

Karok, csuklók, vonalzők és körzők

Arms, Joints, Rulers and Compasses

Őszinte tisztelettel ajánlom e kis dolgozatot egykori mesterem és atyai barátom, Dr. Horváth Árpád (1907-1990) technikatörténész emlékezetének. Akinek „A tüzes gép – Fejezetek a gőzgép történetéből” című könyve (Táncsics Könyvkiadó, Bp. 1963) alapvetően meghatározta mérnöki életpályám, hivatásom megválasztását.

Két évszázadon keresztül a dugattyús gőzgép a munkagépek és járművek meghajtásának kizárólagos berendezése volt. A dugattyú egyenes vonalú, alternáló mozgásának folyamatos forgó mozgássá alakításához és a gőzbevezetés vezérlésére a legkülönbözőbb mechanizmusok szolgáltak.

Néhány évtizeddel korábban még széles körben használták őket, napjainkra azonban szinte teljesen eltűntek a zárt kinematikai láncú szerkezetek. A gőzmozdony bonyolult vezérművétől a mérnöki rajztábla paralelogramma vonalzó vezetéken át a lapátkerek hajó lapátjainak állását szabályozó szerkezetig megannyi érdekes mechanizmus született.



*Klasszikus mérnöki rajztábla
paralelogramma mechanizmussal*

A karos-csuklós szerkezetek tervezésének grafikus és analitikus módszerei mély elméleti alapokra épültek. A XIX. század matematikai kutatásainak egy napjainkra eléggé elfeledett - érdekes fejezete foglalkozott a mechanizmus struktúrák és méretek vizsgálatával.

A jelen összeállítás a síkbeli karos mechanizmusok történetének néhány érdekes elemét villantja fel.

A párizsi Bibliothèque Nationale állományában 1825-ben fedezték fel az európai művészet- és technikatörténet egyedülállóan szép és érdekes

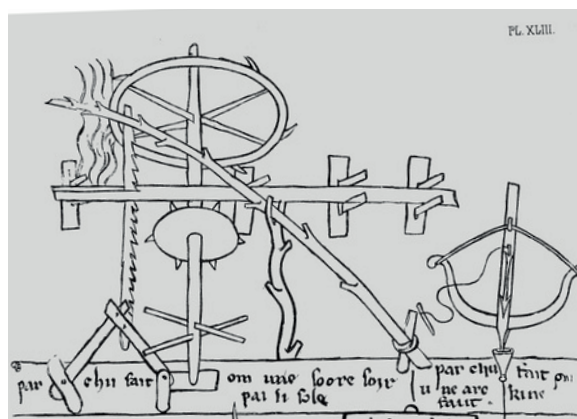
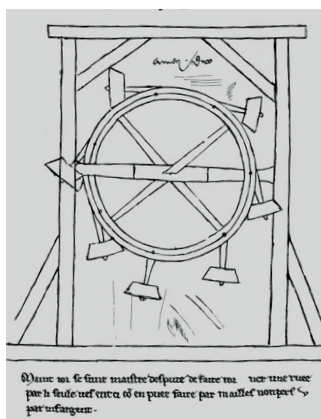
összeállítását, Villard de Honnecourt XIII. századi vázlat- és jegyzetgyűjteményét. A Magyarországot többször meglátogató mérnök komoly szerepet töltött be a tatárjárás pusztításait követő újjáépítésben. A történész kutatók kilenc francia, egy német és hét magyar egyházi létesítmény tervezésében és építésében találták meg Villard közreműködésének dokumentumait [1, 2].

A francia mester épületekről, emberekről és állatokról remekbe készült vázlatai mellett különösen érdekesek a korabeli gépezetek ábrái. Az alaprajzok, az oszlopok, boltívek, ácsszerkezetek látványképeinek szinte fényképszerű tökéletessége mellett bizarr ellenpontot képeznek a mechanikus szerkezetek nehézkes rajzai [3].

