الوحـــدة الثانية

تقنيات التصميم الرقمية

المحتويات:

أولا: النمذجة

- ما هى النمذجة
- مستويات النمذجة
  - النمذجة البسيطة
  - النمذجة العميقة
- أبعاد النمذجة الأربعة
- أنواع النماذج:
  - النماذج الخطية Linear Models
  - النماذج الرياضية Mathematical Models
  - النماذج الهندسية Geometrical Models
  - النماذج الجرافيكية Graphical models
- مراحل عملية النمذجة
  - بناء النموذج
  - تركيب النموذج
  - اختبار النموذج وتقييمه
  - تجربة النموذج المركب
  - تبسيط النموذج وجعله أكثر ملائمة
- النمذجة بالحاسبات
  - أساليب النمذجة بالحاسبات
  - أهم سمات النمذجة

ثانيا: المحاكاة Simulation

- المحاكاة بالحاسب Computer Simulation
- أهم سمات المحاكاة:

ثالثا: المحاكاة التفاعلية

- أهم سمات المحاكاة التفاعلية:

رابعا: الواقع الافتراضى بالانغماس

- سمات نظم الواقع الافتراضي الانغماسى

الهدف العام للوحدة :

يهدف هذا الفصل إلى شرح المفاهيم الأساسية فى التصميم الرقمى ومقارنة سماتها الرئيسية ومكوناتها ومراحل عملها

تمهيد

تتضمن تقنيات التصميم الرقمية عدد من الأساليب أهمها:

- النمذجة
- المحاكاة
- الواقع الافتراضى الانغماسى

شكل (٤-١) التقنيات الرقمية للتصميم

أولا: النمذجة:

النمذجة هى واحدة من أهم عمليات التصميم ومراحله وتتضمن قدرا كبيرا من أساليب العرض وتقنياته سواء فى بناء النموذج أو في إظهاره بعد تمام بناءه.

وهناك فرق واضح بين النمذجة والاستنساخ التقليدى فكلاهما يمكنه أن ينقل السمات والصفات والإمكانيات، لكن الفرق يكمن في نوعيةالصفات و الإمكانيات أو المهارات التى يتم نقلها.

وينتج الاستنساخ التقليدى عن مهارة تأتي من رؤية نظرية قد تصل إلى حد السطحية تدعمها خبرة متراكمة. بينما في النمذجة تأتي المهارة والإمكانيات من القدرة على فك لترميز غير مدرك حسيا أو معنويا أحيانا وا ٍعادة صياغته فى هيئة أخرى قد تكون رمز ية وقد تكون طبيعية وقد تحمل الصفتين معا. لكن أهم ما يميزها فى هذه الحالة هو الفهم العميق للشيء المراد نمذجته.

ما هى النمذجة

وهناك عدد كبير من تعريفات النمذجة نتطرق إلى بعضها فيما يلى:

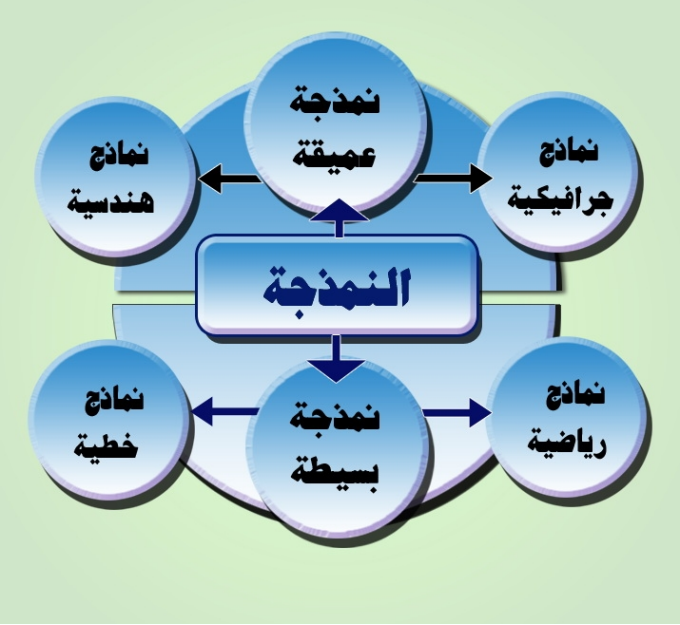
- هي عملية التعرف على واكتشاف السمات والصفات والسلوك والخصائص والقدرات وترميز ها أو تكويدها وا ٍعادة صياغتها بشكل مبسط له مدلول. أى أنها القدرة على تكرار الأشياء المنمذجة أو

نقلها أو إظهارها ولكن بشكل أسهل فهما.

- هي اكتشاف والتعرف على صفات وأنماط وأساليب الإنتاج أو الاستخدام وتلخيصها ونقلها بشكل يعبر عن الأصل مع إهمال تفاصيل غير مهمة.
- هى التركيز علىما وراء الشيء المراد نمذجته من مهارات أو صفات أو خبرات وأسباب وجودها وصياغته فى شكل رمزى. وهنا يجب أن يجد المصمم مبررا لوجود أى رمز أو تبسيط لعنصر من عناصر النمذجة.

مستويات النمذجة

هناك عدة تصنيفات لمستويات النمذجة لكن أهمها يصنف هذه المستويات إلى مستويين، النمذجة البسيطة والنمذجة العميقة[١]:



شكل (٤-٢) مستويات النمذجة

النمذجة البسيطة:

هي اكتشاف أو التعرف على صفات وأنماط وأساليب وطريقة الإنتاج أو الاستخدام ونقلها، ويركز هذا النوع من النمذجة على حصيلة من المعارف تتناول ما يتضمنه الشيء المراد نمذجته من الصفات أو ما ينبنى عليه من خبرة أو مهارة حتى وصل إلى ما وصل إليه من تطوير أو ابتكار فى الشكل أو البناء أو حتى تطوره فى السمات المرئية عن شيء آخر يسبقه . وتتم عملية النمذجة هذه عبر اكتشاف مجموعات من الفروق، وطرق البناء،و عمليات التشغيل والتعامل وأثرها في الشيء. ومثال لذلك هو النمذجة البسيطة لمنتج ذى تركيب غير معقد لا فى صفاته الشكلية ولا الوظيفية.

ويظهر فى هذا الشكل قدرة المصمم على تلخيص كل سمات وصفات المنتج إلى وحدات رمزية بسيطة

[١] أحمد وحيد مصطفى تقنيات متقدمة فى التصميم والتصنيع بالحاسبات – روز اليوسف - ٢٠٠٤

للغاية هى اقل ما يمكن أن يصف هذا المنتج. ثم فى الصور الأخرى كيف يكون النموذج أكثر تعقيدا وأكثر توفيرا للتفاصيل.

