

Interfejs użytkownika robota – przegląd urządzeń zadawania ruchu systemów sterowania telemanipulatorów

Artykuł recenzowany

Streszczenie

Praca stanowi przegląd wybranych, stosowanych w przemyśle oraz urządzeń komercyjnych, systemów zadawania ruchu telemanipulatorów. Opracowanie może stanowić pożyteczny przewodnik dla konstruktorów robotów medycznych.

Słowa kluczowe:

sterowanie telemanipulatorów, zadajniki ruchu, systemy haptyczne, manipulator chirurgiczny, RobinHand, sterowanie robotem, FRK, Robin Heart

ŁUKASZ MUCHA

Fundacja Rozwoju
Kardiochirurgii
im. prof. Zbigniewa Religi,
Zabrze

WPROWADZENIE

Ciągły dynamiczny rozwój technologii przyczynia się do powstawania systemów sterowania zapewniających interakcję człowiek-maszyna. Spośród różnych typów komunikacji najbardziej rozpowszechnione jest programowe sterowanie na odległość. Tego typu rozwiązanie powszechnie stosowane jest w środowiskach niebezpiecznych dla życia i zdrowia człowieka. Do wyspecjalizowanej grupy systemów umożliwiających komunikację człowiek-maszyna należy zaliczyć system sterujący gdzie wymagane jest od operatora sterowanie w czasie rzeczywistym. W tej grupie specjalne miejsce zajmują urządzenia ze sprzężeniem siłowym: haptyczne zadajniki ruchu (gr. *háptein* – przyczepiać, chwytac). Realizacja siłowego sprzężenia zwrotnego (ang. *force feedback*) pomiędzy maszyną, a operatorem wymaga rozbudowania systemów sterujących typu master-slave. Robot lub narzędzie wyposażone są w dodatkowe sensory umożliwiające pomiar siły jaka jest na nie wywierana, natomiast sam zadajnik musi posiadać napędy umożliwiające generowanie siły oddziaływującej na operatora (Rys.1) [1-3, 31-36].

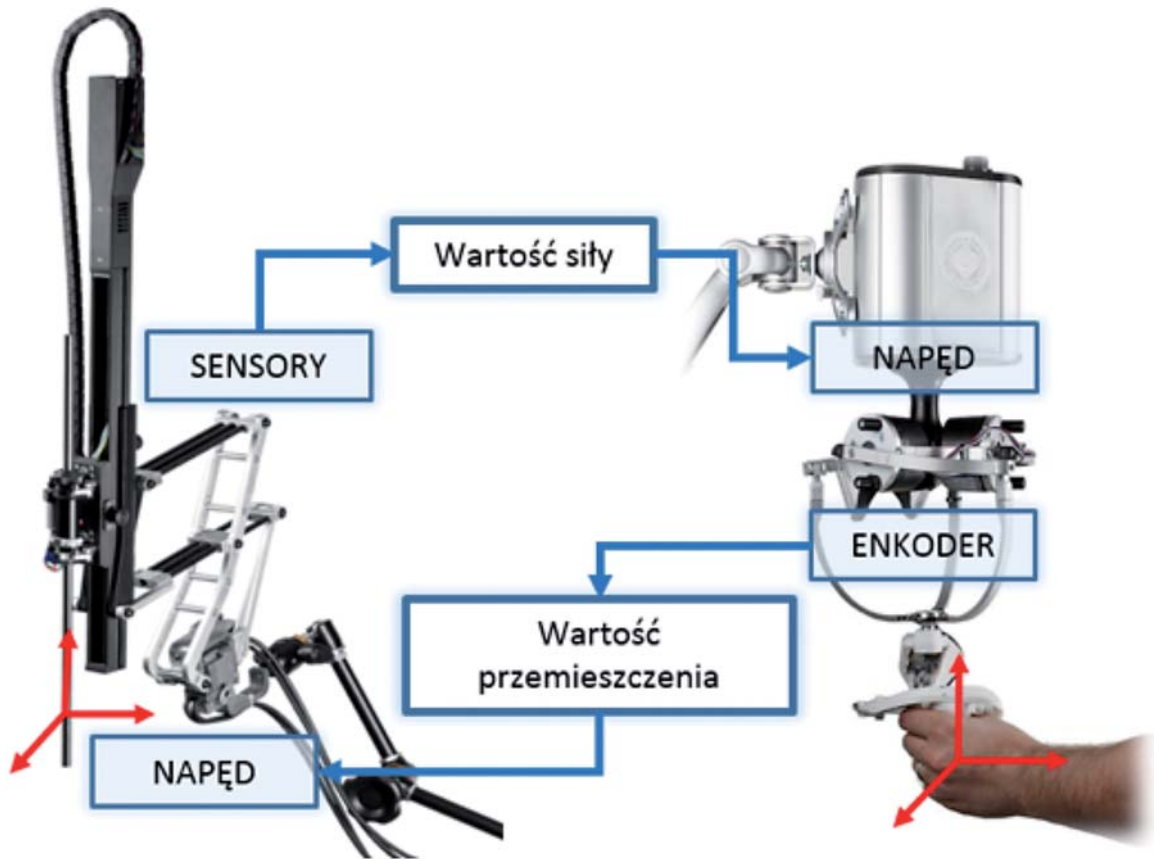
INTERFEJSY PRZEMYSŁOWE I KOMERCYJNE TELEMANIPULATORÓW

Pierwsze tego typu urządzenie zostało opracowane pod koniec 1940 roku przez Ray Goertz w Argonne National Laboratory (ANL). Urządzenie to pierwot-