A technikatörténet első, örökmozgóról készült ábrája mellett azonban egyértelműen felismerhető és értelmezhető a vízikerekekkel hajtott, csuklós mechanizmussal mozgott fűrészgép szerkezete.

A későbbi századok során a karos, csuklós szerkezetek a gépek legfontosabb elemei lettek.

Juanello Turriano (1501-1585) regényes alakja a technika történet mellett a spanyol folklórban, a szépirodalomban és a képzőművészetben egyaránt felbukkan. A különlegesen tehetséges mérnök előbb V. Károly (1500-1558) német-római császár, majd II. Fülöp (1527-1598) spanyol király udvari mechanikusaként tevékenykedett. Első uralkodójának roppant bonyolult óraszerkezeteket és rugómozgatóval hajtott, mozgó figurákat¹ készített. Toledó egyik bizarr nevezetessége a „Fabábu utcája” (Calle del Hombre de Palo). A legenda szerint ebben a sikátorban járt a mester fából faragott szolgálja, aki alamizsnát koldult és a kocsmából hordozta gazdájának az enni-és innivalót [4]².



Villard örökmozgója és csuklós fűrészgép mechanizmusa [3]

¹ Turriano egyik felhúzzható, mozgó szerzetes bábuját a budapesti Szépművészeti Múzeum gyűjteménye őrzi.

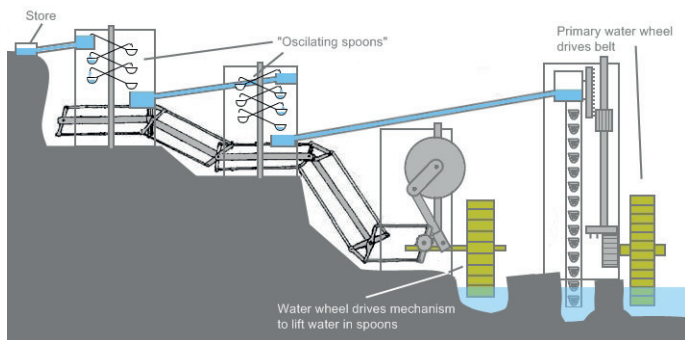
² A történet legújabb feldolgozása Antonio Lazaro „Memorias de un hombre de palo” című regénye (Suma, 2009)

Turiano leghíresebb műve a toledói királyi palota vízellátó mechanizmusa volt. A Tagus folyó vizét 90 méter magasságra emelő, gigantikus szerkezet a korabeli szépírodalomban is megjelent. Don Quijote szerzője, a jó barát Miguel de Cervantes (1547-1616) több, magyar nyelvre is lefordított novellájában írt az elképesztő masináról. Turiano másik cimborája, a festő El Greco (1541-1614) toledói tájképein örökítette meg a vízemelő készülék látványát.

A gépezet leginkább hitelesnek számító ábráit és szöveges leírását a kortárs Agostino Ramelli (1531-cca. 1610) hadmérnök *Le diverse et artificiose machine del Capitano Agostino Ramelli* címmel 1588-ban, olasz és francia nyelven írott könyvéből ismerjük [5].

A másfél évszázadon át, naponta kb. 14.000 liter vizet szállító mechanizmust két, a folyó vizébe merülő lapátkerék hajtotta. Az egyik kerék egy csuklós edényláncot mozgatott (az ábrán „Primary water wheel drives belt”). Az edények a folyó vizében telítődtek, majd felemelkedve, pályájuk legmagasabb pontján átfordulva a vizet egy gyűjtő medencébe ürítették. A medencéből a víz egy ferdén elhelyezett csövön a gép legeredetibb részéhez, a billegő tálcák láncolatához folyt át.

