

Paweł BUŃ¹
Damian GRAJEWSKI¹
Filip GÓRSKI¹
Radosław WICHNIAREK¹

ZASTOSOWANIE URZĄDZEŃ HAPTYCZNYCH W WIRTUALNYM I HYBRYDOWYM PODEJŚCIU DO PROJEKTOWANIA

Urządzenia haptyczne znalazły szerokie zastosowanie w inżynierii projektowania, między innymi dzięki zastosowaniu technologii rzeczywistości wirtualnej (ang. Virtual Reality – VR). Wprowadzenie zróżnicowanych wrażeń dotykowych pogłębia realizm symulacji w środowisku wirtualnym. Artykuł omawia budowę i zasadę działania urządzeń haptycznych oraz podobieństwa i różnice między urządzeniami haptycznymi a robotami przemysłowymi. Przedstawiono klasyfikację i przegląd urządzeń haptycznych oraz przybliżono możliwość ich zastosowania w hybrydowym podejściu do procesu przygotowania wyrobu do produkcji.

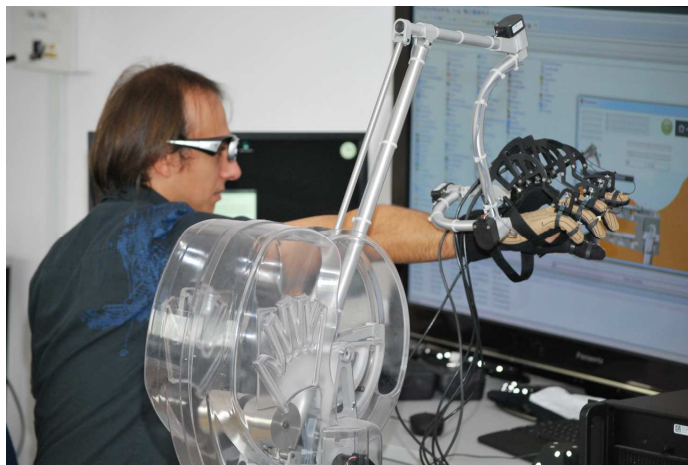
1. WPROWADZENIE

Możliwości jakie dają techniki komputerowe stosowane w projektowaniu wyrobów (CAD) można znacząco rozszerzyć przy pomocy prototypowania wirtualnego, które należy do podstawowych zastosowań rzeczywistości wirtualnej [1]. Techniki wirtualnej rzeczywistości umożliwiają umieszczenie modelu utworzonego początkowo w systemie CAD w dowolnie ukształtowanym środowisku wirtualnym, w obecności innych wirtualnych obiektów. Podstawową cechą środowiska wirtualnego jest odwzorowanie wzajemnych interakcji obiektów oraz ich zachowań w odpowiedzi na zdarzenia, wywoływane przez użytkownika lub przez inne obiekty (ciągi przyczynowo-skutkowe) [2].

Wirtualna rzeczywistość różni się od tradycyjnej symulacji komputerowej stałą obecnością użytkownika w wirtualnym środowisku. Stopień zanurzenia użytkownika w wirtualnym świecie (immersja) zależy od scenariusza symulacji, a także zastosowanych urządzeń peryferyjnych. Wpływ użytkownika na środowisko może być w znacznym zakresie zmieniany, również bezpośrednio w trakcie symulacji. Poza wpływaniem na zmysł wzroku oraz słuchu użytkownika, symulacja w rzeczywistości wirtualnej może stosować również dotykowe sprzężenie zwrotne, które w istotny sposób wpływa na stopień immersji. Sprzężenie dotykowe uzyskuje się za pomocą urządzeń

¹ Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska
E-mail: pawel.k.bun@doctorate.put.poznan.pl

haptycznych, dzięki czemu umożliwia się użytkownikowi nie tylko dotknięcie wirtualnego obiektu, ale również jego manipulację w przestrzeni oraz swobodne kształtowanie geometrii (rys. 1). Powiązanie typowej symulacji w rzeczywistości wirtualnej z manipulacją rzeczywistymi, fizycznymi modelami obiektów celem zwiększenia realizmu symulacji nazywa się prototypowaniem hybrydowym [2].



Rys. 1. Immersyjna symulacja w środowisku wirtualnym z zastosowaniem urządzenia haptycznego
Fig. 1. Immersive simulation in virtual environment using a haptic device

Urządzenia haptyczne (ang. *haptic devices*) służą do przekazywania bodźców dotykowych z rzeczywistych urządzeń lub wirtualnej rzeczywistości do użytkownika. Bodźcami tymi mogą być: siła, z jaką naciska się na przedmiot (siłowe sprzężenie zwrotne – ang. *force feedback*), kształt, masa, tekstura, temperatura i/lub wibracje (wibracyjne sprzężenie zwrotne – ang. *vibrotactile feedback*) [3].