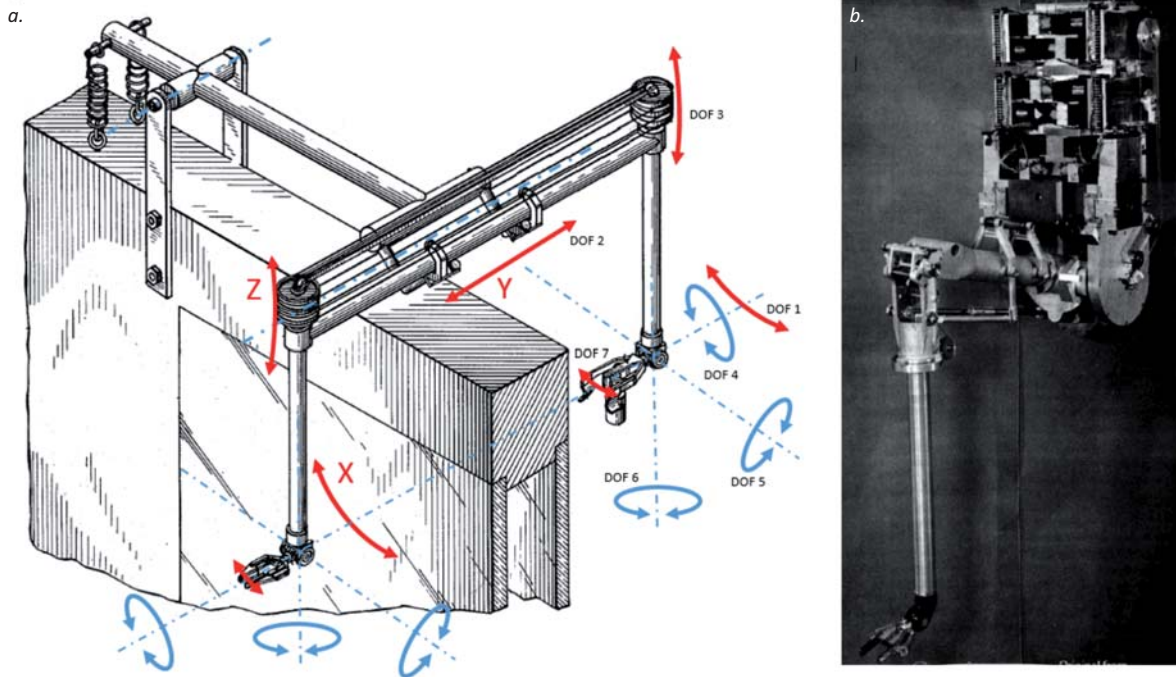
nie przeznaczone było do pracy z materiałami radioaktywnymi. Pomimo, że był to układ całkowicie mechaniczny (Rys. 2), dawał operatorowi subiektywne odczucie kontaktu z manipulowanym przedmiotem, więc możemy je uznać pierwszym urządzeniem z (mechanicznym) sprzężeniem siłowym. W późniejszych latach układ mechaniczny został zastąpiony napędami elektrycznymi.

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele tego typu urządzeń, przeważającą grupę stanowią prototypy będące na etapie badań lub w wczesnej fazie wdrażania. Najpopularniejsze z nich zostały szerzej omówione w poniższym artykule.

Jedną z wiodących firm produkujących zadajniki ruchu realizujących siłowe sprzężenie zwrotne jest firma SensAble (Geomagic® Phantom® Premium™) w USA, która opracowała serię manipulatorów PHANTOM (Rys. 3). Grupa tych manipulatorów charakteryzuje się częścią chwytową (efektorem) przypominającym specjalny długopis zamontowany na mechanicznym manipulatorze, który pozwala na współpracę z robotem, a także obiektami wirtualnymi. Manipulatory posiadają sześć stopni swobody dzięki czemu efektor może się poruszać i zatrzymać ruch dłoni w trzech kierunkach. Poszczególne typy w serii różnią się między sobą zakresem ruchów, liczbą realizowanych stopni swobody, a także siłą oddziaływującą na operatora. Wybrane parametry techniczne zostały przedstawione w tabeli 1.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie systemu master-slave ze sprzężeniem siłowym



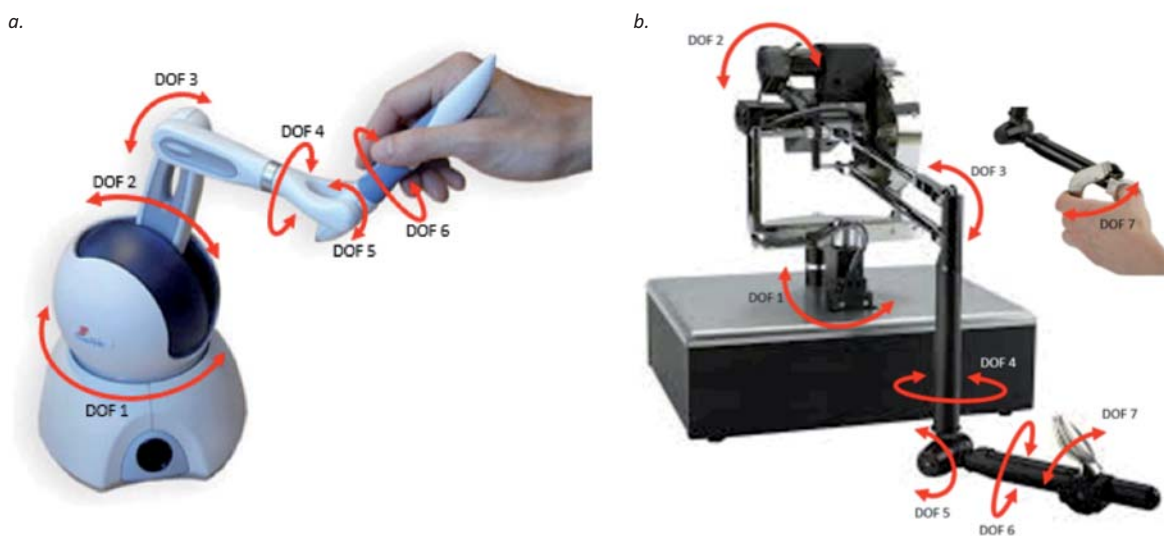
Rys. 2. Urządzenie master-slave opracowane przez Ray Goertz: a) układ mechaniczny, b) mechanizm z zastosowaniem silników elektrycznych [29, 30]



Rys. 3. Zadajniki PHANTOM firmy SensAble: a) Omni, b) Desktop, c) Premium 1,5 [4]

Tabela 1. Parametry manipulatorów firmy SensAble [5]