النمذجة العميقة:

تركز علىما وراء الشيء المراد نمذجته من مهارات أو صفات أو خبرات وأسباب وجودها. وهنا يجب أن نجد مبررا خلف أى رمز أو تبسيط أو عنصر من عناصر النمذجة نتخذه. وهكذا فإنه لنمذجة منتج بهذه الطريقة ينبغى أن نتابع بدقة ما وراء هذا المنتج من معتقدات، ومعايير، وبرامج عقلية، وأسباب اختيار نوع ما من الأنظمة التمثيلية ، والاستراتيجيات التي ولدت الفرو قات والطرق ,العمليات التي أدت إلى بناءه أو التى تنتج عنه. ويتضمن هذا التعرف على عناصر التميز وكذلك عناصر الإعاقة، و المعايير و المفهوم الذهني الداخلي (الإستراتيجية المعرفية) وكيف ترتب العناصر و الأفكار وكيف تتضافر لبناء الشيء وصياغته فى صورته التى هو عليها[٢].

أبعاد النمذجة الأربعة:

- النمذجة المفصلة Detailed (Partial) Modeling :التعرف على وا عادة صياغة كل مظاهر التصميم وكذلك ما يقف وراء هذه المظاهر.
- النمذجة الكلية Aggregate Modeling :التعرف على وا عادة بناء عدد من الكليات التى يمكن أن تنمذج الصورة الكلية بدون التطرق إلى تفاصيل هذه الكليات.
- النمذجة الواعية Conscious Modeling: ويبقى فيها المصمم في موقع علوي (اى أن يتخذ المصمم صفة المراقب) لكى يقوم بمراقبة وصفات وسلوك واستجابات وأداء المنتج بدون الانخراط فى تجربة مباشرة معه.ويتميز هذا النوع من النمذجة بسيطرة المصمم الكاملة عليه وعدم تأثره برأيه الشخصى أو ميوله.
- النمذجة غير الواعية Unconscious Modeling : ويكون على المصمم فى هذه الطريقة الاتصال القويو الألفة العميقة بالمنتج وبالتالي التفاعل الكامل معه في حالته والتعرف بذلك على نموذجه المتكامل أو حتى بعضه.

أنواع النماذج:

للنماذج أشكال عديدة ومتنوعة قد يصعب حصرها لكن أهمها فيما يتعلق بنطاق عمل هذه الدراسة هى أنواع النماذج التالية[٣]:

2 H. Pottmann, Q.-X. Huang, Y.-L. Yang and S.-M. Hu , Geometry and convergence analysis of algorithms for registration of 3D shapes, Int. J. Computer Vision 2006

3 Q.-X. Huang, S. Flöry, N. Gelfand, M. Hofer and H. Pottmann, Reassembling fractured objects by geometric matching., ACM Trans. Graphics, Proc. SIGGRAPH 2006

- النماذج الخطية Linear Models:
- النماذج الرياضية Mathematical Models:
- النماذج الهندسية Geometrical Models:
- النماذج الجرافيكية Graphical models

النماذج الخطية Linear Models:

وهى أكثر أنواع النماذج تلخيصا لصفات المنتج وسماته الرئيسية. وهذه تكون بسيطة للغاية وتتسم بالترميز الواضح والابتعاد عن تمثيل المظاهر غير المرئية.

النماذج الرياضية Mathematical Models:

وتستخدم هذه النماذج المعادلات الرياضية لبناء النموذج. فالمعروف أن معادلة الخط المستقيم هى $y = mx + b$ حيث "m" هى slope بينما "b" فهى intercept

أما معادلة الدائرة $X^2 + Y^2 = r^2$ أو $(X-H)^2 + (Y-K)^2 = r^2$ حيث h و k هى إحداثيات مركز الدائرة

النماذج الهندسية Geometrical Models:

يطلق أسم النمذجة الهندسية Geometric modeling على عملية بناء أشكال ثلاثية الأبعاد يدويا أو بواسطة الحاسب فى أغراض تصميم، وتحليل، وتصنيع المنتجات وما تتطلبه من نماذج أخرى. وهناك تقنيتان رئيسيتان لبناء نموذج هندسى[4] للمجسم المراد إنشاؤه تتلخصان فى تمثيل سطح المجسم (الكرة مثلا) إما سلسلة من المنحنيات أو مجموعه من المضلعات (مثلثات – مربعات –مخمسات)، المتراصة جنبا إلى جنب.

وهكذا فإن بناء المجسمات يستلزم إيجاد علاقة رياضية بين أسطح ثنائية الأبعاد تتواجد فى مستويات Planes واتجاهات Orientations مختلفة.

النماذج الجرافيكية Graphical models

وهى تمثيل مصور Pictorial Representation ينشئ نماذج جرافيكية. والصورة الفوتوغرافية هى نوع من هذه النمذجة، فهى تحمل صفات الأصل المرئية مصغرة أو مكبرة أو حتى بنفس القياس. وتنقسم هذه إلى نماذج ثنائية وثلاثية الأبعاد لكنها تظل ثنائية الأبعاد مهما كان التجسيم فيها وذلك لطبيعة عرضها على وسائط ثنائية الإبعاد كالورق وشاشات الحاسب وغيرها. وللنماذج الجرافيكية أشكال عديدة ومتنوعة لكن هذا البحث ليس مجالا للخوض فيها.

مراحل عملية النمذجة:

4 H. Pottmann, B. Odehnal, M. Peternell, J. Wallner, and R. Ait Haddou. On optimal tolerancing in Computer-Aided Design. In R. Martin and W. Wang, editors, Geometric Modeling and Processing 2000, pages 347-363.

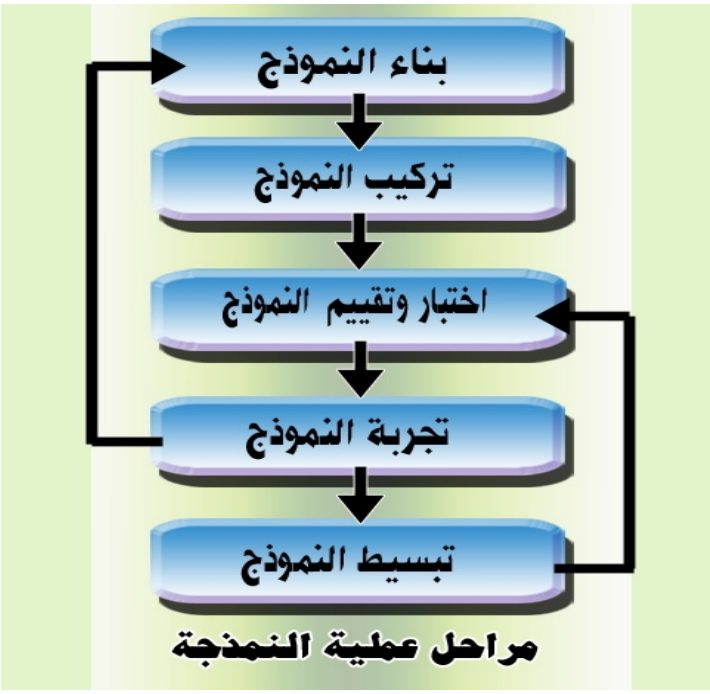
عملية النمذجة هى تطبيق لمجموعة من المهارات والقواعد العقلية للوصول إلى نموذج يعبر عن السياق المطروح، وتتضمن خمسة مراحل أساسية وهي :

١- بناء النموذج

أ- تبدأ عملية النمذجة فعليا بتحديد واختيار الأصل أو الأصول أو المعارف أو الخبرات المراد نمذجتها. ويساعد ملاحظة الفوارق على إيجاد الصفات المميزة. ونحتاج فى كثير من الأحيان لأن نقارن الشيء بنقيضه وكذلك التعرف على أمثلة مختلفة ومواقف مختلفة قد تؤثر على تصورنا للنموذج فتكون هناك إمكانية ملاحظتها وبالتالي التأكد من صحتها.