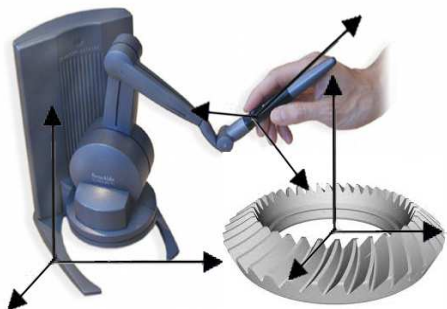
W artykule przedstawiono budowę, zasadę działania oraz zastosowania urządzeń haptycznych, wynikające z doświadczenia autorów związanego z prowadzeniem prac badawczych w Laboratorium Wirtualnego Projektowania Katedry Zarządzania i Inżynierii Produkcji Politechniki Poznańskiej.

2. CHARAKTERYSTYKA URZĄDZEŃ HAPTycznych

2.1. ZASADA DZIAŁANIA I BUDOWA URZĄDZEŃ HAPTycznych

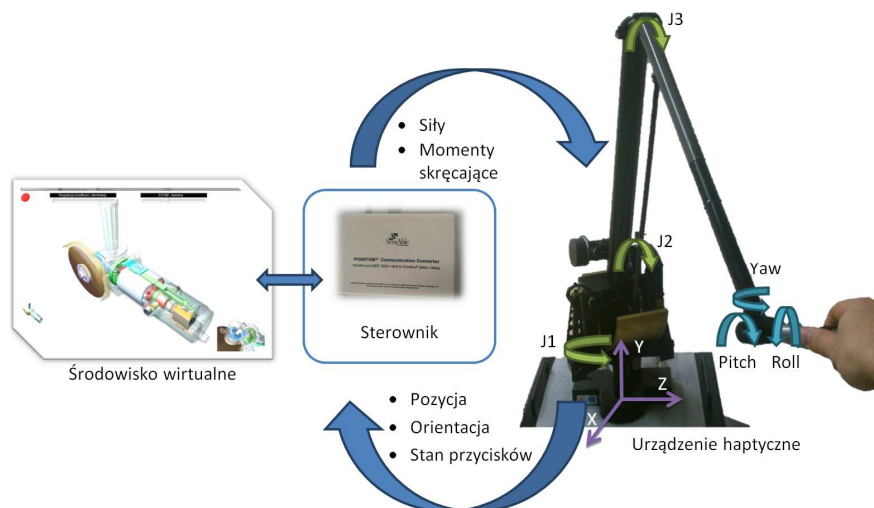
Urządzenia haptyczne są urządzeniami typu wejście – wyjście umożliwiającymi użytkownikowi bezpośrednią komunikację z systemem wirtualnej rzeczywistości. Głównym zadaniem urządzeń haptycznych jest śledzenie ruchów użytkownika (sygnał wejściowy) oraz zapewnienie siłowego sprzężenia zwrotnego (sygnał wyjściowy) podczas interakcji z obiektami w środowisku wirtualnym.

Urządzenia haptyczne pod względem mechaniki oraz zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych są w dużym stopniu zbliżone do maszyn manipulacyjnych (manipulatorów), czyli robotów przemysłowych (rys. 2). Roboty przemysłowe to wielozadaniowe maszyny manipulacyjne, automatycznie sterowane oraz odpowiednio zaprogramowane [4]. Co do zasady, taka definicja w pewnym sensie opisuje również urządzenia haptyczne i w pewnych ściśle określonych warunkach robot przemysłowy może pracować jako urządzenie haptyczne i na odwrót. Oba typy urządzeń podczas wykonywania pojedynczego zadania przetwarzają pewien zakres danych wejściowych, wynikiem tego przetwarzania jest pożądany stan urządzenia, do którego dąży ono w określonym czasie na podstawie tych danych.



Rys. 2. Urządzenie haptyczne oraz wirtualny obiekt wraz z układami współrzędnych.
Opracowano na podstawie [5]

Fig. 2. Haptic device and a virtual object with coordinate systems. On the basis of [5]



Rys. 3. Schemat wymiany danych między urządzeniem haptycznym a użytkownikiem [2]

Fig. 3. Scheme of data exchange between haptic device and a user [2]

W przypadku robotów przemysłowych, dane wejściowe to zadane położenie w przestrzeni końcówki roboczej, a pożądany stan urządzenia to określona pozycja poszczególnych ramion manipulatora. Podczas dążenia do tego stanu, robot będzie wywierał określoną siłę na obiekt umieszczony na końcówce roboczej, wynikającą z jego masy oraz przyspieszenia podczas wykonywania ruchu. W przypadku urządzeń

haptycznych, dane wejściowe to bieżące położenie końcówki roboczej – obiektem związanym z tą końcówką jest ręka użytkownika. Pożądany stan urządzenia to natomiast określona liczbowo siła i/lub moment skręcający działający na rękę użytkownika, podczas gdy końcówka robocza znajduje się w określonym położeniu.