	Omni	Desktop	Premium 1.0	Premium 1.5 High Force	Premium 3.0
Przestrzeń robocza	> 160 W x 120 H x 70 D mm	> 160 W x 120 H x 120 D mm	254 W x 178 H x 127 D mm	381 W x 267 H x 191 D mm	838 W x 584 H x 406 D mm
Maksymalna siła przy nominalnej pozycji	3,3 N	7,9 N	8.5 N	37.5 N	22 N
Ciągła siła	0,88 N	1,75 N	1.4 N	6,2 N	3 N
Sztywność	oś X 1,26 N/mm oś Y 2,31 N/mm oś Z 1,02 N/mm	oś X 1,86 N/mm oś Y 2,35 N/mm oś Z 1,48 N/mm	3,5 N/mm	3,5 N/mm	1 N/mm
Bezładność (pozorna masa w końcówce)	~ 45 g	~ 45 g	< 75 g	<150g	<159 g
Nominalna rozdzielczość	> 450 dpi ~ 0,055 mm	> 1100 dpi ~ 0,023 mm	860 dpi 0.03 mm	3784 dpi 0,007 mm	> 1000 dpi ~ 0,02 mm
Interfejs	IEEE-1394, FireWire	Port równoległy, opcja FireWire	Port równoległy	Port równoległy	Port równoległy



Rys. 4. Poszczególne stopnie swobody realizowane przez manipulatory PHANTOM a) Omni, b) Premium 3.0

Urządzenia Omni oraz Desktop posiadają 6 stopni swobody (6 DOF) natomiast Phantom Premium dostarczany jest w czterech wersjach i może być wyposażony w wymienny efektor końcowy który zapewnia funkcjonalność zaciskową, symulując siódmy stopień swobody. Na rysunku 4 przedstawiono

poszczególne stopnie swobody oraz wariant gdzie siódmy DOF stanowi uchwyt nożycowy stosowany powszechnie w narzędziach laparoskopowych.

Force Dimension to szwajcarskie laboratorium badawcze, które od 2001 r. projektuje, konstruuje i produkuje precyzyjne zadajniki ruchu w szczególno-

ści dla sektora medycznego. Flagowe produkty *Delta*, *Omega*, oraz *Sigma* to rodzina urządzeń dotykowych, które zapewniają operatorowi instynktowną i bezpieczną obsługę. Zbudowane na bazie kinematyki równoległej, opcjonalnie połączone ruchomym nadgarstkiem (możliwość orientacji narzędzia) oraz zastosowanie efektora realizującego siłowe sprzężenie zwrotne spowodowały że urządzenia te zdobyły

szybko międzynarodowe uznanie wśród systemów haptycznych. Poszczególne warianty wykonania różnią się między sobą ilością stopni swobody, zakresem realizowanych ruchów jak i siłą oddziaływującą na operatora. Parametry zadajników przedstawiono w tabeli 2. Na rysunku 5 przedstawione zostały produkty firmy *Force Dimension* wraz z realizowanymi stopniami swobody [6].



Rys. 5. Produkty firmy Force Dimension: a) Delta.3, b) Delta.6, c) Omega.6, d) Omega.7 e) Sigma.7, e) konsola

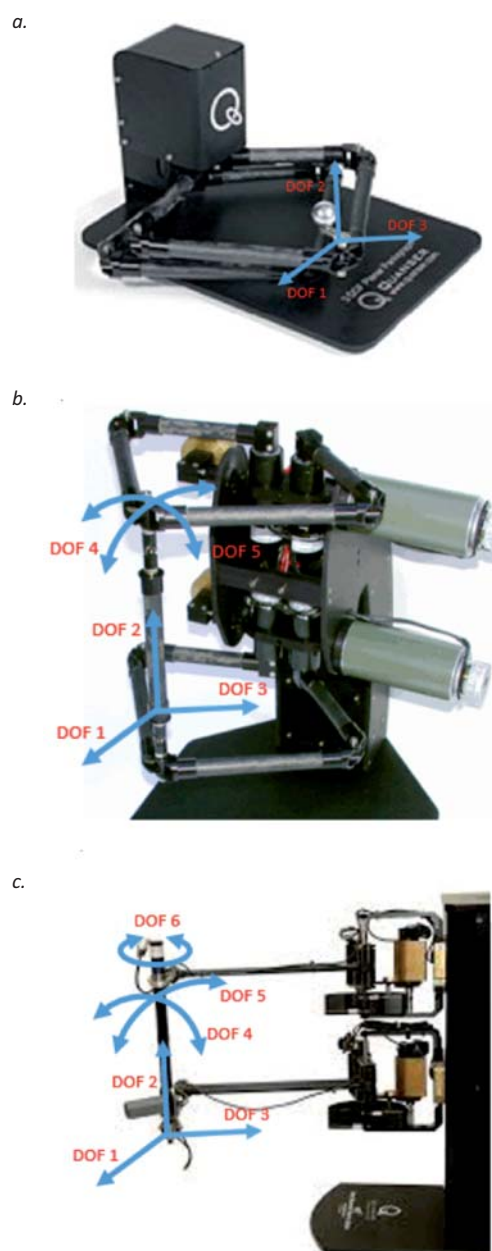
Tabela 2. Parametry manipulatorów firmy Force Dimension

	Przestrzeń robocza	Maksymalna siła	Sztywność	Nominalna rozdzielczość	Interfejs	DOF
Delta.3	∅ 400 x 260 mm	20,0 N	14,5 N/mm	0,02 mm	USB 2.0	3+1 przycisk
Delta.6	∅ 400 x 260 mm obrót ± 22°	20,0 N obrót 150 mNm	14,5 N/mm	0,02 mm obrót < 0,04°	USB 2.0	6
Omega.3	∅ 160x110 mm	12,0 N	14,5 N/mm	< 0,01 mm	USB 2.0	3+1 przycisk
Omega.6	∅ 160x110 mm 240 x 140 x 320°	12,0 N	14,5 N/mm	< 0,01 mm obrót 0,09°	USB 2.0	6+1 przycisk
Omega.7	∅ 160x110 mm 240 x 140 x 180° szczytce 25 mm	12,0 N szczytce ± 8,0 N	14,5 N/mm	< 0,01 mm obrót 0,09° szczytce 0,006 mm	USB 2.0	7+1 przycisk
Sigma.7	∅ 190 x 130 mm 235 x 140 x 200° szczytce 25 mm	20,0 N obrót 400 mNm szczytce ± 8,0 N	-	0,0015 mm obrót 0,013° szczytce 0,006 mm	USB 2.0	7+1 przycisk, 4 programowalne kanały