ب- استنباط مركبات التميز والقوة في صفات أو سلوك المنتج (ملاحظة الفروق) ويقوم هذا التفريق على الحواس البشرية عادة ويتضمن مرحلتين:

- الخطوة الأولى: تفكيك الصفاتو السلوك إلى مركبات يمكن استيعابها واستحضارها وبالتالي إيجاد التعاقب الصحيح لها ومن ثم تطبيقها. وهذا يحتاج إلى مراقبة للأصل حال أدائه في بيئته، ومعرفة حدود عمله ونشاطه متى تبدأ ومتى تنتهي واتجاهها والمهارات الجزئية المرافقة[٥].



شكل (٤-٤) مراحل عملية النمذجة

- الخطوة الثانية: التأكد من وجود الصفات أو السلوك ومركباتها التى يمكن استيعابها واستحضارها باستخدام أساليب التحليل و التشخيص إلى أن يتم التأكد من وضوح كل جزئية محددا الاعتقاد والمعايير والاستراتيجيات للسلوك والتوجه العام والبرامج العقلية في كل حالة

5 J. Wallner. Geometric contributions to surface modeling. Unpublished, PhD thesis, Technische Universität Wien, 1996. Advisor: H. Pottmann

من خلال تكرار المراقبة مع أكثر من نموذج وضده .

٢. تركيب النموذج:

الخطوة الأولى: التعرف على المعلومات الخاصة بالنماذج المختلفة من اجل التعرف على الشكل النهائي للمنتج مفكك العناصر واضح أو مرتجل كل منها يشكل مجموعة عناصر ووضع شكل تقريبي للمنتج المراد نمذجته[٦] .

الخطوة الثانية: تحديد المركبات الحرجة للنموذج وذلك من خلال الرسوم والأمثلة المعاكسة فمثلا ماذا لو كنت لا تملك القدرة على الإمساك، أو الصب أو التناول ؟ وكل ذلك لاكتشاف الشكل العميق للنموذج مع متعلقاته من القيم والمعتقدات والبرامج العقلية والتوجه العام.

الخطوة الثالثة: تركيب تسلسلي متتابع أو متوازي للعناصر الأكثر أهمية للمنتج وبالتالي تحديد ترتيب أو نظام للمركبات يتداخل لكى يخلق شكل النموذج.

٣- اختبار النموذج وتقييمه :

هنا على المصمم أن يتبن إذا ما كان قد وصل إلى النموذج الذى يحمل الصفات المطلوبة للمنتج أي المعلومات الكافية من خلال مجموعة من الأسئلة أو قوائم التحقق Checklist:

- هل كانت المعلومات المتاحة وافية وتعبر عن كافة خصائص النموذج؟
- هل العناصر التى تم التعرف عليها يكفي وجودها لظهور هذا المنتج وعدمها لعدمه وهل هي شرط؟
- هل يوجد آلية للتغذية المرتجعة بحيث تعرف قربك أو بعدك من فهم المنتج المراد نمذجته؟ كأن نجرى استطلاعا للرأى أو استبيان لأراء المهتمين أو المستهلكين ومن ثم مناقشتها.

٤- تجربة النموذج المركب:

يتم هنا تجربة هذا النموذج للتعرف على إذا ما كان يعطي نفس النتائج التي يصل إليها المصمم وحده أو أن يكون انعكاسا لخبرات الآخرين من مستهلكين وبائعين وغيرهم. فإذا أعطى النتيجة ذاتها فقد اكتمل النموذج وان لم يعط يجب أن يبحث المصمم عن الخلل ، قد تحتاج للعودة لجميع المعلومات مرة أخرى .

٥- تبسيط النموذج وجعله أكثر ملائمة:

ما هي العناصر التي يمكن حذفها لهذا الغرض مع المحافظة على نفس النتيجة، ما هي العناصر التي يمكن إضافتها لإضافة نتيجة أفضل.

قد لا يكون هناك وجه مقارنة بين النمذجة كمدخل للتصميم وبين التصميم التقليدي خاصة في النتيجة المكتسبة آو المطلوبة. لكنه مع خبرات التصميم الأولى ينظر المصمم إلى تصميمات ناجحة فى

[6] H. Pottmann and J. Wallner. Computational Line Geometry. Mathematics + Visualization. Springer, Heidelberg, 2001.

متناول يده ويعتبرها قدوة تحتذى فى صفاتها أو أدائها أو استخداماتها. والآن ومع النمذجة أصبح لدينا العديد من الخيارات في اختيار التصميم القدوة والوقوف أمام هذا الشخص الناجح (المصمم) بهدف أن يصبح لدي القدرة في الحصول على أفضل ملكاته المتميزة إن لم يكن أفضل. والأجمل من ذلك هو الكفاءة بنقل هذه المهارة إلى شخص آخر من خلال تدريبه.

للأسف هناك نماذج لمن يفشلون في تفكيك النموذج وتحليل ودراسة الجزئيات للوصول إلى عناصر نجاحهم وبدلاً من النمذجة تجدهم يتيهون في صحراء الأدوار، ولكن من الممكن الإبداع في ذلك باكتساب معارف إضافية في طرق التعليم وأنظمة التفكير.

النمذجة بالحاسبات

النمذجة بالحاسبات هو استعمال الحاسبات فى تمثيل أشياء أو محاكاة لتتابع وسير عمليات فى منظومة أو منتج ما. ونماذج الحاسبة علمية عالية لأنها تسمح لشخص ما أن يدرس استجابة النظام أو المنتج المراد اختباره فى ظل ظروف لا يمكن أن يتعرض بسهولة لها بشكل آمن قى المواقف الحقيقية. أن نماذج الحاسبات أيضا لباحث أن يدرس عمل وسلوك النظام وما يمكن أن يحدث عند تعديل أحد المكونات الفردية المغيرة من النظام.

ويعرف نموذج الحاسب عادة في شكل تعبيرات وعلاقات رياضية باستخدام برنامج للحاسب لتمثل هذه المعادلات الرياضية لتمثل علاقات وظيفية ضمن نظام. عندما ينفذ البرنامج فإن التتابع فى عمليات الرياضية يكون تمثيلا ومحاكاة لديناميكية النظام الحقيقية يعطي النتائج في شكل بيانات.

وهناك نوع آخر من النماذج يتضمن تمثيل البيانات فى شكل رسم بياني يمكن أن يعرض على شاشة الحاسب، بنفس الطريقة التى يمكن بها تقريباً استخدام الطين لبناء مجسم ثلاثي الأبعاد أو بناء نموذج خشبى يمكن أن نتناوله بالمعالجة هذه هى القاعدة الأساسية التى يقوم عليها التصميم بمساعدة الحاسبة CAD.