A tálcákat a másik lapátkerékkel hajtott paralelogramma mechanizmusok kapcsolódó láncolata billegette („Water wheel drives mechanism to lift water in spoons”). Az éppen alul lévő tálcákba a hozzájuk tartozó tálcák kivezető csövéből folyt át a víz, majd a paralelogramma szerkezet az alulso tálcákat megemelte és a felsőket lesüllyesztette. A felemelkedett tálcák a mellettük lévő tálcákba öntötték át tartalmukat, ezután a csuklós láncolat ismét emelte a vízzel telített, és süllyesztette az üres tálcákat.



Turiano vízemelő szerkezetének egyszerűsített vázlata

forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Artificio_de_Juanelo

Az elképesztő mechanizmusnak napjainkra már csak néhány töredéke maradt meg. A spanyol Juanello Turiano alapítvány [6] honlapján azonban a teljes szerkezet remekbe készült digitális rekonstrukcióját csodálhatjuk.

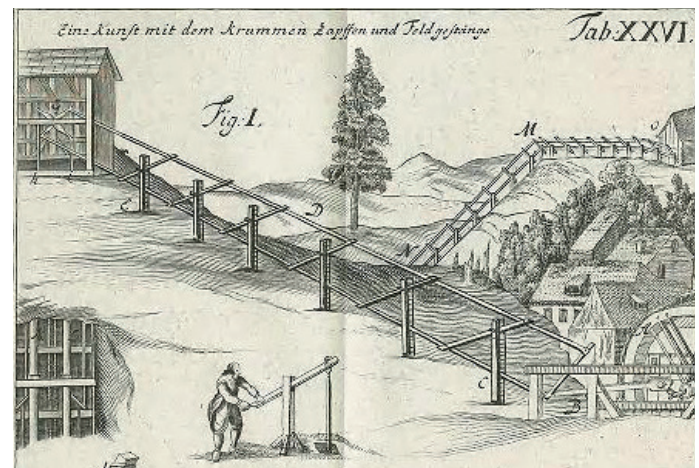
Hosszú időn át a folyók vízárma volt az egyetlen, szinte mindig rendelkezésre álló és felhasználható energiaforrás. A bányák közelében azonban legtöbbször nem voltak megfelelő folyók. A XVI. századtól kezdődően a német, angol és svéd bányákban a szivattyú és emelőgépek hajtására számos, ún. Stangenkunst³ szerkezetet alkalmaztak.

³ Angol forrásokban a szerkezet „flatrod” néven ismeretes.

⁴ A súrlódási veszteségek a betáplált energia cca. 80 %-át emésztették fel.

A folyóvíz által forgatott lapátkerék forgattyúval mozgatott egy sok száz méter (olykor több kilométer) hosszú csuklós rudazatot. A szerkezet vízszintes, párhuzamos rúdjaiknak összekapcsolt paralelogramma mechanizmusai bár hatalmas súrlódási veszteséggel továbbították az energiát⁴, ám a bővíző folyókkal hajtott gépezetek magas hegyekre is közvetíthették a mozgást.

A XVII-XVIII. századi technika értékes dokumentuma Jacob Leupold (1674-1727) tíz kötetes „Theatrum Machinarum” című összeállítása, szakszerű, német nyelvű leírással és remek ábrákkal ismerteti a bizzar szerkezeteket.



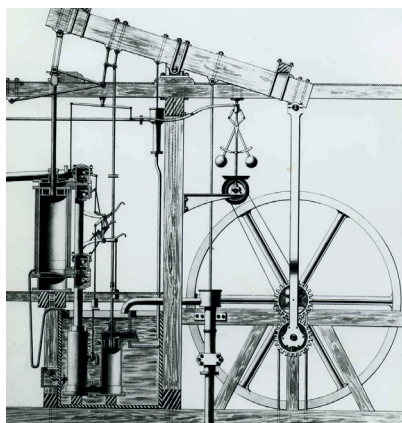
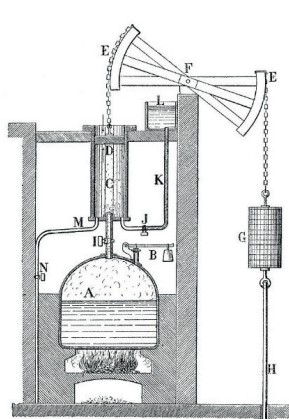
Folyóvízzel hajtott csuklós rúdlánc Jacob Leupold könyvéből