Manipulatory serii *Delta* w porównaniu do *Omega* charakteryzują się zwiększoną przestrzenią roboczą i wartością siły oddziaływującej na operatora. Zadajnik *Delta.6* został wyposażony w efektor połączony z platformą równoległą za pomocą kulistego przegubu umożliwiając kątowe wychylenie części chwytowej oraz obrót, zwiększając w ten sposób liczbę stopni swobody do 6. W serii *Omega.6* wprowadzony został efektor w postaci odpowiednio wyprofilowanego długopisu, natomiast dla zadajnika *Omega.7* efektor stanowi połączenie par przegubowych odpowiadających ruchom ludzkiego nadgarstka dodatkowo zapewniając *force feedback* w części chwytowej – na ostatnim stopniu swobody. Najnowszy produkt *Sigma.7* jest obecnie najbardziej zaawansowanym interfejsem dla operatora. Zapewnia on 7 aktywnych stopni swobody realizujących siłowe sprzężenie zwrotne w tym wysoką precyzję sterowania [6, 7].

Założona w 1989 r. Kanadyjska firma Quanser Inc. oferuje na rynku zadajniki opracowane przez prof. Tima Salcudean: *Haptic Wand 3* oraz *5 DOF*, a także jego nowszą wersję *HD² High-Definition Haptic Device* wyposażoną w 6 stopni swobody, w wersji na zamówienie jest ich 7. Urządzenia te bazują na kinematyce równoległej pantografu, a efektor którym manipuluje operator wykonany jest w postaci rurki. Na rysunku 6 przedstawione zostały zadajniki wraz z zaznaczonymi stopniami swobody. Producent wycofał ze sprzedaży wersję z trzema stopniami swobody. W tabeli 3 zostały przedstawione ich parametry techniczne [8-10].

Wymienione powyżej modele nie wyczerpują oferty dostępnych na rynku manipulatorów jednak przedstawiają zasadnicze cechy konstrukcyjne wyróżniające je od pozostałych. Dostępnych jest także kilka mniej popularnych rozwiązań. Znajdują one zastosowanie przede wszystkim w laboratoriach, a także umożliwiając pracę w środowisku wirtualnym. Produkty firmy *Novint Technologies, Inc* zostały przedstawione na rysunku 7. *Falcon* to zadajnik charakteryzujący się trzema stopniami swobody natomiast *Novint Xio* to prototyp ramienia niedostępnego jesz-



Rys. 6. Haptic Device: a) 3-DOF Planar Pantograph, b) Haptic Wand DOF, c) HD² High-Definition Haptic Device

Tabela 3. Parametry zadajników firmy Quanser Inc.

	5-DOF Haptic Wand	HD ² High-Definition Haptic
Przebieg robocza	X ±240 Y 85-335 Z -215-235	800 x 250 x 350 obroty 180 x 180 x ciągły
Maksymalna siła	7,7X; 7,0Y; 9,0Z [N] obroty X 750; Y 810 [Nmm]	X 19,71; Y 19,71; Z 13,97 [N] obroty X 61,775; Y 61,775; Z 1,72 [Nm]
Ciągła siła	2,3X; 2,1Y; 3,0Z [N] obroty X 230; Y 250 [Nmm]	X 10,87; Y 10,87; Z 7,67 [N] obroty 0,948 Nm
Sztwywność	6000 N/m	3000 N/m XYZ; 3,4 Nm/° XY 0,05 Nm/° Z
Nominalna rozdzielczość	20000 imp/obr	20000 imp/obr

cze na rynku. W tabeli 4 umieszczono charakterystykę techniczną zadajnika *Falcon*. Zadajniki te ze względu na swą niską cenę cieszą się popularnością wśród użytkowników gier komputerowych [10-12].

Francuska firma *Haption S.A.* posiada w swojej ofercie kilka typów zadajników, które można podzielić według kryterium osiągniętej przestrzeni roboczej i stosowanej liczby stopni swobody. Produkty *Virtuose™* (Rys. 8 a-e) są klasycznymi urządzeniami biurkowymi posiadającymi od 3 do 6 stopni swobody. Typ *Virtuose™ 6D* posiada w ofercie 3 długości ramion 40, 45 i 50 cm, wersje *TAO* dedykowaną dla symulacji przenoszenia ciężarów, oraz *HF (High Force)* o zwiększonej sile oddziaływania (max. 70 N, ciągła 30 N). Model *MAT™ 6D* (Rys. 8 f) jest dedykowanym ramieniem dla robotów pracujących ze sprzężeniem zwrotnym. Składa się on z dwóch segmentów przegubowych, osadzonych na obrotowej podstawie. Drugi segment kończy się przegubowym nadgarstkiem, który może obracać się wokół trzech osi. W konsekwencji dając operatorowi 6 stopni swobody z możliwością oddziaływania siłowego we wszystkich kierunkach. *Inca 6D™* to zadajnik którego budowa oparta jest na systemie cięgien oferująca bardzo duże pole robocze realizując przy tym *feedback* na wszystkich 6 stopniach swobody. *Inca 6D™* jest zadajnikiem dedykowanym do prac w środowisku wirtualnej rzeczywistości. Do jego głównych zastosowań należą badania ergonomiczne, badania dostępności, symulacja montażu czy przeglądanie projektów. Firma przygotowuje się do wprowadzenia na rynek ramion o 4, 5 i 7 stopniach swobody, na rysunku 7 h przedstawiony został prototyp urządzenia [13-14].

Odmianą kinematykę prezentuje zadajnik *HapticMASTER* (Rys. 9) firmy *MOOG FCS Systems*. Zbudowany jest w oparciu o kinematykę z trzema stopniami swobody (dwa przesuwu i jeden obrót),



Rys. 7. Zadajniki firmy Novit a) Falcon, b) Novint Xio [12]

charakteryzuje go bardzo duża siła i sztywność. Dodatkowo istnieje możliwość rozbudowy zadajnika zwiększając liczbę jego stopni swobody w części chwytowej zwiększając tym samym zakres pracy, dzięki dużej sile realizującej siłowe sprzężenie zwrotne wykorzystywane są także jako przyrządy rehabilitacyjne (Rys 9).