Dla robotów przemysłowych w większości mało istotna jest wartość siły wynikającej z przemieszczania się ramion manipulatora – dla urządzeń haptycznych ta siła musi przyjmować ściśle określoną wartość, zwrot i kierunek tak aby dostarczyć użytkownikowi odpowiedni sygnał, który zostanie odebrany przez zmysł dotyku. W przypadku urządzeń haptycznych nie ma konieczności rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki, gdyż położenie urządzenia jest zawsze bezpośrednio zależne od użytkownika. Schemat przetwarzania danych przez urządzenie haptyczne przedstawia rys. 3.

Konstrukcja urządzeń (manipulatorów) haptycznych odpowiada konstrukcji manipulatorów przemysłowych. Manipulatorem nazywamy układ N ramion połączonych ze sobą przegubami i zakończony efektem (chwytakiem). Wartość N określa liczbę stopni swobody (ang. *Degree of Freedom*, w skr. *DOF*) manipulatora, która najczęściej zawiera się w przedziale od 1 do 6. Pojedyncze ogniwo manipulatora jest złożone z przegubu oraz ramienia, przy czym przegub zapewnia możliwość ruchu. Każdy przegub opisywany jest za pomocą współrzędnej wewnętrznej [4], tj. odpowiedniej wartości kątowej (na rys. 3 – J_1 , J_2 , J_3 , Yaw, Pitch, Roll). Położenie efektora w kartezjańskim układzie współrzędnych, którego bazą jest podstawa urządzenia jest wynikiem przeliczenia współrzędnych wewnętrznych podczas rozwiązywania zadania prostego kinematyki manipulatora. Poszczególne przeguby manipulatora mogą być połączone w układzie szeregowym, tworząc otwarty łańcuch kinematyczny lub w układzie równoległym, tworząc zamknięty łańcuch kinematyczny [4]. Najczęstszym rozwiązaniem w przypadku manipulatorów haptycznych jest otwarty łańcuch kinematyczny – takie rozwiązanie zapewnia największą przestrzeń roboczą, spotyka się jednak również urządzenia pracujące w układzie zamkniętym, co pozwala na uzyskanie większej sztywności manipulatora.

Jednym z ważniejszych elementów każdego manipulatora haptycznego jest jego końcówka robocza (efektor), czyli obiekt mający bezpośredni kontakt z ręką użytkownika. Efektory najczęściej są wymienne – istnieje możliwość stosowania końcówek o różnych możliwościach, zawierających np. przyciski lub układy przycisków służące do uruchamiania dodatkowych funkcjonalności (rys. 4).



Rys. 4. Efektory urządzeń haptycznych – sztywny z przyciskami (po lewej), dwuczłonowy (na środku), własny wykonany technikami szybkiego wytwarzania (po prawej) [7],[8]

Fig. 4. End effectors of haptic devices – rigid with buttons (on the left), two-part (in the middle), custom, made by additive manufacturing technologies (on the right) [7],[8]

Niekiedy efektory posiadają dodatkową możliwość ruchu, imitując np. kształt nożyczek lub innego prostego mechanizmu, co wprowadza dodatkowy stopień swobody manipulatora (tzw. manipulatory 7 DOF). Większość dostępnych komercyjnie urządzeń haptycznych umożliwia także zastosowanie własnych efektorów – obiektów o dowolnym kształcie, najczęściej wytwarzanych technikami szybkiego wytwarzania (ang. *Rapid Manufacturing*). Zastosowanie takiego efektora w połączeniu z symulacją w środowisku wirtualnym nosi nazwę prototypowania hybrydowego.

2.2. KLASYFIKACJA I CECHY URZĄDZEŃ HAPTYCZNYCH

Ze względu na cechy konstrukcyjne oraz właściwości użytkowe, można wyróżnić kilka podstawowych cech urządzeń haptycznych, służących jako kryteria ich klasyfikacji. Przedstawiono je w tabeli nr 1.