forrás: <https://archive.org/details/theatrimachinar1leup/page/n687/mode/2up>

Az atmoszférikus gőzgépekben a hasznos munkát a légnomás végezte. Az angol szénbányákba betörő vizet szivattyúzó Newcomen-féle szerkezet elrendezését következő ábra bal oldali képe szemlélteti. A függőleges C hengerben a D dugattyú alá bevezetett gőzt lekondenzáltatva a külső atmoszféránál kisebb nyomás jött létre, a levegő tehát lenyomta a dugattyút. A dugattyúhoz kapcsolt lánc a gép felső részén billegő E himba bal oldali íves felületére érintőlegesen simulva lehúzta azt. A himba jobb oldali íves felületéhez csatlakozó lánc egyúttal megemelte a H bányavíz szivattyú rudat és egy adag vizet szívott fel a mélyből. A következő ütemben a G súly lehúzta a himba jobb oldalát és a másik oldali lánc a dugattyút felemelte. A hengerbe újból gőzt vezetve majd a gőzt lekondenzáltatva a ciklus ismétlődött.

James Watt kettős működésű gőzgépében a dugattyú mindkét oldalához felváltva vezették be, majd kondenzáltatták le a gőzt. Az atmoszféra az egyik munkáütemben felülről lefelé, a másikban alulról felfelé nyomta a dugattyút. A Newcomen-gép csak húzásra használható láncával nyilván nem lehetett a himbát mozgatni. Watt egyik zseniális találmánya a dugattyút a himbához kapcsoló csuklós mechanizmus volt, lásd a következő ábra jobb oldali kiemelt részét.

A Watt-féle paralelogramma közelítő egyenesbe vezető



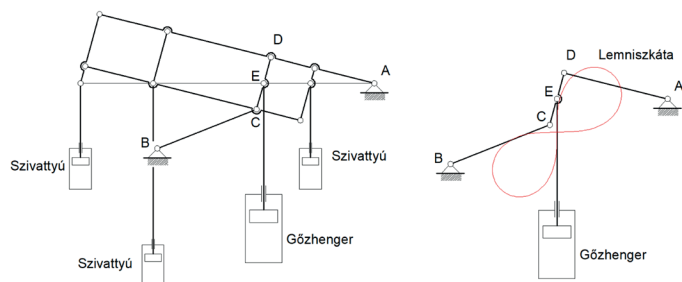
Newcomen és Watt féle atmoszférikus gőzgépek

forrás: <https://www.britannica.com/technology/steam-engine>

mechanizmus egyszerűsített vázlatán az A és B állvány-csuklókhoz az AD és BC karok kapcsolódnak, amelyeket a CD kar köt össze. ACD kar E jelű középpontja az ún. lemniszkáta görbét írja le. A lemniszkáta középső része igen jól közelíti az egyenest.

A gőzhenger dugattyúrúdja az E csuklónál kapcsolódott az ABCD négycsuklós mechanizmushoz.

A gőzgép himbájához kapcsolt különféle szivattyúk rudjai is közelítőleg egyenes vonalon mozogtak, amennyiben a kapcsolódó csuklók az AE egyenesen helyezkedtek el.