ويتوقف نجاح نماذج الحاسب إلى حد كبير على دقة التمثيل الرياضي للأنظمة وعلى المتغيرات المدخلة. فى العديد من الأنظمة، يكون التمثيل الرياضي معقدا بشدة لأن هناك العديد من العوامل التى يتضمنها الموقف وقد تكون وحدات النظام أو مكوناته أيضا نظم فرعية تتفاعل كل منها مع الآخر. وتتضمن المتغيرات المدخلة غالبا ما يمثل الشروط والظروف التي تحيط بتسلسل العمليات أو التى تتحكم فى سلوك الشيء الذي يجرى تمثيله ما يكون عل المصمم أن يخمن أو يستنتج عددا من هذه المتغيرات.

إن قوة الحاسبات المتزايدة تجعل نماذج الحاسب مفيدة دائما، سواء كان ذلك فى مجالات البحث، أو التصميم، وحتى فى التطبيقات الشخصية. ومع الأجيال الجديدة من الحاسبات الفائقة القدرة التى تطرح فى الأسواق اليوم يصبح من المتوقع أكثر و أكثر أن نتمكن من بناء نماذج أكثر دقة

[7] J. Wallner. Geometric contributions to surface modeling. Unpublished, PhD thesis, Technische Universität Wien, 1996. Advisor: H. Pottmann.

لكثير من الأنظمة شديدة التعقيّد، مثل الطّقس، ودراسة تأثيرها على تصميم منتج ما.

يمكن أن تقسم عملية إنشاء الرسوم الثلاثية الأبعاد بالحاسب مرحليا إلى أربعة أقسام:

- النمذجة المجسمة 3D modeling :التى تصف عملية تشكيل وبناء المجسم
- تنظيم وجود المنتج layout فى بيئته وبناء علاقته بالأجسام الأخرى
- التحريك animation وتحديد أوضاع الجسم فى الفراغ عبر الزمن
- الإظهار 3D rendering الذى ينتج عنه صورة أو فيلم للمنتج.

والإظهار هوَتحويل معلوماتِ المجسمات ثلاثية الأبعاد إلى الخريطة النقطية التى تلزم لعرضها على الشاشة الإظهار Rendering وهذه واحدة من أعقد عمليات الحاسب وتَتطلّبُ ذاكر عالية وقدرة عالية على المعالجة. وفى هذه الحالة فإن مصطلح "ثلاثى الأبعاد (3D)" لا يشير إلى منظر يظهر من خلال عمل المخ على دمج مجموعة من المناظر المختلفة، وا ٍنما هو صورة تظهر بشكل دقيق وواقعى لتمثل ظلال وأضواء ومناظير محسوبة بحسابات رياضية دقيقة من خلال الحاسب فهو باستخدام الرياضيات يستنتج كيف يمكن لأى جسم أن يظهر للرائى من أى زاوية من الزوايا فى ظل ظروف معينة من إضاءة والظلال المنعكسة والخامات والألوان[٨] .

أساليب النمذجة بالحاسبات:

أهم سمات النمذجة:

أهم ما يميز النماذج هو العناصر التالية:

التلخيص والاختيار Abstraction:

تتميز النماذج، بل إنها لابد وأن تحمل سمات التلخيص والترميز والتكويد التى تحول من معالم المنتج الأصلى المراد نمذجته إلى مجرد تعبيرات مختصرة عن هذا الأصل وا ٍن حملت سماته الأساسية.

الاصطناعيةِ :

كقاعدة عامة كل النماذج مصطنعة Artificial فلا يوجد ما يمكن أن نسميه بالنموذج الطبيعى. وهذه الاصطناعية سمة لابد وان تميز النموذج حتى يكون هناك انفصال بين الأصل والنماذج التى تبسطه.

المحاكاة والمشابهة

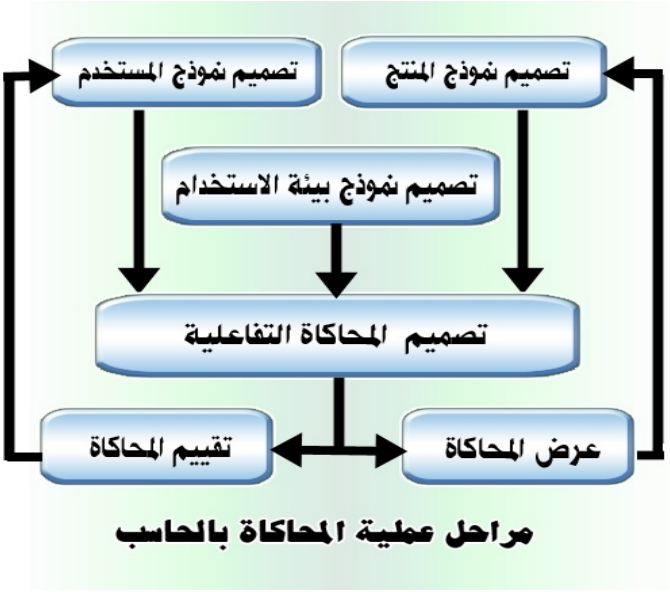
لابد وأن يحمل النموذج سمات مشابهة وليس شرطا أن تكون مماثلة للأصل. لكن المحاكاة هنا ليست شرطا ضروريا، فبعض النماذج لا تكون بها اى شبه بالأصل كأن نلخص الماء فى شكل خطوط منكسرة. وكلما كان النموذج يحمل المزيد من التشابه مع الأصل المراد نمذجته كلما اقترب من المستوى الثانى للواقع الافتراضى وهو المحاكاة.

ثانيا: المحاكاة Simulation

[٨] احمد وحيد مصطفى الحاسبات فى الفن والتصميم ص ١٤٤

الفرق بين النمذجة والمحاكاة بسيط للغاية فالمحاكاة هى التفاعل بين عدد من النماذج لخلق حالة ديناميكية يمكن من خلالها التعرف على نتائج تفاعل النماذج مع بعضها البعض[٩]. فعندما نخلق عددا من الكرات المعدنية باستخدام احد برامج النمذجة وعندما نعطيها ألوانا وخامات وانعكاسات وغيرها من الصفات، ومهما كانت دقة التمثيل فى هذه، فإنها تظل نماذج ولا تكون ابدآ محاكاة إلا إذا استخدمت في دراسة اصطدام واحدة منها بالأخرى أو تجمعها بشكل ما لخلق نموذج مركب ديناميكى يكون فيه أفعال وردود أفعال. ويكون هناك استجابات محددة ومدروسة مبنية على خصائص النماذج وطبيعتها. إذا فالنموذج شيء Object أما المحاكاة فهي حالة State.

وتعريف روزينبرج للمحاكاة يمكن أن يكون أكثر توضيحا فهو يقول" المحاكاة هو عملية تقليد سلوك نظام ما باستخدام الوسائل المتاحة فى نظام آخر، حيث يقلد النظام الأساسى بكل خصائصه فى النظام البديل ا(المحاكى)"[١٠]



شكل (٤-٥) مراحل عملية المحاكاة بالحاسب

وتستخدم المحاكاة الوصف أو التعبير الرياضى لوصف النظام الحقيقى. ويمكن أن تأخذ المحاكاة أيضا شكل التمثيل الصورى من خلال رسم البياني رأوم محرك يمثل هذه العمليات الديناميكية.