Urządzenia *CyberGrasp* oraz *CyberForce* (Rys. 10) produkowane przez producenta *CyberGlove Systems* (*CyberForce* na licencji firmy *SensAble Technologies, Inc*) są jednymi z najbardziej zaawansowanych systemów haptycznych obecnie dostępnych na rynku.

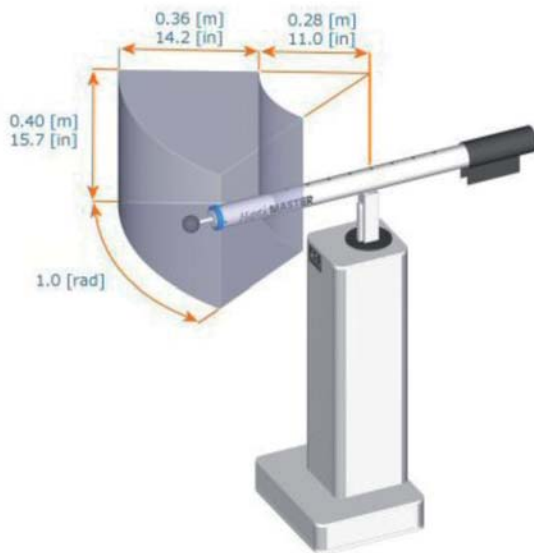
System ten umożliwia odczucie siłowe niezależnie dla wszystkich palców dłoni. Efektor wykonany w postaci specjalnej rękawicy *CyberGlove* w której dłoń umieszcza operator jest połączony z mechanizmem nośnym *CyberForce*. Pozwala badać i wchodzić w interakcje z symulowanym obiektem. Dzięki otwartemu układowi kinematycznemu charakteryzuje się on dużą przestrzenią roboczą [15, 16].

Do grupy wyróżniającej się odmienną budową można zaliczyć zadajnik firmy *Nissho Electronics Co* opartej na budowie manipulatorów równoległych połączonych z platformą Stewarta, na której umieszczony jest efektor w postaci kuli. Do tej samej grupy można zaliczyć zadajnik *Impulse Engine 3000* firmy *Immersion Corporation*, *VIRTUOSE 6D Desktop* firmy *Haption*, oraz *Cubic (MPB Technologies)*. Zadajniki te zostały przedstawione na rysunku 11. Obecnie nie są powszechnie dostępne na rynku [10, 19-23].

W 1993 r. na *University of Laval*, w Kanadzie zaprojektowany został robot przeznaczony do szybkiej orientacji w przestrzeni kamery lub aparatu o nazwie *Agile Eye*. Na podstawie tej konstrukcji opracowany został również haptic umożliwiający siłowe sprzężenie zwrotne *SHaDe*. Na rysunku 12 przedstawione zostały prototypy tych urządzeń. Mechanizm sterujący posiada tylko trzy stopnie swobody. Niewątpli-



Rys. 8. Zadajniki firmy Haption S.A. Virtuose™ 3D Desktop, a-d) Virtuose™ 6D Desktop, e) Virtuose™ 6D f) MAT™ 6D g) Inca 6D™, h) Able

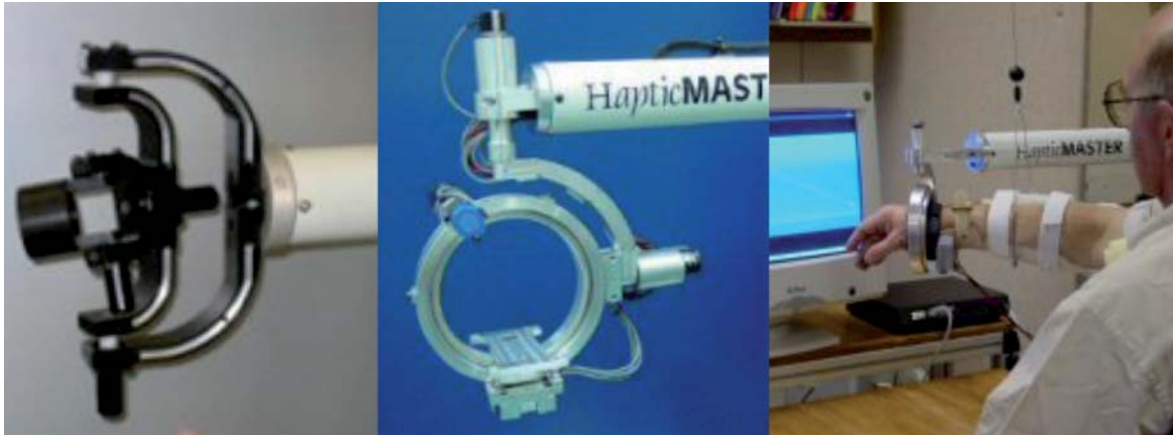


Rys. 8. Zadajnik HapticMASTER firmy MOOG FCS Systems [12]

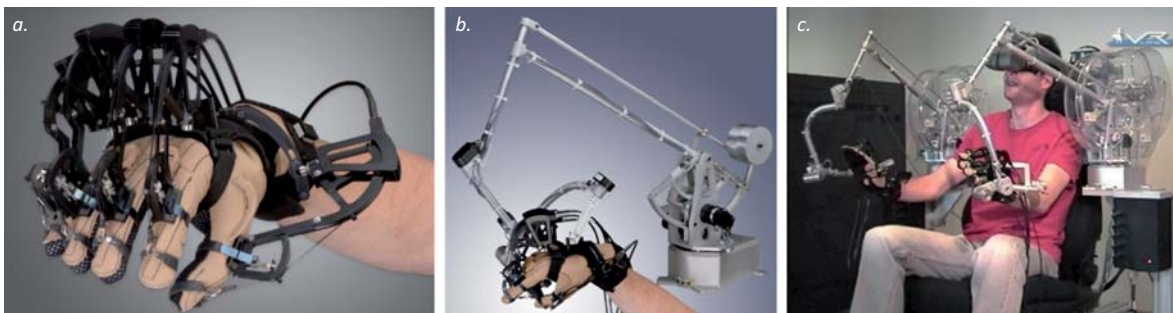
..... wną jego zaletą jest precyzyjny obrót wokół punktu
 znajdującego się wewnątrz dłoni użytkownika.