Tabela 1. Kryteria podziału urządzeń haptycznych
Table 1. Criteria of division of haptic devices

Lp.	Kryterium	Zakres zmienności
1.	Układ kinematyczny	<ul style="list-style-type: none"> • układ otwarty • układ zamknięty
2.	Liczba stopni swobody (DOF)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 DOF • 2 DOF • 3 DOF • 6 DOF • 7 DOF
3.	Przestrzeń robocza	<ul style="list-style-type: none"> • < 15-20 cm³ – zakres ruchów nadgarstka • < 40-50 cm³ – zakres ruchów łokcia • > 50 cm³ – zakres ruchów ramienia
4.	Rodzaj efektora	<ul style="list-style-type: none"> • sztywny (0 DOF) • dwuczłonowy (1 DOF) • wieloczłonowy (>2 DOF) • hybrydowy (rękawica)
5.	Typ siłowego sprzężenia zwrotnego	<ul style="list-style-type: none"> • tylko siły XYZ (3 DOF) • tylko momenty skręcające (3 DOF) • siły XYZ oraz momenty skręcające (6 DOF) • siły XYZ, momenty skręcające oraz dodatkowe siły (np. ciągną na poszczególne palce dłoni)
6.	Wielkość siłowego sprzężenia zwrotnego	<ul style="list-style-type: none"> • do 8 N – urządzenia <i>low-force</i> • do 25 N – urządzenia standardowe • powyżej 25 N – urządzenia <i>high-force</i>

Poza kryteriami podziału urządzeń haptycznych, można je też scharakteryzować następującymi parametrami:

1. Masa całkowita urządzenia. Powinna być ona jak najmniejsza, co ułatwia transport. Dodatkowo im mniejsza bezwładność układu tym łatwiejsza jest manipulacja urządzeniem w przestrzeni.

2. Tarcie. Tarcie występujące pomiędzy elementami urządzenia haptycznego powinno być na tyle niskie, by w chwili gdy wirtualny obiekt nie napotyka na przeszkodę nie utrudniało poruszania manipulatorem.
3. Sztywność. Dla urządzeń o konstrukcji szeregowej maleje ona wraz z każdym kolejnym ogniwem.
4. Rozdzielczość. Określa najmniejsze wychylenie z punktu równowagi jakie może być zarejestrowane przez urządzenie lub najmniejszą siłę, jaką może wyrzucić manipulator. Im mniejsza wartość tym bardziej czuły manipulator.
5. Dopuszczalna odchyłka sygnału. Rozróżnia się dwa rodzaje dopuszczalnej odchyłki: odchyłka sygnału wejściowego (input) oraz sygnału wyjściowego (output). Maksymalna dopuszczalna odchyłka sygnału wyjściowego wynosi $\pm 5\%$ dla siły i $\pm 10\%$ dla momentu skręcającego. W przypadku sygnału wejściowego akceptowalna różnica położenia wynosi $\pm 0,1$ mm, zaś różnica położenia kąтового $\pm 1^\circ$.
6. Maksymalne przyspieszenie.
7. Sposób przesyłania danych do komputera (interfejs wymiany danych) [6].

3. PRZEGLĄD URZĄDZEŃ HAPTYCZNYCH

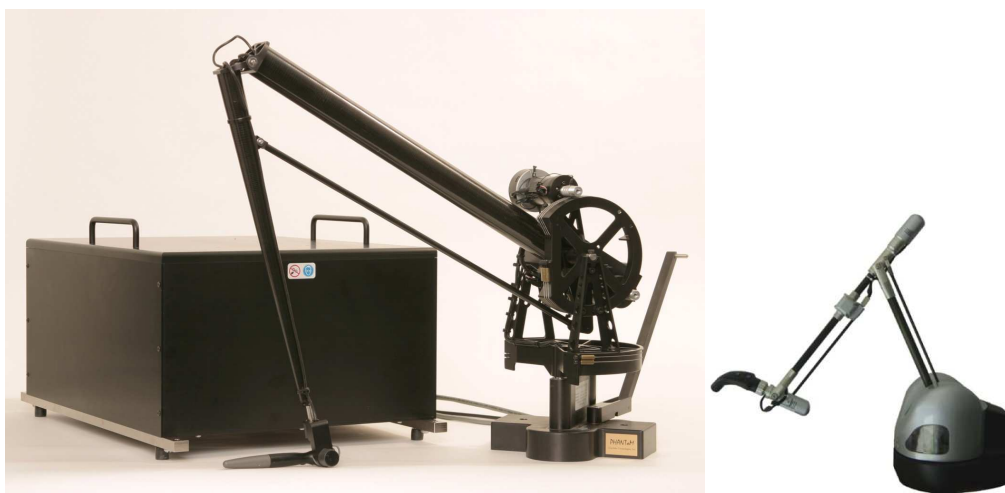
Wykaz urządzeń haptycznych wybranych do zaprezentowania w niniejszej pracy przedstawia tabela nr 2. Kryteria wyboru urządzeń do przeglądu to przede wszystkim ich popularność oraz wyróżniające się (unikalne) cechy. Światowy rynek urządzeń haptycznych jest niewielki – istnieje tylko kilku producentów, stąd trudno mówić o dużym wyborze urządzeń, natomiast praktycznie każde z nich posiada pewien zestaw cech wyróżniających. Nie można zatem mówić o odpowiednikach jednego typu urządzenia u różnych producentów – każde urządzenie jest przeznaczone do innego zastosowania.

