nem változik, a fékben, mint rugóban tárolt energia a következő lesz:

$$U_b = \frac{1}{2} s c_1^2 \alpha^2 \quad (2)$$

A befogás során az érintkező felületek csúsznak egymáson, az energiavesztés az F_f súrlódó erő munkájaként határozható meg:

$$W = \int_0^\alpha F_f \cdot R_H d\alpha = \int_0^\alpha \mu s c_1 \alpha R_H d\alpha = \frac{1}{2} \mu s c_1 R_H \alpha^2 \quad (3)$$

ahol μ a súrlódási tényező a fék és a kalapács szára között, R_H a súrlódó erő karja. A repetíciós kart előfeszítő rugó nagyon lágy, így az F_s rugóerő változása a repetíciós kar kis elmozdulása során elhanyagolható. A repetíciós rugóban tárolt energia közelítőleg egyszerűen számítható:

$$U_r = F_s \cdot r_s \alpha \quad (4)$$

A mechanika energia mérlege a befogási szakaszban az alábbiak szerint írható fel:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} J \dot{\alpha}_0^2 + Gr_G \alpha &= \\ = \frac{1}{2} J \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} s c_1^2 \alpha^2 + \frac{1}{2} \mu s c_1 R_H \cdot \alpha^2 + F_s \cdot r_s \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

ahol J a kalapács tehetetlenségi nyomatéka, $\dot{\alpha}_0$ a kalapács szögsebessége a befogás kezdetén, G a kalapács súlyereje. Bevezetve az alábbi jelöléseket,

$$\begin{aligned} A &= \frac{2(Gr_G - F_s r_s)}{J} ; \quad B = \frac{(s c_1^2 + \mu s c_1 R_H)}{J} ; \\ D &= \sqrt{\frac{A^2}{4B^2} + \frac{\dot{\alpha}_0^2}{B}} \end{aligned}$$

majd megoldva az (5) differenciálegyenletet α -ra $\alpha(0)=0$ kezdeti feltétellel, a részletek mellőzésével a következő megoldást nyerjük:

$$\alpha(t) = D \sin(\sqrt{B}t - \arcsin \frac{A}{2BD}) + \frac{A}{2B} \quad (6)$$

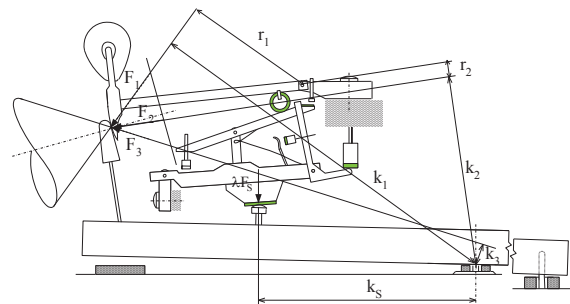
Mivel a gyakorlatban $A \ll 2B$ feltétel teljesül, a (6) összefüggés az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$\alpha(t) \cong \frac{\dot{\alpha}_0}{\sqrt{B}} \sin \sqrt{B}t \quad (7)$$

Jól látható, hogy a kalapács szögelfordulása a befogás alatt arányos annak kezdeti szögsebességével. A befogási szakasz ideje a $d\alpha/dt=0$ feltételtől határozható meg, ami jó közelítéssel állandó érték, függetlenül a kalapács kezdeti szögsebességétől:

$$t_{\text{stop}} \cong \frac{\pi}{2\sqrt{B}} \quad (8)$$

Amíg a kalapács lefele mozog a befogás alatt, addig az F_1 kényszererő a súrlódási kúp szélső alkotójában fekszik és fékezi a mozgást. Megállás után a fékrugó összenyomódása nem változik, vagyis a kontakt erő N_{max} normál komponense



4. ábra. A billentyűre ható erők a befogás alatt

változatlan marad. Az F_2 érintkezési erő iránya úgy módosul a súrlódási kúpon belül, hogy a ka-

lapács egyensúlyban maradjon a repetíciós rugó által kifejtett erő ellenére is, és ne váljon el a féktől. A 4. ábrán a fékre (billentyűre) ható erőket ábrázoltuk a befogási szakaszban. Az $r_1 \rightarrow r_2$ erőkar változás maga után vonja a $k_1 \rightarrow k_2$ erőkar változást a befogás befejeztével, ami a billentyűre ható $M_{\max} \rightarrow M_{\text{tart}}$ nyomaték hirtelen csökkenését okozza a kalapács megállása után. A billentyűre a csúzás utolsó pillanatában ható M_{\max} maximális nyomaték

$$M_{\max} = k_1 s c_1 \dot{\alpha}_0 \sqrt{1 + \mu^2} / \sqrt{B} + \lambda F_S k_S = K_1 \dot{\alpha}_0 + K_3 \quad (9)$$