..... Odmienną konstrukcją charakteryzują się zadajniki
 wykorzystujące zjawisko lewitacji magnetycznej.
 Do najważniejszych można zaliczyć *UBC Wrist* (Uni-
 versity of British Columbia) (Rys. 13 a) *IBM Magic*
 *Wrist* (Carnegie Mellon University) (Rys.13 b), oraz
 *Maglev 200* (Butterfly Haptics, LLC) (Rys. 13 c). Cha-
 rakteryzują się one małą przestrzenią roboczą oraz
 eliminacją mechanizmów pośrednich pomiędzy
 napędem a efektem zadajnika. Takie rozwiązanie
 przyczyniło się do poprawy interakcji człowiek-ma-
 szyna. Zadajniki lewitujące cechuje bardzo mała
 bezwładność, brak tarcia statycznego i luzów oraz
 wysoka rozdzielczość [19-23].

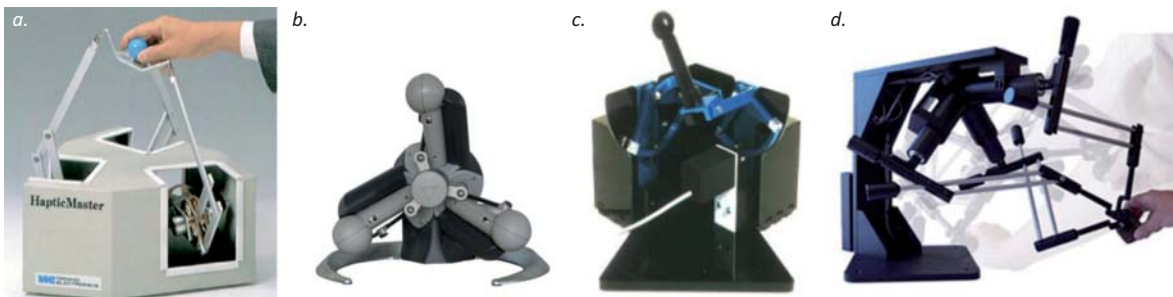
..... Dostępna jest także grupa zadajników umożliwia-
 jąca sterowanie zarówno robotem jak i wirtualną sy-
 mulacją endoskopowych zabiegów chirurgicznych.
 W urządzeniach tych część chwytowa przypomina
 część chwytową danego typu narzędzia chirurgicznego
 i w zależności od producenta może posiadać od 2 do
 7 stopni swobody. Do najpopularniejszych rozwiązań
 należy zaliczyć *Laparoscopic Impulse Engine* (Immer-
 sion Corporation), *Xitact IHP* posiadający cztery stop-
 nie swobody, oraz *MPB Technologies 7DOF* (Rys.14).



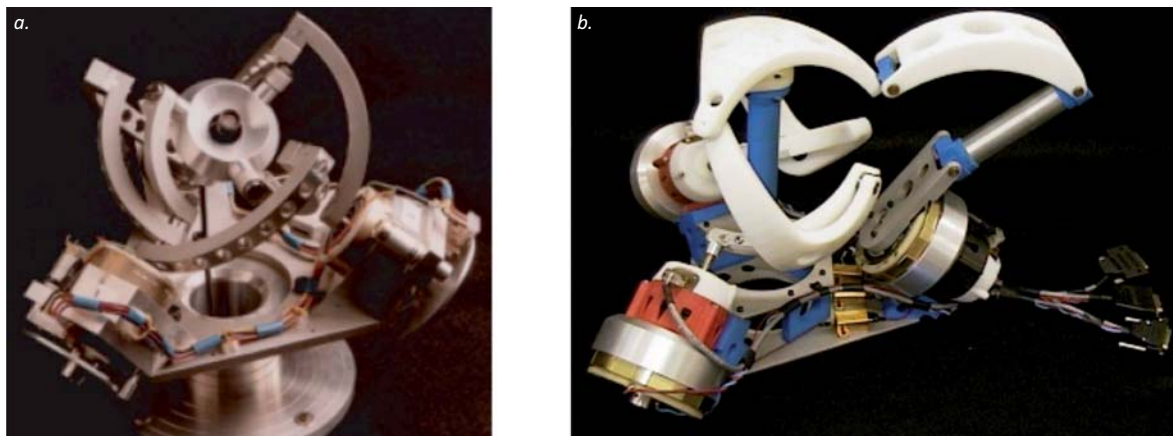
Rys. 9. Przyrządy rehabilitacyjne HapticMASTER [12-16]



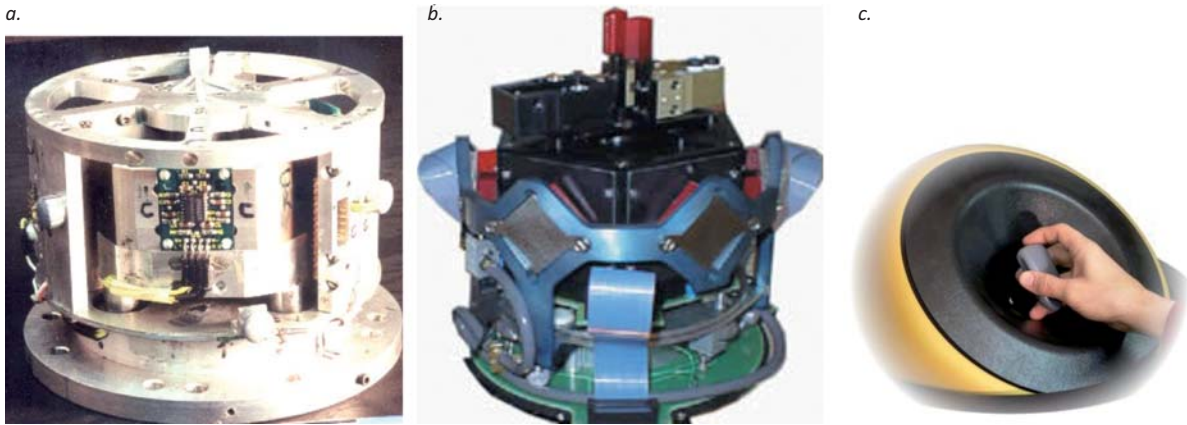
Rys. 10. Produkty firmy CyberGlove Systems: a) CyberGrasp, b) CyberForce, c) Haptic Workstation [16]