Tabela 2. Charakterystyka wybranych urządzeń haptycznych
Table 2. Characteristics of selected haptic devices

Lp.	Nazwa urządzenia / Producent	Klasyfikacja	Parametry	
			Siła max.	Rozdzielczość
1.	Phantom Premium 3.0/6 DOF Geomagic (SensAble)	układ otwarty, 6-7 DOF, duża przestrzeń robocza (ramię), siły + momenty (6 DOF)	Siła max.	22N
			Rozdzielczość	0,02mm
2.	Virtuose 6D35-45 Haption	układ otwarty, 6 DOF, duża przestrzeń robocza (ramię), siły + momenty (6 DOF)	Siła max.	35N
			Rozdzielczość	0,006mm
3.	Phantom Premium 1.5 HF / 6DOF Geomagic (SensAble)	układ otwarty, 6-7 DOF, średnia przestrzeń robocza (łokieć), siły + momenty (6 DOF)	Siła max.	37N
			Rozdzielczość	0,007mm
4.	Touch X Geomagic (SensAble)	układ otwarty, 6 DOF, mała przestrzeń robocza (nadgarstek), tylko siły (3 DOF)	Siła max.	7,9N
			Rozdzielczość	0,023mm
5.	Sigma 7 Force Dimension	układ zamknięty, 7 DOF, mała przestrzeń robocza (nadgarstek),	Siła max.	20N
			Rozdzielczość	0,012mm

		siły i momenty (6 DOF)		
6.	CyberForce CyberGlove Systems	układ otwarty, 6 DOF + śledzenie położenia palców dłoni (rękawica 15 DOF), duża przestrzeń robocza (ramię), siły + momenty (6 DOF) + siły na poszczególne palce dłoni (egzoszkielet 5 DOF)	Siła max.	8,8N (x,y,z) 12 N (palce dłoni)
			Rozdzielczość	0,06mm

Urządzenia **Phantom Premium 3.0** oraz **Virtuose 6D 35-45** (rys. 5) należą do grupy manipulatorów haptycznych o dużej przestrzeni roboczej, umożliwiającej manipulację w zakresie ruchów całego ramienia użytkownika. Urządzenia posiadają modułarne efektory, co umożliwia ich wymianę na inny typ lub na wytworzenie i instalację własnego efektoru. Różnica pomiędzy urządzeniami polega na wielkości możliwej do uzyskania siły – urządzenie Virtuose pozwala na wywarcie siły o wielkości do 35N, co jest jedną z największych wartości osiąganych wśród urządzeń haptycznych dostępnych na rynku. Są to urządzenia uniwersalne – mają najszerszy zakres zastosowań, do których należą m. in. symulacja czynności wykonywanych na montażowych czy obróbczych stacjonarnych stanowiskach pracy czy medyczne symulacje edukacyjne.



Rys. 5. Uniwersalne manipulatory haptyczne –Phantom Premium 3.0 (po lewej) i Haption Virtuose 6D 35-45 (po prawej) [7],[8]

Fig. 5. Universal haptic manipulators – Phantom Premium 3.0 (on the left) and Haption Virtuose 6D 35-45 (on the right) [7],[8]

Urządzenie **Phantom Premium 1.5 HF/6 DOF** (rys. 6) jest reprezentantem grupy manipulatorów o średniej wielkości przestrzeni roboczej. Urządzenie wyróżnia się dużą wartością możliwej do uzyskania siły wywieranej na rękę użytkownika – jest to 37N. Podobnie jak Phantom Premium 3.0, efektor jest modułarny, co umożliwia jego wymianę. Zastosowanie tego urządzenia to symulacja czynności wykonywanych w małym polu roboczym, z zastosowaniem relatywnie dużej siły.