ويستهدف استخدام المحاكاة في عملية التصميم إكساب فريق التصميم القدرة على التنبؤ بدقة سلوك المنتج أو النظام ، وذلك لإثبات الصلاحية في عالم الواقع عند البدء في استخدام المنتج، كما تستهدف توضيح شكل المنتج وصفاته فى ظروف الاستخدام المختلفة[١١] .

---

[٩] محمد نبهان سويلم – الذكاء الصناعي – مقال – مجلة العلم – أكاديمية البحث العلمي ودار التحرير للطبع والنشر – العدد ٢١٢ – القاهرة – ١٩٩٤.

[10] Rosenberg, N.F. and Eekles, J " Product design fundamentals and methods, John Wiely and Sons, UK, 1995 p 233

[11] Olivier BOMSEL & Gilles LE BLANC - Digitalization, innovation, and industrial organization : 5th International Conference on Electronic Commerce Research -Montreal - October 2002 .

والمحاكاة مفيدة جدا خاصة في تمكين المصممين والقائمين على تقييم المنتج من توقع كيف يمكن أن يؤثر عمل منتجاتها المكونات الفردية ضمن ذلك المنتج. كما يمكنهم من التعرف على استجابات أجزاء المنتج المختلفة أو عناصره على أدائه فى مستويات الاستخدام المختلفة.

المحاكاة بالحاسب Computer Simulation

هو استعمال الحاسبات فى تمثيل الاستجابات الديناميكية لنظام معين أو منتج معين أو حتى إنسان من خلال بناء نظام آخر يحاكيه أو يشبهه فى كل أو معظم أو بعض صفاته وتستخدم المحاكاة الوصف الرياضي ، أو التعبير الرياضى عن النظام الحقيقى لبناء نموذج، أو نظام شبه حقيقي في شكل برنامج للحاسب هذا النموذج يعنى توليفة من المعادلات التى تمثل تماما العلاقات الوظيفية ضمن النظام الحقيقي عندما يجرى تنفيذ البرنامج فإن الديناميكا الرياضية تشكل تمثيلا تناظريا لسلوك النظام الحقيقي ، مقدمة في شكل بيانات يمكن استخدامها لكافة الأغراض[١٢]

والمحاكاة بالحاسب أيضا كما ترى نيكول سترانجمان وآخرين، هى نسخ من أحداث وأشياء وعمليات فى العالم الحقيقى تم إعادة تمثيلها بالحاسب. ويمكن أن يكون هذا التمثيل بالنصوص والكلمات الوصفية أو المعادلات الرياضية ويمكن أن يكون كذلك فى شكل رسوم ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد وهو الاتجاه المتزايد اليوم. وتأخذ الرسوم الثلاثية الأبعاد اتجاهات متعددة فهى تتراوح بين الرسوم الهندسية الطابع كأن يمثل الإنسان مثلا بمكعب أو كرة أو ما إليها كما يمكن أن تكون فى شكل إظهار متناهى الدقة يمثل الأشياء بكافة تفاصيلها وبمستويات من الإتقان تصل إلى ما يقترب تماما من الواقع[١٣].

وتستخدم المحاكاة بالحاسبات أيضا فى دراسة السلوك الديناميكي للأشياء أو الأنظمة استجابة لشروط قد لا يمكن أن تكون آمنة أو سهلة في الحياة الحقيقية . فعلى سبيل المثال يمكن الاستعاضة عن تعريض حياة السائق للخطر اختبار التغييرات الجديدة فى محرك سيارة بمحاكاته داخل الحاسب كما أن الانفجار النووي يمكن أن يوصف باستخدام نموذج رياضي يتضمن كافة المتغيرات كالحرارة، والسرعة، والانبعاثات الإشعاعية كما يمكن إضافة تمثيل مرئى مصور للتغييرات في بعض المتغيرات ، مثل كمية المادة الانشطارية التي أنتجت الانفجار.

أما المحاكاة الأبسط المستخدمة فى الحاسبات الشخصية فتتضمن بشكل رئيسي النماذج الهندسية Geometric models للعمليات والمنتجات والبيئات تستعمل النماذج الهندسية فى تطبيقات عديدة تتطلب تمثيلا رياضيا بسيط modeling للأشياء ، مثل الأبنية، أجزاء صناعية، والتراكيب الجزيئية للمواد الكيماوية أما المحاكاة الأكثر تقدما مثل تلك التى تحاكى حالات الطقس أو سلوك macroeconomic الأنظمة، فإنها تحتاج عادة إلى محطات عمل workstations قوية أو أحيانا لحاسبات رئيسية mainframe computers.

---

[١٢] احمد وحيد مصطفى الحاسبات فى الفن والتصميم – نقابة المصممين – القاهرة - ٢٠٠٤ – الطبعة الثانية

[13] Nicole Strangman, Tracey Hall and Anne Meyer (2005), Virtual Reality/Computer Simulationsand the Implications for UDL Implementation, National Center on Accessing the General Curriculum (NCAC), report no 1103-2005 pp 2-29

وفى مجال التصميم، فإن نماذج الحاسب للمنتجات الصناعية المصممة حديثاً تخضع إلى الاختبارات الافتراضية[١٤] أو الرقمية للتعرف على استجاباتها لقوى الشد والضغط والمتغيرات الفيزيائية والميكانيكية الأخرى. أمثلة أخرى من التطبيقات تتضمن حساب وتقدير الرد المنافسة للشركات في سوق معين وفى إعادة صياغة حركة طيران طائرة جديدة تم تصميمها.

والمحاكاة فى تصميم المنتجات الجديدة اشد أهمية والاحتياج لها يكون أساسيا. فالمصمم لابد وأن يتخذ الكثير من القرارات تتعلق بأفضل الحلول التصميمية ومدى ملائمة التصميم لأداء الوظائف المنوط بها. كما إن الحكم على مدى واقعية التصميم وجمالياته واقتصادياته يكون أجدى باستخدام المحاكاة.

أهم سمات المحاكاة:

تختلف المحاكاة عن النمذجة فى عدد من السمات فهى لا تحمل صفة الاختصار أو التكويد بقدر ما تحمل من مشابهة وتمثيل تصويرى تفصيلى. وفيما عدا ذلك فأهم ما يميز المحاكاة بالإضافة إلى سمات النماذج مثل الاصطناعية والتمثيل التشابهى هو العناصر التالية:

التفاعلية Interactivity

السمة الأساسية التى تميز المحاكاة عن النمذجة هى تفاعلية المحاكاة. حتى أنه ليقال أن المحاكاة هي عدد من النماذج فى حالة تفاعل فيما بينها. وهذه السمة هى ما يعطى المحاكاة طابعها الديناميكى.

القدرة التشابهية Imitation:

للنماذج القدرة على مضاهاة الأصل، بل والقدرة على أن تكون نسخة أخرى من الأصل يحمل كل صفاته المرئية مع إمكانية أن يكون اصغر أو اكبر حجما. ولكن التشابه التام ليس بالضرورة شرط لوجود المحاكاة. فالعديد من أوجه المحاكاة تعمل على إيجاد نسخة للشيء المراد محاكاته حتى ولو كانت فى صورة مبسطة أو مشوهة أو كاريكاتيرية الطابع.