Watt gőzgépének himbás mechanizmusa

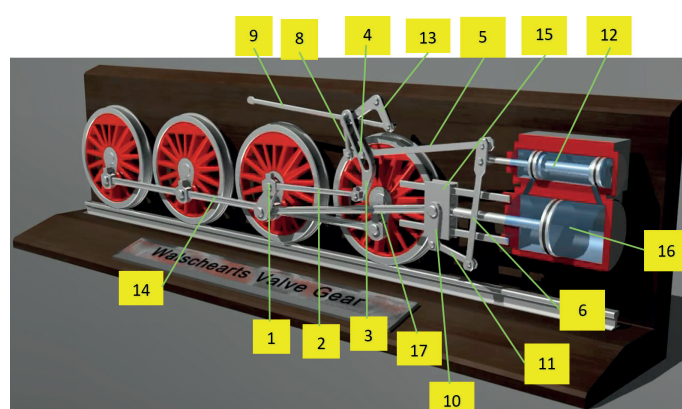
A csuklós mechanizmusok különösen fontos és látványos alkalmazásai voltak a különféle⁵ gőzmozdony vezérművek. Az 1820-as évektől már használtak különféle csuklós-csúszkás rudazatokat a friss és a munkát végzett fáradt gőz vezetés szabályozására. Az európai vasutak legtöbbnyire a Heusinger⁶-Walschaert⁷ féle mechanizmust alkalmazták.

A 16 dugattyú a 15 keresztfej közvetítésével működtette a 17 hajtórudat. A hajtórúd a 13 forgattyúval mozgatta a mozdony hajtott kerekét és a 14 csatlórúddal a további csatló kerekeket. A dugattyú egyik oldalához a friss gőz bevezetését, és az ellenkező oldalról a munkát végzett fáradt gőz elvezetését a 12 tolattyú szabályozta. A tolattyút a 6 elősietési lengőkar mozgatta. A lengőkar alsó csuklója a 11 jelű lengő összekötőhöz, felső csuklója a tolattyú

vonórúdjához kapcsolódik. A 11 rudat a 10 kar közvetítésével a 15 keresztfej mozgatja.

A mozdony sebességét a mozdonyvezető a hengerbe vezetett friss gőz mennyiségével, az ún. töltéssel szabályozta. A 9 kormányrúddal mozgatott 13 kormány gerendely a 8 jelű függvassal emelte vagy süllyesztette az 5 tolattyú vonórúdjához kapcsolt 4 kulissza követ. A kulissza kő a hajtott mozdonykerék 1 ellenforgattyújáról a 2 ellenforgattyú rúddal visszahajtott 3 jelű kulissza hornyában csúszkált, és az 5 vonórúddal mozgatta a tolattyút. A tolattyú löketének hosszát a kulisszakő helyzete határozta meg. Az álló mozdony egyik vagy másik irányba indítását a mozdonyvezető a tolattyú megfelelő helyzetbe állításával, majd a gőznek a tolattyúszekrénybe vezetésével hajtotta végre.

A gépészmérnök hallgatók egyetemi képzésében egykor



Heusinger-Walschaert rendszerű gőzmozdony vezérmű

fontos szerepet töltöttek be a működő szerkezetek. A gépelemek tudományos vizsgálatának egyik megalapozója, Robert Willis (1800-1875) a cambridge-i egyetem professzora kezdte el a csuklós mechanizmusok szemléltető modelljeinek gyűjtését.

A gépszerkezettant tudományos rendszerbe foglaló Franz Reuleaux (1829-1905) számos nyelvre lefordított, nagy hatású tankönyve [7] mellett különösen értékes a nevét viselő, közel 200 darabból álló géptani modell gyűjtemény. A patinás külföldi műszaki egyetemeken féltve őrzött relikviái a II. világháború pusztításait túlélte, finoman megmunkált kis szerkezetek [10, 11].

Az euklideszi síkgeometria szerkesztéseihez a körzöt és a vonalzót használjuk. A szerkesztésekkel ismert pontok körül húzott körök és ismert pontpárookra illesztett egyenesek metszéspontjait állítjuk elő. A metszéspontokat aztán további körök és egyenesek szerkesztéséhez használunk fel.