Rys. 6. Manipulator Phantom Premium 1.5 HF [8]
Fig. 6. Phantom Premium 1.5 HF manipulator [8]

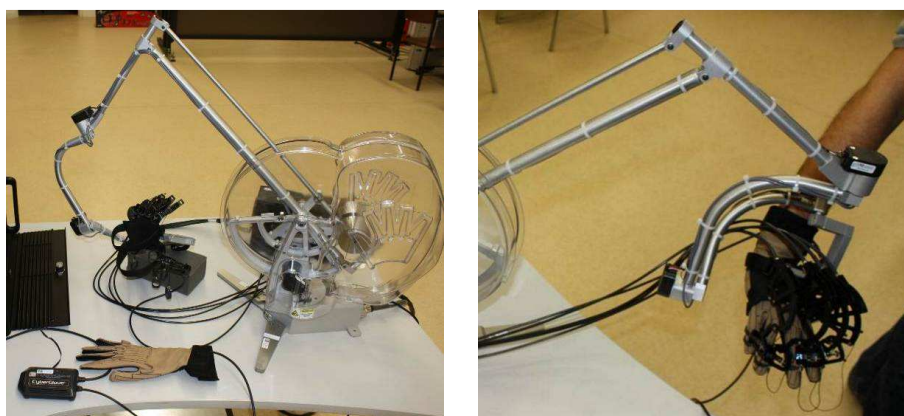
Geomagic Touch X (rys. 7) to reprezentant biurkowych urządzeń haptycznych (ang. *desktop haptic devices*). Przestrzeń robocza tego urządzenia niewiele przekracza przestrzeń roboczą standardowego joysticka lub myszy komputerowej. Wielkość symulowanych sił również jest mała, sięga 8 N. Urządzenia tego typu są stosowane głównie do precyzyjnego modelowania powierzchniowego w środowisku wirtualnym i stosowane są szeroko np. w przemyśle dentystycznym, do cyfrowego modelowania implantów stomatologicznych. Ten rodzaj modelowania określa się jako tzw. „cyfrowe rzeźbienie” (ang. *digital sculpting*) i polega on na symulowaniu procesu interakcji modelarza z materiałem o właściwościach plastycznych. Urządzenia biurkowe są kilkunastokrotnie tańsze od urządzeń uniwersalnych typu Virtuose 6D35-45.



Rys. 7. Manipulator Geomagic Touch X (po lewej) [8] oraz Force Dimension Sigma 7 (po prawej) [9]
Fig. 7. Manipulators: Geomagic Touch X (on the left) [8] and Force Dimension Sigma 7 (on the right) [9]

Urządzenie **Sigma 7** producenta **Force Dimension** (rys. 7) należy do manipulatorów biurkowych o zamkniętym układzie kinematycznym. Charakteryzuje się dzięki temu dużą sztywnością przy stosunkowo małej przestrzeni roboczej, ma możliwość symulowania sił do 20 N. Zastosowanie tego urządzenia to głównie teleoperacje – umożliwia ono precyzyjną manipulację w niewielkim polu roboczym.

Urządzenie **CyberForce** producenta **CyberGlove Systems** (rys. 8) jest najbardziej złożonym urządzeniem haptycznym obecnie dostępnym na rynku. Ma układ otwarty o dużej przestrzeni roboczej, lecz zamiast manipulacji tradycyjnym efektor, użytkownik umieszcza dłoń w specjalnej rękawicy (CyberGlove), która z kolei jest umieszczona w egzozkielecie (CyberGrasp), umożliwiającym wywieranie sił oddzielnie na każdy palec. Rękawica wyposażona w 22 czujniki umożliwia z kolei płynne śledzenie położenia palców dłoni. Jest to najbardziej uniwersalne i jednocześnie najbardziej kosztowne urządzenie z omówionych – posiada największe możliwości programowania, związane z wykorzystaniem danych o położeniu całej ręki, jak i poszczególnych palców dłoni użytkownika.



Rys. 8. Urządzenie CyberForce
Fig. 8. CyberForce device

4. URZĄDZENIA HAPTYCZNE W PROTOTYPOWANIU WIRTUALNYM I HYBRYDOWYM

4.1. ISTOTA PROTOTYPOWANIA HYBRYDOWEGO

Ograniczony realizm prototypów wirtualnych wykorzystujących wyłącznie standardowe techniki interakcji stał się impulsem do stworzenia podejścia hybrydowego. Podejście hybrydowe umożliwia manipulację obiektem fizycznym, odwzorowującym badany obiekt w środowisku wirtualnym, przy zachowaniu ruchów rąk użytkownika. Jeżeli prototypowaniu podlega pojedynczy obiekt, który jest na etapie projektowania możliwe jest między innymi przetestowanie ergonomii badanego wytworu.