القابلية للتكرار Replication

المحاكاة خاصة الرقمية منها تحمل قدرات التكرار اى أننا يمكننا أن نبنى محاكاة لمنتج ما وفى نفس الوقت إنتاج اى عدد من هذه المحاكاة معا أو في أماكن متفرقة.

ثالثا: المحاكاة التفاعلية

المحاكاة التفاعلية هى نوع من المحاكاة لا يكتفى بمجرد دراسة استجابة عناصر المنتج لأداء البعض الآخر أو تأثرها بمتغيرات خارجية مثل الإضاءة والحرارة والحركة[١٥] وإنما تعمد إلى التأثير المباشر فى

[١٤] يسر محمد الحافظ - الاتجاهات المعاصرة في نظرية التصميم في ضوء التقنيات والنظم الرقمية الحديثة - رسالة ماجستير غير منشورة – كلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان – القاهرة – ٢٠٠٣ – ص ٧١ ، ٧٢

[١٥] طارق إسماعيل محمد – الاستفادة من تقنيات الكومبيوتر فى تصميم بيئات أوسائط المتعددة - علوم وفنون – المجلد ١٨ العدد ٣ يونيو ٢٠٠٦ ص ١٦٧

النماذج لكى يحدث هذا التأثير فعلا فى النموذج أو النظام الذي يخلقه أكثر من نموذج معا فى حالة ساكنة أو ديناميكية.

فالمحاكاة التفاعلية تسمح للمصمم بالتدخل وا ٍضافة متغيرات جديدة أو تغيير قيم المتغيرات الموجودة. ليس هذا فحسب بل وأن يتوقع من المحاكاة التى يتعامل معها استجابة ما. والأمثلة عديدة فعندما يدفع المصمم منتجا لكى يرتطم بالأرض أو بمنتج آخر موجود ضمن نظام المحاكاة، فإنه من المتوقع إن يرى تحطم المنتج أو إصابته برضوض أو حتى إصابته للأرض بخدوش وما إلى ذلك من تأثيرات متوقعة. ويمكن فى هذه الحالة أن يرى اثر هذا الارتطام أو التصادم بشكل مباشر جرافيكى مرئى كما فى الرسوم المتحركة ويمكن ان يراه فى شكل معادلات رياضية أو أرقاما تعبر عن شدة الارتطام أو نتائجه. وقد يكون عرض هذه النتائج فورى وقد يكون فى شكل تقرير مطبوع[١٦].

لكن معظم نظم المحاكاة التى يتعامل معها المصممون اليوم كبرنامج Reactor الموجود ضمن حزمة 3D Studio Max تسمح له بمراقبة نتائج المحاكاة بشكل فورى وفى الوقت الحقيقي Real Time اى فى نفس الزمن الذى يمكن أن تحدث فيه مثل هذه الأحداث إذا ما كانت هذه النماذج وما يجرى لها حقيقى.

وهنا يكمن الجمال الحقيقى لبرمجيات المحاكاة التفاعلية، الذى يبدو فى قدرتها على إظهار الاستجابات الديناميكية فى الزمن المتوقع تماما.

فعندما نسقط كرة معدنية من الصلب على إناء نحاسي بسرعة عالية لا نتوقع أن تخترق الكرة الجسم النحاسى وتستقر بداخله، وا ٍنما نتوقع أن نرى الجسم النحاسى يتحرك فورا فى لحظة الارتطام ليبتعد عن الجسم الساقط كما نتوقع أن يتأثر بنيان الجسم النحاسى بالقدر المناسب لاندفاع الكرة المصنوعة من الصلب. وهذا هو ما نعنيه بالاستجابة فى الوقت الحقيقى Real Time[١٧].

و المحاكاة التفاعلية هى واحدة من أفضل أدوات المصمم اليوم وتسمح له ولغيره بالتأثير فى عناصر التصميم ليس فحسب فى بناء نموذج المنتج أو في إعطائه صفاته المميزة له شكلا وا ٍنما أيضا في إعطاء النموذج الصفات الفيزيائية له. فعندما تكون هناك كرة نحاسية لها ألوان النحاس وبريقه وانعكاساته فإن المحاكاة التفاعلية تفرض أن تحمل هذه الكرة وتستجيب للمتغيرات من خلال صفاته الفيزيائية كوزنه النوعى وصلابته وصلادته ومرونته وقدرته على التشكل بالشكل الذى نراه لأى منتج يحمل نفس هذه الخامة فى الطبيعة[١٨].

وهذا هو ما يجعل المحاكاة التفاعلية أهم وسائل الواقع الافتراضى فى تصميم المنتجات. فمجرد

---

16 William M. Hsu, John F. Hughes, Henry Kaufman, Direct manipulation of free-form deformations, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92). 26(2), pp. 177-184, 1992.

17 Morten Bro-Nielsen, Stephane Cotin, Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation, Computer Graphics Forum, 1996.

18 Karan Singh, Eugene L. Fiume, Wires: A Geometric Deformation Technique, Proceedings of SIGGRAPH 98. pp. 405-414, 1998.

النمذجة أو المحاكاة التصويرية الاستاتيكية قد لا يكون لها تأثير واضح فى تقييم أداء التصميم ولكن فى شكله فقط. كما أن استخدام الواقع الانغماسى قد يكون ضربا من الخيال فى استجاباته ففى الواقع الافتراضى يمكن أن تطير أجسام البشر بما يخالف قوانين الطبيعة لكن ذلك لا يحدث ابدآ فى المحاكاة التفاعلية.

إننا نرى إن المحاكاة التفاعلية هى أدق وسائل المصمم فى هذا المجال واستخدامها يحقق له واقعا افتراضيا اقرب لعمله من اى من نظم الواقع افتراضى الأخرى.

وتسمح المحاكاة التفاعلية لآخرين بأن يشاركوا المصمم فى بناء نماذجه ومحاكاته لشكل وسلوك المنتج. ففى الدراسة التى أجراها إسلام غريب بعنوان الأسس القياسية للتطوير ثلاثي الأبعاد للمنتجات المعدنية باستخدام نظم التصميم الرقمي المتكامل[١٩] تمت الاستعانة بالمحاكاة التفاعلية عبر تجربة أجر اها وشارك معه آخرون فى بناء وتقييم عدد من المنتجات. وأثبتت هذه التجربة نجاحها فى خلق بيئة تفاعلية يشترك فيها أفراد من كافة التخصصات معا فى بناء وتقييم المنتج وا عادة صياغته بما يتلاءم مع متغيرات الشكل والوظيفة والتقنيات المتاحة واقتصاديات التصميم من خلال وجهة نظر مصممين تخصص كل منهم فى واحد من هذه العناصر.