A körző elvileg egzakt eszköznek tekinthető, hiszen működési elve a kör definíciójának megfelel: a körző rajzoló hegyével szerkesztett vonal minden pontja a besúrt

⁵ Az európai vasutaknál ritkán vagy egyáltalán nem használt, a feltalálók nevével jelölt gőzmozdony vezérművek: Stephenson, Allan, Marshall, Gooch, David Joy, Hackworth, Blake-Knowles, lásd [9]

⁶ Edmund Heusinger von Waldegg (1817-1886) német mérnök a nevét viselő konstrukciót 1849-ben, Walschaerts-től függetlenül találta fel és szabadalmaztatta.

⁷ Egide Walschaerts (1820-1901) belga mérnök 1844-ben találta fel a mechanizmust.



Reuleaux-féle csuklós mechanizmus modellek

központi hegytől állandó távolságban van.

A vonalzónál azonban semmiféle elvi megfontolással sem igazolható, hogy a segítségével szerkesztett vonal bármely két pontja közti távolság a legrövidebb.

Georg Mohr (1640-1697) dán matematikus 1672-ben publikálta „Euclides Danicus” című könyvét, amelyben bebizonyította, hogy valamennyi euklidészi szerkesztés csupán körző alkalmazásával elvégezhető. Mohr munkája teljességgel feledésbe merült, érdekes eredményét teljességgel függetlenül Lorenzo Mascheroni (1750-1800) olasz matematikus 1797-ben „La geometria del compasso” című könyvében publikálta. Mascheroni munkája kora tudományos bestsellere lett, a geometria iránt különösen fogékony Bonaparte Napóleon (1769-1821) is érdeklődéssel forgatta.

A vonalzó nélkül, csupán pontos méretű csuklós karokkal egyenest szerkesztő mechanizmust Charles-Nicolas Peaucellier (1832-1913) francia mérnöki tábornok 1864-en fedezte fel. Peaucellier munkáját nem ismerve Yom Tov Lipman Lipkin (1845-1875) orosz zsidó matematikus 1870-ben publikálta a napjainkban mindkettőjük nevével jelzett Peaucellier-Lipkin inverzort. Az $AD=AF$, $AB=AC$, $CD=DE=EF=FC$ hosszúságú karokkal kialakított szerkezet C csuklója az A állványcsuklón halad át. Közben az E csukló az A-n és B-n átmenő „e” egyenesre merőleges „f” egyenes vonalán mozog.

A körzővel, vonalzóval, valamint egyéb speciális

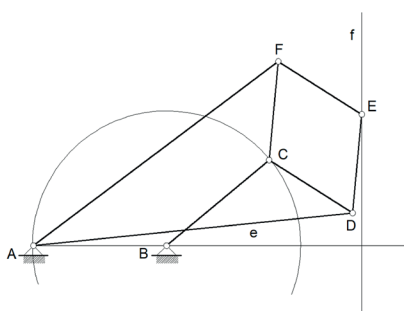
eszközökkel végezhető geometriai szerkesztések átfogó elméletét tárgyalja a magyar matematikai irodalom nemzetközi viszonylatban is egyedülálló [12] remek könyve.

Alfred Bray Kempe (1849-1922) angol matematikus 1876-ban publikált érdekes tétele szerint tetszőleges n-ed fokú algebrái síkgörbe előállítható csuklós mechanizmusok alkalmas láncolatával.

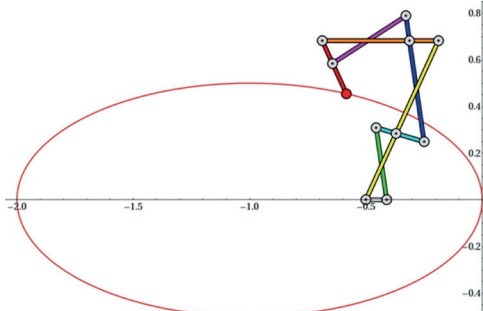
A zárt kinematikai láncú szerkezetek alapeleme a négycsuklós mechanizmus. A szembeötlően egyszerű konstrukció BC csatlóeleméhez mereven kapcsolt E1 és E2 csuklók a legkülönbözőbb hatod fokú görbéket írnak le. Samuel Roberts (1827-1913) nevezetes tétele szerint egyazon csatlógörbe három különböző négycsuklós mechanizmussal hozható létre [13].