Rozróżnia się dwa podstawowe podejścia do prototypowania hybrydowego – podejście haptyczne oraz podejście ze śledzeniem położenia. W podejściu ze śledzeniem położenia model fizyczny jest powiązany z markerem systemu śledzenia, co umożliwia rejestrowanie jego położenia na potrzeby symulacji immersyjnych. W podejściu haptycznym, prototyp fizyczny jest umieszczany na końcówce roboczej (efektorze)

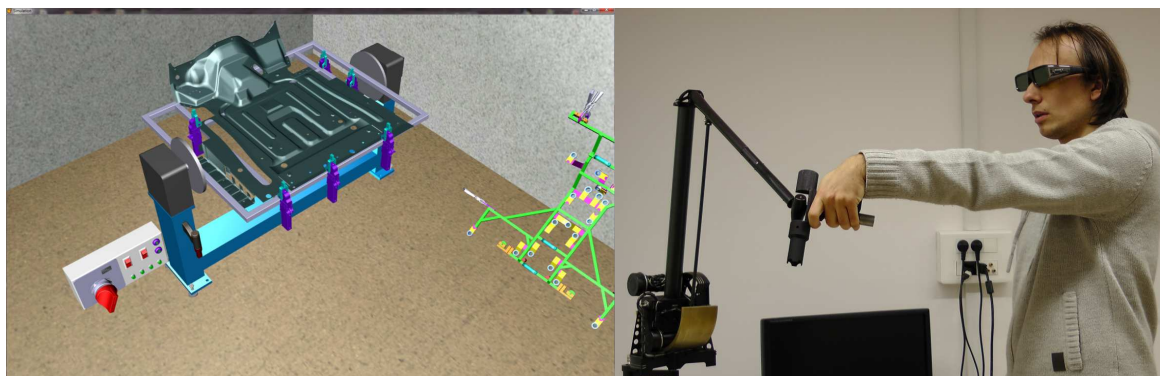
manipulatora haptycznego (patrz rys. 4 po prawej). Stąd zazwyczaj przyjmuje on kształt uchwytu obiektu, którym manipuluje się w środowisku wirtualnym.

Hybrydowe prototypy haptyczne, będące połączeniem aplikacji środowiska wirtualnego oraz fizycznego modelu umieszczonego na efektorze urządzenia haptycznego, tworzy się w kilku podstawowych etapach, do których należą utworzenie modelu cyfrowego, adaptacja modelu i wytwarzanie fizycznego obiektu technikami Rapid Manufacturing, utworzenie symulacji w środowisku wirtualnym oraz integracja sprzętowa i programowa [1].

4.2. PRZYKŁADY INTEGRACJI URZĄDZEŃ HAPTYCZNYCH ZE ŚRODOWISKIEM WIRTUALNYM

Prototyp wirtualnego **stanowiska zgrzewania kołków z blachą** (ang. *stud welding*) jest przykładem podejścia haptycznego do prototypowania hybrydowego. Model tego stanowiska został przygotowany w środowisku CATIA v5 zgodnie z rzeczywistym układem stanowiska produkcyjnego. Pierwotnie stanowisko przygotowano z przeznaczeniem na system śledzenia magnetycznego [10]. Jednakże mocno ograniczony zakres możliwości testowania ergonomii czynności zgrzewania z użyciem pistoletu sprawiła, że zdecydowano się zastosować urządzenie haptyczne – manipulator Phantom Premium 3.0.

Na podstawie modelu pistoletu wygenerowano bryłę, którą poddano adaptacji poprzez dopasowanie wewnętrznego jej kształtu do geometrii końcówki manipulatora haptycznego. Następnie przygotowano modele fizyczne, z zastosowaniem techniki Fused Deposition Modeling, uzyskując łatwy w montażu model pistoletu. Jednocześnie utworzono powiązanie pomiędzy fizyczną a wirtualną reprezentacją narzędzia. Istniejący system detekcji kolizji pistoletu z otoczeniem rozbudowano o odpowiedź siłową, a położenie końcówki manipulatora powiązano z położeniem wirtualnego pistoletu. W efekcie uzyskano kompletną aplikację, umożliwiającą badanie różnych aspektów procesu zgrzewania kołków z blachą (rys. 9).



Rys. 9. Wirtualne stanowisko zgrzewania kołków po lewej model wirtualny [10], po prawej manipulacja prototypem hybrydowym pistoletu do zgrzewania

Fig. 9. Virtual workplace for stud welding, virtual model on the left [10], manipulation of the hybrid prototype of stud welding gun on the right

Innym przykładem zastosowania zaawansowanych urządzeń haptycznych w projektowaniu jest wirtualny prototyp cyfrowego chwytaka robotycznego (RMH), zbudowany w środowisku wirtualnym na bazie cyfrowego modelu CAD chwytaka i powiązany z urządzeniem CyberForce. Powstała aplikacja, dzięki symulacji kolizji oraz dynamiki obiektów z siłowym sprzężeniem zwrotnym przekazywanym do każdego palca dłoni osobno, umożliwia testowanie różnych sposobów chwytania obiektów z zastosowaniem prototypowanego chwytaka (rys. 10). Zastosowanie modelu wirtualnego w powiązaniu z interakcją haptyczną pozwoliło na usprawnienie konstrukcji chwytaka i na ustalenie zakresu jego pracy oraz możliwości jeszcze przed zbudowaniem jakiegokolwiek prototypu fizycznego.