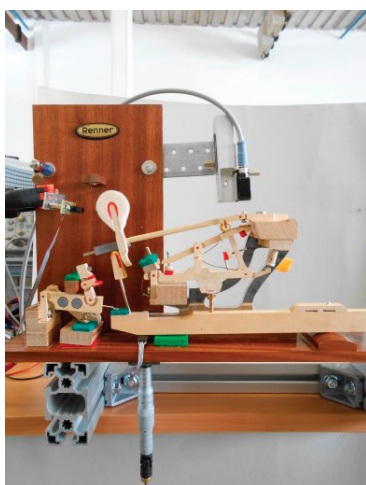
míg a befogás befejeztével ható nyomaték

$$M_{\text{tart}} = k_2 s c_1 \dot{\alpha}_0 / \sqrt{B} + \lambda F_S k_S = K_2 \dot{\alpha}_0 + K_3 \quad (10)$$

összefüggésekkel határozható meg, ahol csupán a K_1 , K_2 , K_3 konstansokat kell mérésrel meghatározni.

4. MÉRÉSEK

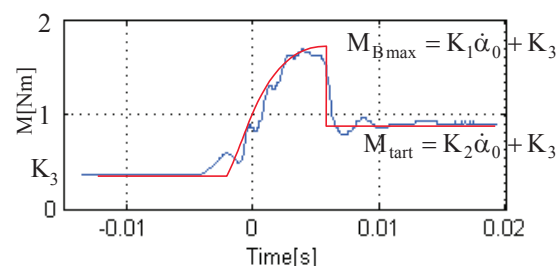
A mérések egy 1:1 méretarányú Renner GmbH gyártmányú zongora mechanika modellen történtek (5. ábra). Mivel a befogás során a billentyű már nyugalmi pozícióban van, egyszerű mérési eljárás vált lehetővé. A billentyű alá, a forgásponttól ismert távolságra elhelyezett Honeywell FSG 15N1A piezorezisztív erőmérővel közvetlenül lehetett mérni a mechanika által a billentyűre kifejtett nyomatékot, miközben a kalapácsot ismert kezdősebességgel ejtettük a fékre.



5. ábra. A kísérleti berendezés

A billentyűre ható nyomaték-idő diagram $\omega_0=12$ rad/s kalapács kezdősebességnél mérve a 6. ábrán látható, ahol az analitikusan számított görbe is fel van tüntetve. A két görbe közötti hasonlóság nyilvánvaló. A befogás ideje az ábra alapján kb. 8 ms. A mért értékekből az ismeretlen kons-

tansokat meghatározva $K_1=0,1125$ Nms/rad, $K_2=0,017$ Nms/rad, $K_3=0,4$ Nm adódott.



6. ábra. A mechanika billentyűre kifejtett nyomatékának időbeli változása a befogás és tartás alatt

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a zongoramechanika billentés-érzetet okozó dinamikai tulajdonságaival foglalkozott az egyszerűsített dinamikai modell analitikus megoldásával. Megállapítást nyert, hogy a kalapács befogási ideje jó közelítéssel független a kezdeti sebességtől. A mérések igazolták, hogy a befogási szakasz (a kalapács lefékezése) során a mechanika a billentyűre jó közelítéssel szinusz függvény szerint változó nyomatékot fejt ki, melynek amplitúdója a kalapács kezdeti sebességével egyenesen arányos. Ugyancsak arányosság mutatható ki a befogva tartáshoz szükséges nyomaték és a kalapács kezdősebessége között. Az arányossági tényezők egyszerű mérésrel határozhatók meg. A nyert egyszerű összefüggések alapvetően hozzájárulnak egy versenyzongora billentését reprodukáló haptic billentyűzet kifejlesztéséhez.

6. IRODALOM

- [1] Boccaletti, C., Duni, G., Elia, S., Dynamic model of an electromechanical piano key by means of FEM techniques. Proc. Of the Modelling and simulation, 2005, Cancun, Mexico, pp.308-313
- [2] Oboe, R., A Multi-Instrumental, Force-Feedback Keyboard. Computer Music Journal, 30:3, pp.38-52, 2006
- [3] Gillespie, B., Haptic Display of System with changing Kinematic Constraints. The Virtual Piano Action. PhD Thesis, Stanford University, CCRMA, 1996
- [4] Hirschorn, M., Birkett, S., Mephee, J., Kinematic Model of a Piano Action Mechanism (System Design Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [5] Horváth, P., Töröcsik, D., Magnetic issues of a haptic keyboard. Przegląd Elektrotechniczny, R.89 NR 2b/2013, pp. 61-63.