Valamely előírt csatlógörbéhez a görbét legalább néhány pontjában érintő mechanizmus méreteinek meghatározása mindmáig az egyik legnehezebb tervezési feladat. A hatalmas elméleti és szerkesztési apparátussal dolgozó Burmester⁸-Alt⁹ eljárást a német mechanizmus iskola követői használták. Ugyanezen probléma megoldására szolgált a nyersen gyakorlatias amerikai szellem érdekes terméke, a [14] összeállítás.

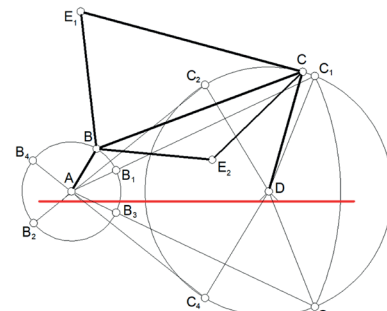
Az eredeti alakjában nyomtatott¹⁰, hatalmas méretű könyv az $AB=1''$ hosszú vezető taggal meghajtott, különféle BC, CD és AD tagméretű négycsuklós mechanizmusok jellegzetes csatlógörbéit mutatja be. Egy-egy lapon a BC csatló vonallal párhuzamos, $\frac{1}{2}''$ osztású négyzetháló



Peaucellier-Lipkin féle inverzor mechanizmus



Ellipszis szerkesztése csuklós mechanizmus láncsal

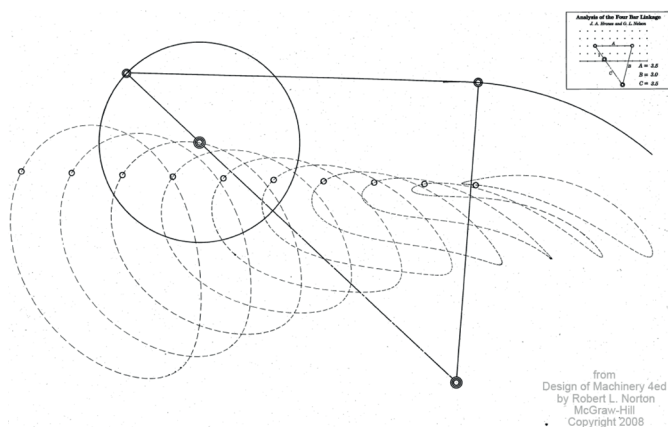


A négycsuklós mechanizmus geometriai elemei

⁸ Ludwig Burmester (1840-1927) német matematikus

⁹ Hermann Alt (1889-1954) német matematikus

¹⁰ Az Internetről szabadon letölthető, lásd pl. https://www.diywalkers.com/uploads/5/3/3/9/53394177/hrones_and_nelson_atlas.pdf



Egy tipikus oldal a [14] összeállításból

egyes pontjai által leírt görbék szerepelnek. A 730 lap mindegyikének jobb felső sarkában elhelyezett tájékoztató ábra a mechanizmus karméreteit és a csatló pontok helyeit mutatja.

Napjainkra a digitálisan vezérelt villamos hajtások a pályakövetési feladatok egyszerű, pontos megoldását adják; a bonyolult csuklós mechanizmusok eltűntek a modern ipari berendezésekből, ám a művészeti alkotások között a legkülönösebb változatokkal találkozhatunk. Theo Janssen (1948-) sok száz korból és csuklóból összeállított lépegető szörnyetegei a holland tengerpart népszerű, bizzar látványosságai.