Rys. 10. Model wirtualny chwytaka robotycznego (po lewej) oraz przykłady testów chwytania różnych obiektów z zastosowaniem urządzenia CyberForce jako sposobu interakcji

Fig. 10. Virtual model of the robotic gripper (on the left) and examples of gripping tests performed on various objects using CyberForce device as a method of interaction

5. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w artykule urządzenia haptyczne można określić jako obecnie najbardziej zaawansowane technicznie urządzenia służące do interakcji między człowiekiem a środowiskiem wirtualnym. Prototypowanie wirtualne oraz hybrydowe z zastosowaniem urządzeń haptycznych ma szereg zalet, do których należą m. in.:

- wysoki realizm utworzonych symulacji ze względu na siłowe sprzężenie zwrotne,
- skrócenie czasu testowania i kosztów przygotowania prototypów ergonomicznych narzędzi,
- uniwersalność podejścia – możliwość zastosowania w projektowaniu narzędzi ręcznych, elektronarzędzi, narzędzi medycznych, stanowisk pracy, a także różnych przedmiotów codziennego użytku.

Do wad podejścia haptycznego do prototypowania wirtualnego i hybrydowego należą:

- ograniczony przestrzenią roboczą manipulatorów zasięg działania człowieka – brak możliwości przemieszczania się,
- ograniczenie możliwości manipulacji do pojedynczego obiektu – jednoczesna manipulacja kilkoma obiektami nie jest możliwa (za wyjątkiem urządzenia CyberForce),

- trudność zaprogramowania realistycznej odpowiedzi siłowej w wielu przypadkach ze względu na brak opracowanych modeli matematycznych, opisujących ilościowo oddziaływanie różnych obiektów technicznych na człowieka,
- koszty urządzenia haptycznego.

Należy stwierdzić, że w chwili obecnej zastosowanie urządzeń haptycznych w inżynierii projektowania nie jest powszechne – główną przyczyną tego stanu jest ich koszt oraz brak wykwalifikowanych w tym zakresie programistów VR. Autorzy uważają, że upowszechnienie rozwiązań opartych na symulowaniu dotyku jest wyłącznie kwestią czasu – pojawiające się coraz częściej rozwiązania typu *low-cost* pozwalają mieć nadzieję na pełne wykorzystanie możliwości tej technologii w przyszłości.

LITERATURA

- [1] PAJĄK E., GÓRSKI F., WICHNIAREK R., DUDZIAK A., 2011, *Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji*, Poznań, Promocja 21.
- [2] GÓRSKI F., HAMROL A., GRAJEWSKI D., ZAWADZKI P., 2013, *Integracja technik wirtualnej rzeczywistości i wytwarzania przyrostowego*, *Mechanik*, 3/4.
- [3] CHCIUK M., MYSZKOWSKI A., 2008, *Wykorzystanie trzyosiowego dżojstika dotykowego z cieczą magnetoreologiczną i siłowym sprzężeniem zwrotnym do sterowania ramionami robota*, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 28/4, 35-42.
- [4] SZYMAŃSKI Z., NAPIERAŁA J., WĘCŁAWEK J., 2013, *Mechatroniczny manipulator układów sterowania wyposażonych w pulpit sterowniczy*, *Napędy i Sterowanie*, 6.
- [5] SORFONIA R. E., SAVII G., DAVIDESCU A., 2012, *Real-time collision detection for long thin medical instruments in virtual reality-based simulators*, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 13th International Conference, 1107 – 1112.
- [6] SORFONIA R.E., SAVII G., DAVIDESCU A., 2010, *Haptic Devices in Engineering and Medicine*, *Proc. IEEE Int. Conf. ICC-CONTI*, Timisoara, Romania, 373 - 378.
- [7] www.haption.com, dostęp: 31.10.2013.
- [8] www.geomagic.com, dostęp: 31.10.2013.
- [9] www.cyberglovesystems.com, dostęp: 31.10.2013.
- [10] GÓRSKI F., 2009, *Wirtualne stanowisko zgrzewania punktowego*, Praca magisterska, Politechnika Poznańska.

APPLICATION OF HAPTIC DEVICES IN VIRTUAL AND HYBRID DESIGN

Haptic devices have found a wide range of applications in design engineering, among other things thanks to application of Virtual Reality technology. Implementation of diversified tactile feedback makes virtual reality simulation more realistic. The paper describes construction and principles of operation of haptic devices and similarities and differences between them and typical industrial robots. Classification and review of haptic devices is presented. Possibilities of application of haptic devices in hybrid approach to product preparation for production were also described in the paper.