كما أن زيادة الاهتمام فى الآونة الأخيرة بنشر التعليم عبر الشبكة العالمية World Wide Web فى شكل تدريب يعتمد على مقومات الشبكة وهو ما أطلق عليه web-based training WBT , ونتج عن القصور فى إمكانيات النصوص الفوقية hypertext ضرورة إدماج الواقع الافتراضى كجزء من التعليم الالكترونى يساعده ويدعمه لأداء مهامه. وقد عكفت هذه الدراسة على العناية بموضوع تدريس الإرجونوميكس عبر الواقع الافتراضى وتقييم نتائجه ومدى فاعليته. وقد تطرقت دراسة Dietmar Gude وآخرين [٢٠] إلى مدى دقة الأداء ومدى تأثر الطلاب وانفعالهم بمثل هذا النوع من التصميم التفاعلى عبر الانترنيت وأثره على نتائجهم. وأظهرت الدراسة إن طلاب التصميم يميلون إلى حد كبير لاستخدام هذه الطريقة لما تضمنته من وسائل مرئية أكثر قدرة على توفير المعلومات واستيعابها وعرضها للآخرين بشكل واضح. وعلى الرغم من أن هذه الدراسة ركزت على تقييم التصميم ومطابقته للمعايير الارجونومية لكنها أكدت على ضرور ة هذا النوع من المحاكاة التفاعلية بالمشاركة فى تصميم المنتجات..

أهم سمات المحاكاة التفاعلية:

بالإضافة إلى كافة سمات المحاكاة تضيف المحاكاة التفاعلية السمات التالية:

التفاعل Interaction

---

[١٩] إسلام السيد غريب، الأسس القياسية للتطوير ثلاثى الأبعاد للمنتجات المعدنية باستخدام نظم التمثيل الرقمى – بحث غير منشور – رسالة ماجستير كلية الفنون التطبيقية جامعة حلوان - ٢٠٠٦

[20] Dietmar Gude, Eike Branahl, Philipp Kawalek, Andreas Prions & Wolfgang Laurig (2007) "Evaluation of a virtual reality-based ergonomics tutorial", In D. de Waard, K.A. Brookhuis, S.M. Sommer, & W.B. Verwey (eds.), Human Factors in the Age of Virtual Reality (pp. 117-128). Maastricht, the Netherlands: Shaker Publishing

التفاعلية هى قدرة النموذج على الاستجابة للمؤثرات الخارجية عليه، سواء كانت هذه المؤثرات أفعال بشرية أو مثيرات بيئية.

والاستجابات هنا ليس من اللازم أن تتسم بالواقعية فى التفاعل فلا ننسى ابدآ أننا نتعامل مع تمثيل الكترونى مهما كانت الدقة فى هذا التمثيل ومهما ارتفع مستوى الواقعية فيه. ويمكن أن تكون هذه الاستجابات وفقا لقوانين الطبيعة الفيزيائية والكيميائية وغيرها ويمكن كذلك أن تكون وفقا لقانون يقرضه المصمم حتى ولو خالف قوانين الطبيعة. فيمكن على سبيل المثال أن يصطدم جسمان صلبان فيستقر احدهما داخل الآخر أو أن يطير فى اتجاه عكس المتوقع.

الفعالية- اللافعالية Activity-Passivity

تتسم المحاكاة التفاعلية بفاعليتها المفروضة عليها، بمعنى أنها ليست مبنية فى النموذج وا ٍنما تحدده لها الجوريثمات العمل التى يضعها المصمم. ويمكن أن تمارس نماذج المحاكاة التفاعلية نوعا من الفاعلية بأن تكون هى فى ذاتها مؤثرا فيما حولها. كما قد تكون الاستجابات بنوع من اللافاعلية اى بعدم حدوث الاستجابة المتوقعة أو حدوث استجابات سلبية أي عكس ما قد يكون متوقعا.

المشاركة عن بعد

يمكن لعدد من المصممين المشاركة فى التعامل مع نماذج المحاكاة التفاعلية والتأثير عليها معا أو بشكل منفرد. وقد يعطى كل مشارك أولوية في التعامل والتغيير والإضافة. وبهذا يمكن أن تكون المحاكاة التفاعلية فرصة متميزة للتصميم بالمشاركة. وهذا هو ما أكدته عدد من الدراسات.

ونظرا لما لهذا النوع من أنماط الواقع الافتراضي من مميزات فقد تم اختياره لتطبيقه في البحث . ويمكننا أن نلخص مميزات المحاكاة التفاعلية التى جعلته النمط المثالى لمثل هذا النوع من البحوث والدراسات فيما يلى:

رابعا: الواقع الافتراضى بالانغماس

وفيه يتم خلق حالة من التواجد المتكامل حيث يتم إيهامالمستخدِم بأنه لا وجود للحاسب والعالم الحقيقي، فلا يرى أو يشعر بأي شيء سوى هذا العالم المصنوع، الذي يوجده الحاسب، ويتصرف داخله بحرية تامة .

وتتم رؤية هذا العالم المصنوع بواسطة خوذة خاصة، أو نظارة إلكترونية تتصل بالحاسب؛ كما يرتدي المستخدم، في يديه قفازات إلكترونية، كوسيلة إضافية لتجسيد الواقع الافتراضي، تتيح له ملامسةً الأشياء التي يظن أنها موجودة.

سمات نظم الواقع الافتراضي الانغماسى

لا يمكن أن نطلق على شيء اسم العالم الافتراضي الانغماسى[٢١] إلا لو انطبقت عليه الصفات التالية:

الانغماسِ Immersion

[21] Aldridge, Susan. Reading, Writing, and Virtual Reality. Omni vol. 15 no. 10 (August 1993), p. 32. (VR project at West Denton High School in Newcastle upon Tyne, England.)

وهو غمر Immersion مستخدم الواقع الافتراضي في بيئة ثلاثية الأبعاد يرى فيها مشاهد مجسمة تجعله يشعر بالعمق والفضاء المحيط وهذه السمة تجعل المستخدم معزول عن العالم الخارجي حيث تتحول الحواس السمعية والبصرية إلى حواس مستنبطة من الحاسب

وأشهر أمثلة الانغماس عندما قامت القوات الجوية الأمريكية بتطوير بعض الأدوات لمحاكاة الطيران. حيث يمكن لقائد الطائرة أن يتمرس ويتدرب دون ان يترك الأرض

التفاعل Interaction

لا يتصور البعض أى نوع من الواقعية فى التفاعل مع أى تمثيل الكترونى. ومع هذا ففي برنامج مثل 3d عندما نقوم بتصميم براد مثلا ونقوم برفع الغطاء عنة فإننا لا نقوم بفعل حقيقي إنما نقوم بعمل افتراضي فهذا البراد ليس حقيقيا ولكن القضية في قدرتنا على التخيل فالبراد يصبح حقيقي في سياق تفاعلنا مع العمل .

المحاكاة Simulation

أصبح لتطبيقات الكمبيوتر الجرافيكية Computer Graphics تلك الدرجة الكبيرة من الواقعية التى تمنحنا الصور الواضحة وتنفخ فيه الحياة بطريقتها. إن هذه النظم تمنحنا فى الوقت الحالى ليس فحسب تصور تقريبى لشكل المرئيات بل أن الصور فيها تكاد تنطق بالحياة بما لها من بناء بصرى ونسيج وا إشعاع ضوئى يجذب العين داخل سطح ذو تفاصيل ملمسيه رائعة. إن المناظر الطبيعية المنتجة على ادنى الحاسبات قدرة اليوم هى عوالم ذات نسيج تفصيلى وتوقيت حقيقى فعلى وواقعية فوتوغرافية.