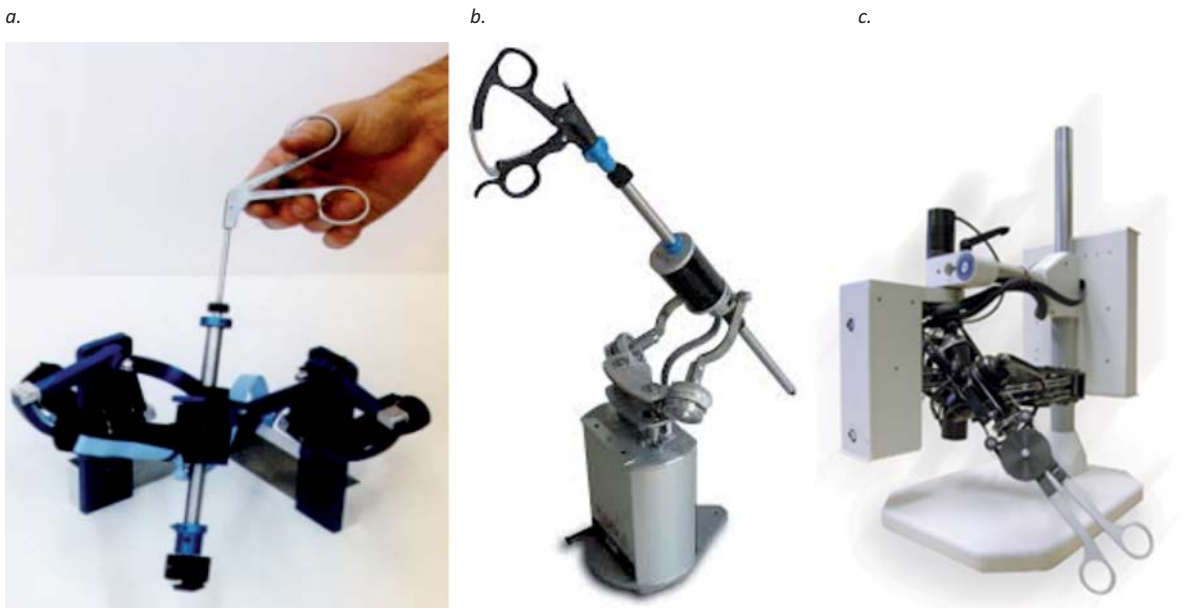
Rys. 11 Urządzenia a) Haptic Master firmy Nissho Electronics , b) VIRTUOSE 6D Desktop, c) Impulse Engine 3000, d) Cubic (MPB Technologies) [18-20]



Rys. 12. QW Prototypu urządzeń: a) Agile Eye, b) SHaDe



Rys. 13. Zadajniki lewitujące: a) UBC Wrist, b) IBM Magic Wrist, c) Maglev 200 [19]



Rys. 14. Zadajniki oparte o budowę klasycznego narzędzia laparoskopowego: a) Laparoscopic Impulse Engine (Immersion Corporation), b) Xitact IHP, c) MPB Technologies [23-26]

WNIOSKI

Jesteśmy świadkami rozwoju konstrukcji systemów zadawania ruchu stymulowanego rosnącym zainteresowaniem zdalnego sterowania zarówno telemanipulatorami jak i obiektami przestrzeni wirtualnej. Rosnące zapotrzebowanie sprzyja uruchomieniu przedsięwzięć komercyjnych i, w jego następstwie, łatwości dostępu do wielu różnorodnych rozwiązań na rynku. Zawsze konstruktor musi odpowiedzieć sobie na pytanie: kto i w jakim celu będzie stosował opracowywany zadajnik ruchu oraz czy są już na rynku obecne urządzenia spełniające określone wymagania. Zagadnienia ergonomii, zakresu ruchu, precyzji i komfortu sterowania są kluczowe dla podjęcia właściwej decyzji. Przedstawiony

przegląd wybranych komercyjnych i przemysłowych zadajników ruchu pozwala na ocenę stanu tej dziedziny techniki, która ma bezpośredni wpływ na rozwój robotyki medycznej. Postępy i ograniczenia wynikające ze sterowania za pomocą układu ruchu człowieka robotów stanowi fascynujący obszar badań interakcji człowiek-maszyna, ergonomii – optymalnego wykorzystania cech anatomicznych i fizjologicznych człowieka dla realizacji określonych zadań przez roboty.

PODZIĘKOWANIE

Dziękuję za pomoc merytoryczną w przygotowaniu publikacji kolegom: Krzysztofowi Lisowi, Krzysztofowi Lehrichowi i Zbigniewowi Nawratowi.

Tabela 3. Parametry opisanych zadajników ruchu [16-26].

	Przestrzeń robocza	Siła MAX/ciągła	Sztywność	Rozdzielczość	DOF
Falcoln	100 x 100 x 100	8,9 N	—	> 400 dpi	3
Virtuose™ 3D Desktop	200 x 200 x 200 145 x 115 x 148°	10 N/3 N	1 N/mm	0,01 mm	3
Virtuose™ 6D Desktop	200 x 200 x 200 145 x 115 x 148°	10 N/3 N obroty 0,4 oraz 0,13 Nm	2 N/mm	—	6
Virtuose™ 6D	40 cm 810 x 1065 x 458 330° x 130° x 270°	45 N/12N 3,1 i 5 Nm/ 1 i 1,4 Nm	2 N/mm	—	6
	50 cm 1010 x 1330 x 570 330° x 130° x 270°	34 N/9,5 N 3,1 i 5 Nm/1 i 1,4 Nm	1,8 N/mm	—	6
MAT™ 6D	400 x 400 x 400	30 N 3 Nm	—	0,02 mm	6
Inca 6D™	dla przestrzeni 3 m x 3 m x 3 m przestrzeń robocza wynosi 1500 x 1500 x 1500 obroty ±40°	37,5 N/15,5 N obrot 5 Nm/1,5 Nm	—	0,2 mm	6
HapticMaster	360 x 400 x 54°	250 N/100 N	10-50 N/mm	4*10 ⁻⁶ -12*10 ⁻⁶ m	3
Nissho Electronics: Haptic Master	∅ 400	10 N obrot 1 Nm	—	0,4 mm	6
VIRTUOSE 6D Desktop	∅ 300 x 260 obrot 35°	7 ~10 N/1,4 ~3 N	2,5 N/mm 2 Nm/rad	0,02 mm 0,004°	6
Impulse Engine 3000	13 cm	-/8,9 N	—	0,01 mm	—
Magic Wrist UBC Wrist	±4,5 mm obrot ±35°	20 N	—	<0,001 mm	6
Maglev 200	∅24 mm obrot ±8°	40 N w osi Z	Min.0,002 N/mm obroty max 5,1 Nm/° min 0,01 Nm/°	<0,002 0,001°	6(7)