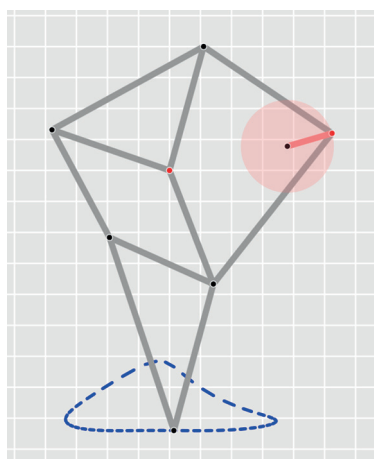
Jansen 1990 óta készíti strandbeest (hollandul strandállat) nevű, mozgó, legtöbbnyire szél által hajtott kinetikus szerkezeteit. Valamennyi modell a Jansen-mechanizmusokból épül fel, amelyek egy-egy tengely forgását a lábak lépegető mozgására alakítják át. A sajátos felépítés biztosítja, hogy a szörnyeteg könnyebben haladjon a homokon, mintha kerekeken közlekedne. Az evolúciós számítási technikák (genetikus algoritmusok) alkalmazásával olyan kinetikus szobrok jöttek létre, amelyek bizonyos mértékig képesek alkalmazkodni a környezetükhöz. Jansen nyilatkozata szerint: "...olyan csontvázakat készítetek, amelyek képesek a széllel járni. Idővel ezek a

csontvázak egyre jobban alkalmazkodnak az elemekhez, például a viharokhoz és a vízhez, és végül csordákban szeretném ezeket az állatokat kitenni a partokra, hogy a saját életüket éljék."

Laczik Bálint

Irodalomjegyzék

- [1] Takács I.: Villard de Honnecourt utazása a művészettörténetben, *Ars Hungarica*, 1994 (22. évfolyam, 1-2. szám), 15-19 o.
- [2] Gerevich L.: Villard de Honnecourt Magyarországon, *Művészettörténeti Értesítő* 20. évfolyam (1971) 81–105
- [3] The Medieval Sketchbook of Villard de Honnecourt: <https://zlibrary.to/filedownload/the-medieval-sketchbook-of-villard-de-honnecourt-0> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [4] La leyenda del hombre de palo: <https://www.paseostoledomagico.es/leyenda-hombre-de-palo/> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [5] Agostino Ramelli's Theatre of Machines (1588): <https://publicdomainreview.org/collection/agostino-ramelli-theatre-of-machines/> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [6] Animación en 3D del Artificio de Juanelo Turriano: <https://youtu.be/MwU6m9tjM2A> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [7] Reuleaux, F.: *Lehrbuch der Kinematik*, Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1900
- [8] Hámori I., Varga J.: *A gőzmozdony*, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1962
- [9] Beggs, J.S.: *Mechanism*, McGraw-Hill Book Company, inc. New York-Toronto-London, 1955
- [10] Franco, W., Trivella, A., Quaglia, G.: *Mechanism and Machine Science Educational Workshop Based on Schröder-Reuleaux Ancient Models of Politecnico di Torino*, *Advances in Historical Studies*, 2020, 9, 295-311, <https://www.scirp.org/journal/ahs>
- [11] Reuleaux Kinematic Mechanisms Collection: <https://digital.library.cornell.edu/collections/kmodl> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [12] Szőkefalvi Nagy Gy.: *A geometriai szerkesztések elmélete*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968
- [13] Visualizing Roberts-Chebyshev Theorem: <https://www.youtube.com/watch?v=bWXu8c2hHT8> (Megtekintés: 2024.05.31.)
- [14] Hrones – Nelson: *Analysis of the Four Bar Linkage*, John Wiley & Sons Inc., New York Chapman & Hall, Limited, London, 1951



Theo Janssen alapmechanizmusa és egyik, szél hajtotta tengerparti szörnyetege