والمحاكاة الواقعية المقصودة ليست مجرد الصور أو النماذج التي تحاكى الواقع بدرجة كبيرة بل وأيضا تلك التى تتيح السلوك البشرى الطبيعى normal behavior مثل الرؤية، المشى وحتى الطيران داخل هذه البرامج. ليس هذا فحسب بل ويكون على هذه التقنيات أن تمثل العالم الافتراضي في حجم مناسبRelative sizes تماما لحجم الإنسان الطبيعي أو حتى حجم المستخدم لو كان حجمه غير طبيعى. وتستجيب البيئات و المجسمات والنماذج التى تمت محاكاتها لأفعال المستخدم اللحظية باستجابات منطقية Logical responses وفى الزمن الحقيقى Real time.

شكل (٤-٦) التفاعلية المشتركة في التدريبات العسكرية

التفاعلية Interactivity

تبدأ التفاعلية باستعمال أدوات تفاعلية interactive equipment ترسل وتستقبل المعلومات للتعامل الفعلى مع الأشياء الافتراضية باستخدام أجهزة مثل قفازات البيانات data gloves وعصى التحكم wands والنظارات الخاصة glasses والأقنعة masks، أو جهاز كامل يغطي الجسم يتيح التعامل مع العالم الافتراضي والتأثير فيه والتفاعل معه عن طريق الحواس السمعية والبصرية حتى يمكن التحكم في عناصر هذا النظام[٢٢].

أما التفاعلية المشتركة Collaborative interactivity فتعني انه يمكن أن يكون لدينا عدة أشخاص من أماكن مختلفة يمكنهم أن يتفاعلوا جميعا في نفس العالم ويظهر كل فرد منهم للآخر بشكل افتراضي[٢٣] بل ويمكنهم التفاعل كفريق واحد مع البيئة الافتراضية وذلك عن طريق استخدام بعض الأجهزة مثل BOOM، CAVE، HMD وهذه الصفة تساعد على توحيد عمل المصممين والمهندسين معا فإذا أراد المصمم أن يضيف أية تعديلات على تصميمه فإن المهندس سيمكنه أن يصحح الخطأ فى حالة عدم إمكانية تنفيذ التعديل فى نفس اللحظة مما سيخفض الوقت المطلوب لتطوير المنتجات بقدر ملحوظ

"الاصطناعية Artificiality

يتفاخر بعض المصممين أن " الشيء المصطنع يحاكى الأصيل تماما Genuine Simulation . وهذه المسألة يجب إعادة النظر فيها. فليس هناك عيب فى أن يكون الشيء مصطنعا. فكل عوالم الواقع الافتراضى مصطنعة ومع ذلك فإنها تستخدم لكى تجلب المنفعة والسعادة لمستخدميها. ان الاصطناعية التى تميز الواقع افتراضى هى سبيله للتميز. ونحن نتصور انه عندما يأتى اليوم الذى نتمكن قيها تماما من محاكاة كل شيء بشكل تام، ستعود نغمة الفنان والكاميرا وسيبدأ المصممون فى العثور على حلول تبعدهم عن هذه الواقعية الممقوتة التى تقتل الإبداع أحيانا.

الفعالية- اللافعالية Activity-Passivity

كما يشير جارون لانيير فان نظم الواقعية الافتراضية يمكنها تقليل أعراض الفتور التى قد تصاب بها وذلك ببساطة من خلال لمطالبة بقرارات إبداعية، وأن يكون لها القدرة على الاستجابة بفاعلية أحيانا وبلا فاعلية أحيانا أخرى. إن قدرة الإنسان وعناصر البيئة والأشياء من حولنا على الاستجابة قد لا تكون أحيانا وفقا لأهوائنا وهكذا أيضا يجب أن تكون استجابات نظم الواقع الافتراضى."[٢٤]

التواجد عن بعد Telepresence

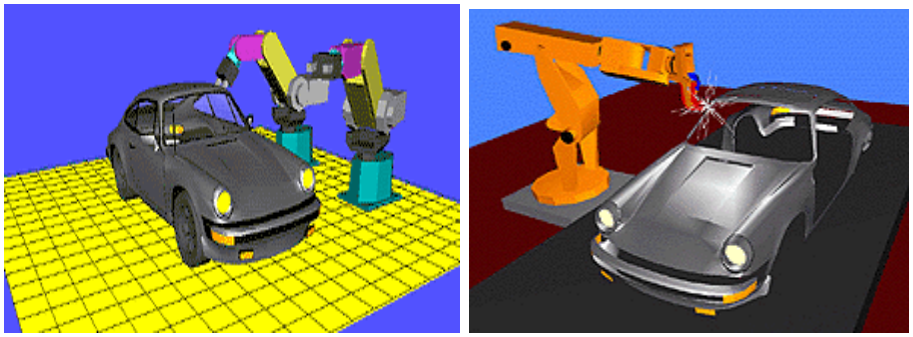
---

[22] Ahmed W Mustafa (1994) *The Feasibility of a Computer Aided Product Design Education and Practice System*, 2nd International Conference on Computer Engineering Applications, Yanbu. PP 51-67

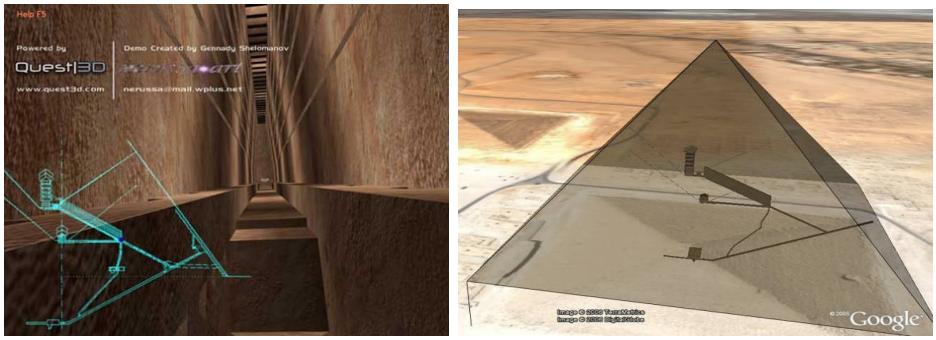
[٢٣] إسلام السيد غريب، الأسس القياسية للتطوير ثلاثى الأبعاد للمنتجات المعدنية باستخدام نظم التمثيل الرقمى – بحث غير منشور – رسالة ماجستير كلية الفنون التطبيقية جامعة حلوان - ٢٠٠٦

[٢٤] احمد وحيد مصطفى – الحاسب الآلي في الفن والتصميم – نقابة مصممي الفنون التطبيقية – القاهرة - ٢٠٠٣

فكرة التواجد عن بعد تغمر المستخدم في عالم واقعي عن طريق كاميرات الفيديو والتواجد عن بعد يمكن المستخدم من الاتصال والتأثير في موقع ما دون الوجود في هذا الموقع مثال لفكرة التواجد عن بعد واستخدامها في عرض التصميم.



شكل (٤-٩) إجراء التجارب والاختبارات المعملية افتراضيا باستخدام الروبوت



شكل (٤-١٠) استكشاف الممرات الداخلية لأهرام الجيزة بالتواجد عن بُعد من الخارج