LITERATURA

- Xin, H., Zelek, J.S., Carnahan, H.: Laparoscopic surgery, perceptual limitations and force: A review. In: First Canadian Student Conference on Biomedical Computing, Kingston, Ontario, Canada, vol. 144 (2006)
- Rosen, J., Solazzo, M., Hannaford, B., Sinanan, M.: Objective evaluation of laparoscopic skills based on haptic information and tool/tissue interactions. Computer Aided Surgery 7(1), 49–61 (2002)
- Perreault, J.O., Cao, C.G.L.: Effects of vision and friction on haptic perception. Human Factors 48(3), 574–586 (2006)
- <http://www.dentsable.com/index.htm>
- <http://www.dentsable.com>
- <http://www.forcedimension.com/>
- P. Sauer, Ł. Borucki, V. Peczyński, M. Michalski, W. Szyfter, K. Kozłowski, D. Budzyński, R. Madoński, D. Mrówczyński: Zastosowanie konsoli haptycznej do sterowania robotem medycznym, Medical Robotics, vol. 2, ISSN: 2299-7407, 2013
- Stocco, L.J., Salcudean, S.E., Sassani, F.: Optimal kinematic design of a haptic pen, IEEE/ASME Trans. Mechatron. 6(3), 210–220 (2001)
- <http://www.quanser.com>
- Astrid M. L. Kappers, Jan B. F. van Erp, Wouter M. Bergmann Tiest, Frans C. T. van der Helm; Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations; ISBN 978-3-642-14063-1
- Talasz, A.; Lawson Health Res. Inst., London, ON, Canada; Trejos, A.L.; Patel, R.V.; Effect of force feedback on performance of robotics-assisted suturing; Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on; ISSN : 2155-1774; 2012; DOI:10.1109/BioRob.2012.6290910
- <http://www.novint.com/>
- <http://www.haption.com/>
- Gosselin F. and Martins J. P. Design of a new Parallel Haptic Device for Desktop Applications Proceeding of the first Eurohaptics Conference and Symposium on haptic interfaces for virtual environment IEEE, 0-7695-2310-2/05, 2005
- <http://www.nihonbinary.co.jp/>
- <http://www.moog.com/products/haptics-robotics/>
- Van der Linde R.Q., Lammertse P., Frederiksen E., Rüter B.; The HapticMaster, a new high-performance haptic interface; Proc. Eurohaptics, Edinburgh Univ, 2002, pp. 1-5
- Iwata, H. Desktop Force Display, SIGGRAPH'94 Visual Proceedings, (1994) 215
- <http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/>
- <http://butterflyhaptics.com/>
- C Colwell, H Petrie, D Kornbrot, A Hardwick, S Furner, The use of haptic virtual environments by blind people, 1998; DOI: 10.1145/274497.274515
- <http://dev.medicalonline.jp/>
- Cecilie Va'penstad, Erlend Fagertun Hofstad, Thomas Langø, Ronald Ma'rvik, Magdalena Karolina Chmarra, Perceiving haptic feedback in virtual reality simulators, Surg Endosc (2013) 27:2391–2397 DOI 10.1007/s00464-012-2745-y
- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D. & Robles-de-la-Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. Sensor Review, 24(1), 16-29. DOI:10.1108/02602280410515770.
- J. Demers, J. M. A. Boelen; Tendon-driven serial distal mechanism; Mpb Technologies Inc.; 2003; Patent US 6593907 B1
- J.G.S. Demers, J.M.A. Boelen, I.P.W. Sinclair - 'Freedom 6S Force Feedback Hand Controller' - Space Robotics volume from the IFAC Workshop - Elsevier Science, Kidlington, UK, 1999
- Chmarra MK, Grimbergen CA, Dankelman J. Systems for tracking minimally invasive surgical instruments. Minim Invasive Ther Allied Technol. 2007;16(6):328–340. doi: 10.1080/13645700701702135
- L. Birglen, C. Gosselin, N. Pouliot, B. Monsarrat, and T. Laliberté. SHaDe, A New 3-DOF Haptic Device. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 18(2):166–175, 2002.
- Zbigniew Nawrat Robot Robin Heart – projekty, prototypy, badania, perspektywy Rozprawa habilitacyjna nr 24/2011, ISBN 978-83-7509-191-5, ISSN 1689-6262, Katowice 2011 Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach
- Goertz Raymond C; Remote-control manipulator; 1953; Patent US2632574 A
- <http://cyberneticzo.com/>
- Barczak T., Szumowski M., Mianowski K.: Projekt zadajnika i redundantnego manipulatora sferycznego przeznaczonego do chirurgii laparoskopowej. Problemy Robotyki tom 2, red. K.Tchoń, C.Zieliński, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2014
- M. Witkowski, K. Mianowski, Projekt wstępny manipulatora nośnego nowego typu dla robota do chirurgii narządów wewnętrznych. Postępy Technologii Biomedycznych, BioMedSilesia, Zabrze 2007, 336–355.
- Nawrat Z, Podsedkowski L, Mianowski K, Wróblewski P, Kostka P, Baczynski M, et al 2002 Robin Heart in 2002 – actual state of Polish Cardio-Robot. Robot Motion and Control, RoMoCo '02 Proc. of the 3rd Int. Workshop on pp 33–8
- Nawrat Z., Podsedkowski L., Mianowski K., Wróblewski P., Kostka P., Pruski R., Małota Z., Religa Z., Robin Heart 2003 – present state of the Polish telemanipulator project for cardiac surgery assistance, Int J Artif Organs. 2003 Dec; 26(12):1115-9
- J. Fraś, S. Tabaka, J. Czarnowski, Visual Marker Based Shape Recognition System for Continuum Manipulators, Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_39